



Riesgo de expansión de *Fusarium oxysporum f. cubense* (Nectriaceae) ante el cambio climático en Ecuador continental

Expansion risk of *Fusarium oxysporum f. cubense* (Nectriaceae) in the face of climate change in continental Ecuador

Yarelys Ferrer-Sánchez¹ , Domenica Gabriela Barahona-Manzaba¹ , Alexis Herminio Plasencia-Vázquez^{2,4} ,

Fernando Abasolo-Pacheco³ 

Resumen:

Antecedentes y Objetivos: El hongo *Fusarium oxysporum f. cubense* afecta fuertemente al plátano. Debido a los cambios climáticos que se prevén, particularmente en Ecuador, la expansión de este patógeno se podría ver favorecida y provocar pérdidas económicas considerables para la agricultura. Por ello, en esta investigación se evaluaron los cambios en la distribución geográfica potencial de *F. oxysporum f. cubense* en Ecuador continental ante varios escenarios de cambio climático.

Métodos: Se utilizaron 77 registros de *F. oxysporum f. cubense* extraídos de bases de datos internacionales y de la literatura científica. Las variables bioclimáticas se tomaron de Worldclim, para la actualidad y para 2050 y 2070, bajo diferentes escenarios de cambio climático. Con el algoritmo de Máxima Entropía se obtuvo el modelo de nicho climático de la especie y se proyectó a un escenario de emisiones de gases mitigador (SSP-126), uno cauteloso (SSP-245) y otro extremo (SSP-585).

Resultados clave: El modelo tuvo buen rendimiento y predice adecuadamente las zonas con condiciones ambientales similares a los sitios con registros de presencia de *F. oxysporum f. cubense*. Las condiciones favorables aparecen principalmente en la región Sierra y Costa. Bajo los escenarios climáticos, la mayor expansión de condiciones favorables se dará en la región Costa, en el escenario de mitigación (SSP-126) para 2050, con un aumento de 18,550 km² respecto a la distribución potencial actual.

Conclusiones: Si las emisiones de gases de efecto invernadero generan un clima en 2050 como el simulado en el SSP-126, las condiciones favorables para este hongo superarán a las actuales y se expandirá dentro de la Costa hacia las zonas de producción de banano. Esto provocará un impacto negativo en la economía de los productores bananeros.

Palabras clave: agricultura ecuatoriana, distribución geográfica potencial, mal de Panamá, MaxEnt, modelación de nicho ecológico.

Abstract:

Background and Aims: The fungus *Fusarium oxysporum f. cubense* strongly affects banana. Due to the climatic changes expected, particular in Ecuador, the pathogen expansion could be favored and cause considerable economic losses for agriculture. In this study, the changes in the potential geographic distribution of *F. oxysporum f. cubense* under various climate change scenarios in continental Ecuador were evaluated.

Methods: We extracted 77 *F. oxysporum f. cubense* records from international databases and scientific literature. The bioclimatic variables were taken from Worldclim, for the present and for 2050 and 2070, under different climate change scenarios. Using the Maximum Entropy algorithm, the species' climate niche model was obtained and projected to a mitigating (SSP-126), a cautious (SSP-245) and an extreme (SSP-585) gas emissions scenario.

Key results: The model performed well and adequately predicted areas with environmental conditions like the sites with records of *F. oxysporum f. cubense*. Favorable conditions appear mainly in the Sierra and Costa regions. Under the climate scenarios, the greatest expansion of favorable conditions will occur in the Coast region, in the mitigation scenario (SSP-126) for 2050, with an increase of 18,550 km² with respect to the current potential distribution.

Conclusions: If greenhouse gas emissions generate a climate in 2050 like the one simulated in SSP-126, favorable conditions for this fungus will exceed the current ones and it will expand within the Coast towards the banana production areas. This will have a negative impact on the economy of banana producers.

Key words: ecological niche modeling, Ecuadorian agriculture, MaxEnt, Panama disease, potential geographic distribution.

¹Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Avenida Quito, km 1.5 vía a Santo Domingo de los Tsáchilas, 120501 Quevedo, Ecuador.

²Universidad Autónoma de Campeche, Centro de Investigaciones Históricas y Sociales, Avenida Agustín Melgar S/N, 24039 Campeche, México.

³Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Avenida Quito, km 1.5 vía a Santo Domingo de los Tsáchilas, 120501 Quevedo, Ecuador.

⁴Autor para la correspondencia: ahplasen@uacam.mx

Recibido: 28 de abril de 2023.

Revisado: 13 de julio de 2023.

Aceptado por Victor Bandala Muñoz: 9 de mayo de 2024.

Publicado Primero en línea: 11 de julio de 2024.

Publicado: Acta Botanica Mexicana 131 (2024).

Citar como: Ferrer-Sánchez, Y., D. G. Barahona-Manzaba, A. H. Plasencia-Vázquez y F. Abasolo-Pacheco.

2024. Riesgo de expansión de *Fusarium oxysporum f. cubense* (Nectriaceae) ante el cambio climático en Ecuador continental. Acta Botanica Mexicana 131: e2207. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm131.2024.2207>



Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

e-ISSN: 2448-7589



Introducción

La marchitez del banano por hongos del género *Fusarium* Link (conocida como mal de Panamá) es causada por el hongo patógeno *Fusarium oxysporum* Schleld. f. *cubense* (E.F. Sm.) W.C Snyder & H.N. Hansen (en adelante abreviado como FOC), el cual se transmite por el suelo e invade las raíces y el sistema vascular de la planta, lo que provoca la marchitez y la muerte regresiva (Cook et al., 2015; Ploetz, 2015a, b). Actualmente, esta enfermedad es considerada como la de mayor importancia en cuanto a amenazas a la producción mundial de frutas (Sánchez-Espinosa et al., 2020). Ha causado pérdidas en la industria bananera por millones de dólares y ha devastado miles de hectáreas de plantaciones en todo el mundo (Ploetz, 2006; Cook et al., 2015). Según Fu et al. (2016), la enfermedad ha obligado a los productores de banano a buscar nuevas tierras para sus plantaciones debido a la recurrencia después de unos pocos años de cultivo.

En la década de 1950, la aparición de un brote de la raza 1 (RT1) de FOC colapsó la industria bananera Gros Michel en Centroamérica (Dita et al., 2018; Maryani et al., 2019). A fines de la década de 1980, una nueva cepa de FOC raza 4 (RT4) infectó cultivares de banano del subgrupo Cavendish, que habían sido seleccionados por su resistencia a RT1 (Ploetz, 2015b). Si bien la distribución de RT4 estuvo restringida al este y partes del sudeste asiático durante mucho tiempo, se detectó recientemente en Colombia y, por lo tanto, por primera vez en América Latina (García-Bastidas et al., 2019). A futuro, esta situación podría poner en riesgo la economía de varios países latinoamericanos, los cuales dependen en gran medida de la producción bananera (Arias et al., 2004).

Actualmente, Ecuador es el principal exportador de banano a nivel mundial; para el año 2021 se registraron 167 mil hectáreas cultivadas de esta fruta en el país (Macaroff y Herrera, 2022). Casi toda la producción bananera en Ecuador se concentra en tres provincias de las tierras bajas de la costa del Pacífico (El Oro, Guayas y Los Ríos), las cuales se caracterizan por un clima húmedo tropical y suelos fértiles, que constituyen condiciones ideales para el cultivo de banano (Elbehri, 2015). El plátano se produce en regiones tropicales y requiere temperaturas relativamente altas, que varían entre 18-30 °C y un gran suministro de agua durante

todo el año, que oscila entre 100-180 mm por mes (Elbehri, 2015). Ecuador tiene características climáticas y geográficas adecuadas para el crecimiento y expansión del patógeno citado, ya que se tiene registrado que se desarrolla óptimamente en un rango de temperaturas de 23 a 29 °C (Pérez-Vicente y Porras, 2015). Este solapamiento en cuanto a los requerimientos bioclimáticos entre cultivos y fitopatógenos, para su establecimiento, se ha descrito para otras especies (Ferrer-Sánchez et al., 2022).

En Ecuador se ha documentado la presencia de FOC RT1, que en la década de 1960 causó fusariosis en tres variedades del banano: Gros Michel, Manzano y Pisang Awak (Salas Torres, 2015). También se ha reportado la presencia de la raza FOC RT2, y a pesar de que aún no se ha reportado la variante FOC RT4, se predice que su ingreso al país provocaría severos impactos económicos y sociales (AGROCALIDAD, 2013).

Debido a las variaciones climáticas de las últimas décadas y al calentamiento global, se esperan cambios en la distribución de muchas especies; las más tolerantes podrían expandir su distribución y las más susceptibles pudieran llegar a desaparecer (Warren et al., 2018). En general, se espera que el cambio climático provoque que el mundo sea menos idóneo para la producción de banano (Ramírez et al., 2011). Para Ecuador, se pronostica un aumento medio de la temperatura de 3.3 °C para finales de siglo (Skully y Elbehri, 2015). Este aumento de la temperatura por encima de los valores actuales representará una grave amenaza para la producción de banano comercial, ya que las temperaturas diarias pudieran superar los 34 °C, valor crítico a partir del cual este cultivo se ve afectado (Skully y Elbehri, 2015). Esta subida de las temperaturas y el estrés ocasionado por la sequía pueden aumentar la susceptibilidad del banano a la enfermedad de Panamá (Pereira y Gasparotto, 2008).

En este sentido, parámetros climáticos como la temperatura y las precipitaciones juegan un papel importante en el desarrollo de asociaciones entre cultivos y enfermedades (Lonsdale y Gibbs, 1996). Sin embargo, los estudios sobre la implicación del cambio climático en la distribución futura de enfermedades de plantas continúan siendo restringidos, aun cuando la alteración del clima podría cambiar la distribución geográfica del huésped y el patógeno, y los



cambios podrían ser diferentes para diferentes sistemas de patógenos (Coakley et al., 1999). Además, las alteraciones en la temperatura y la precipitación pueden causar reubicación de cultivos (ya que las áreas actuales de plantaciones pueden perder las características que las hacen idóneas y se necesiten desplazar a otros espacios) y de enfermedades de las plantas, puesto que muchas tienen una fuerte relación de dependencia patógeno-cultivo (Chakraborty et al., 2000; Ferrer-Sánchez et al., 2022). A la par, se puede dar una disminución significativa del rendimiento de las cosechas, debido al impacto directo de las enfermedades o por estrés hídrico y térmico (Skully y Elbehri, 2015).

Las plantaciones comerciales que actualmente se localizan en zonas donde las condiciones del clima mantienen inactivos a algunos patógenos, podrían verse afectadas con el cambio climático (Shabani y Kumar, 2013). Las nuevas condiciones ambientales propiciarían una activación de estos patógenos, que se convertirán en un problema serio (Shabani y Kumar, 2013). Por lo tanto, si se investiga el efecto del cambio climático en la distribución futura de enfermedades, se tendría la oportunidad de conocer las áreas más propensas a su impacto y se minimizarían los efectos indeseables a través de medidas de prevención. Además, si se pueden reconocer las áreas no aptas para los patógenos, se pueden establecer nuevos espacios para cultivos, con menor probabilidad de ser infectados. De ahí que modelar la distribución futura de *F. oxysporum* f. *cubense* puede ser útil para tomar decisiones preventivas con respecto a las ubicaciones adecuadas para la producción económica de diferentes cultivos comerciales y las industrias asociadas.

Bajo este contexto, el análisis de la distribución de *F. oxysporum* f. *cubense* en los cultivos de Ecuador limitaría las pérdidas económicas futuras si se tuviese visualizado en cuáles zonas existen mayores probabilidades de aparición del patógeno, debido a la adecuación climática para su desarrollo. En este sentido, los modelos de distribución potencial bajo diferentes escenarios de cambio climático son herramientas útiles para la evaluación de impactos, iniciativas de adaptación y mitigación. Estos escenarios se proyectan en el tiempo, para predecir las áreas en las que se podrían encontrar las especies en el futuro (Martínez-Quintero, et al., 2017).

Desde esta perspectiva, la investigación y el conocimiento de la variabilidad climática y los procesos de cambio climático son importantes desafíos para la planificación local y el desarrollo sostenible en Ecuador. También es un desafío generar datos e información con un alto grado de rigor científico, que permitiría comprender los cambios en la distribución de las especies afectadas por el cambio climático y de esta manera predecir y analizar la posible evolución de estos cambios, identificando las respectivas vías de solución (Cadilhac et al., 2017).

En Ecuador, el impacto negativo del cambio climático sobre la relación cultivo-plaga ya se ha hecho presente (p. ej., el tizón tardío (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary) que afecta a la papa (*Solanum tuberosum* L.), o la sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis* M. Morelet) que afecta a las musáceas) y se considera uno de los factores que causa mayores pérdidas en la producción agrícola, así como afectaciones desde el punto de vista social, ecológico y económico (Herrador-Valencia y Paredes, 2016; García Regalado et al., 2019; Perea Rosales, 2020). Por ello, es importante realizar investigaciones que puedan aportar información acertada sobre la ampliación potencial que tendrían las distribuciones geográficas de determinados patógenos, en relación con los escenarios climáticos proyectados. Por esta razón, el objetivo de este estudio fue evaluar los cambios en la distribución geográfica potencial de *F. oxysporum* f. *cubense* en Ecuador continental ante escenarios de cambio climático moderados y severos para 2050 y 2070.

Materiales y Métodos

Compilación de registros de presencia

Se obtuvieron 549 registros de presencia del patógeno *F. oxysporum* f. *cubense* con el paquete NTBOX (Osorio-Olvera et al., 2020) en la plataforma R version 4.3.1 (R Core Team, 2023). Esta herramienta permite extraer información de la base de datos Global Biodiversity Information Facility (GBIF, 2023). Además, se obtuvieron registros de la literatura científica (Fernández, 2011). El conjunto inicial de registros de presencia se depuró para reducir posibles sesgos en la calibración de los modelos de nicho ecológico (Syfert et al., 2013). Estos datos fueron filtrados en pasos secuenciales para mejorar la calidad y así excluir aquellos que fueran



erróneos o muy cercanos. En el primer paso, se descartaron todos los registros con referencias geográficas desconocidas, con coordenadas incompletas, ubicaciones en el océano, desajustes entre metadatos y coordenadas o registros duplicados. En un segundo paso se filtraron los datos por distancia, de modo que se omitieron todos los registros redundantes que se encontraban en una sola celda de 1 km, que es la resolución espacial más fina para las variables de clima disponibles en Worldclim v. 2.1 (Fick y Hijmans, 2017). Con este paso se reduce el sobreajuste y se aumenta el rendimiento del modelo (Boria et al., 2014).

Este procedimiento de filtrado de los datos reduce los problemas asociados con la agrupación artificial de registros de presencia, que está relacionada con sesgos en el muestreo y en los reportes de las especies (Alkishe et al., 2017). Sin embargo, se debe ser cuidadoso en este sentido, ya que al eliminar muchos registros en los sitios donde hay una alta concentración de estos puede subestimar la contribución de áreas adecuadas, donde la alta densidad o los registros reflejan el verdadero valor ecológico de la especie (Fourcade et al., 2014). Con esta secuencia de pasos, la base de registros quedó con 412 puntos de presencia de *F. oxysporum* f. *cubense*, distribuidos a nivel mundial, para representar la mayor variabilidad climática en la que este aparece. Sin embargo, luego de analizar la correspondencia temporal de los registros de presencia y las capas de Worldclim v. 2.1, la base se redujo a 77 registros de presencia.

Variables climáticas

Se descargaron las 19 variables bioclimáticas disponibles en WorldClim v. 2.1, con una resolución de 30 arc-segundos ($\sim 1 \text{ km}^2$) (Fick y Hijmans, 2017). WorldClim tiene una cobertura temporal de 1970-2000 para el clima histórico (la cual se asume como la actual). De estas, se excluyeron cuatro variables: temperatura promedio del trimestre más húmedo (bio8), temperatura promedio del trimestre más seco (bio9), precipitación en el trimestre más caliente (bio18) y precipitación en el trimestre más frío (bio19), ya que se consideran artificios espaciales y han sido eliminadas en otros trabajos con protocolos similares (Alkishe et al., 2017; Datta et al., 2020). Recientemente, se ha comprobado que hay discontinuidades relacionadas con cambios repentinos en los períodos trimestrales utilizados para el cálculo de es-

tas variables, las cuales se dan principalmente en regiones ecuatoriales, donde solo hay pequeños cambios de temperatura a lo largo del año (Booth, 2022). Además, bio8, bio9, bio18 y bio19 son variables que no tienen relación desde el punto de vista ecológico con la especie en estudio.

Entre las variables restantes, se usaron cuatro criterios para definir cuáles podían ser las más adecuadas para la obtención del modelo de *F. oxysporum* f. *cubense*. El primer criterio se basó en la búsqueda de aspectos de la ecología de *F. oxysporum* f. *cubense* en función de variables climáticas (variables elegidas: Bio1, Bio3, Bio5, Bio7). Para el segundo criterio, se hizo una revisión de literatura sobre estudios previos de modelación de la distribución de *Fusarium*, para así tener en cuenta cuáles variables habían sido las más importantes en esos trabajos (variables elegidas: Bio1, Bio2, Bio12, Bio13, Bio16). Como tercer criterio, se hizo un análisis de correlación de Spearman y se seleccionaron las variables menos correlacionadas ($r < 0.7$; variables elegidas: Bio1, Bio2, Bio3, Bio4, Bio5, Bio6, Bio12, Bio14, Bio15). El cuarto criterio consistió en la realización de un análisis de componentes principales, a través del cual se seleccionaron las variables con mayor relevancia en los componentes ($\text{peso} > 0.8$, variables elegidas: Bio1, Bio3, Bio5, Bio6, Bio13).

Las variables que menos contribuían se eliminaron secuencialmente. Finalmente, las cuatro variables que se seleccionaron como las más adecuadas para la modelación fueron aquellas que se repetían entre los cuatro métodos utilizados (Bio1: Temperatura media anual, Bio5: Temperatura máxima del mes más cálido, Bio12: Precipitación anual y Bio13: Precipitación del mes más lluvioso). La información climática se extrajo de cada punto de presencia de la especie con el uso del sistema de información geográfica ArcGIS v. 10.4.1 (ESRI, 2015).

Análisis de datos

Para la modelación del nicho se usaron los 77 registros de presencia y las cuatro variables bioclimáticas seleccionadas. Para obtener el modelo se utilizó el algoritmo de Máxima Entropía MaxEnt v. 3.4.1 (Phillips et al., 2017). Se usaron las asociaciones entre los puntos de presencia de *F. oxysporum* f. *cubense* y las variables climáticas para construir el nicho ecológico. Para calibrar el modelo se definió el área accesible



ble adecuada (M), área a la que la especie probablemente tuvo acceso a través de la dispersión (Barve et al., 2011). Con esta delimitación del área de calibración del modelo se mejora su rendimiento (Anderson y Raza, 2010), al minimizar los impactos de los supuestos sobre la ausencia de especies en áreas que no son accesibles para las mismas. Se consideró que el área accesible (M en el marco del diagrama BAM; Soberón y Peterson, 2005) incluye los países donde existieron puntos de presencia de *F. oxysporum* f. *cubense*. De esta manera se obtuvo la zona accesible o de movilidad, con una amplia representación de la variabilidad ambiental en la que aparece la especie, para proyectar el modelo a Ecuador continental.

Para calibrar el modelo de *F. oxysporum* f. *cubense* se realizó una validación cruzada mediante la asignación aleatoria (sin reemplazo) de datos de ubicación. Se empleó 85% de los datos de presencia para calibrar el modelo y 15% para validar internamente. La función *jackknife* que realiza MaxEnt a los datos de calibración, permitió obtener valores que se compararon para determinar la significación de las variables climáticas en el modelo. Se usó el partialROC (Peterson et al., 2011) para probar la robustez de los modelos a través de NicheToolBox (Osorio-Olvera et al., 2020). Se consideraron como parámetros tanto una tasa de omisión de 5%, como un porcentaje de puntos aleatorios de 50% y 500 iteraciones de *Bootstrap* (Peterson et al., 2007).

Para conocer el potencial invasivo actual y futuro de *F. oxysporum* f. *cubense* en Ecuador continental, se obtuvieron capas de datos para el modelo de circulación general GISS-E2-R (NASA-GISS-NASA Goddard Institute for Space Studies, EUA), el cual ha sido identificado en estudios previos como uno de los cuatro laboratorios que mejor simulan el clima de Ecuador en el futuro (Armenta et al., 2016). El modelo se proyectó a escenarios climáticos futuros, uno cercano con su centro en 2050 (2041-2060) y otro lejano centrado en 2070 (2061-2080). Se trabajó bajo tres escenarios de concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, uno de mitigación (SSP-126), uno cauteloso (SSP-245) y otro extremo (SSP-585). Se eligieron estas proyecciones climáticas para alinearlas con el marco de las Naciones Unidas y los desafíos mundiales en la agricultura (Lipper et al., 2014). Este modelo se proyectó al espacio geográfico, para generar un mapa que representa la distri-

bución de las condiciones favorables para la especie, o su distribución potencial.

Para identificar las ganancias, pérdidas o la estabilidad en la distribución geográfica potencial del patógeno entre el presente y los escenarios de cambio climático, se transformaron los mapas continuos de adecuación a mapas binarios de presencia-ausencia, utilizando como umbral de corte el 10 percentile training presence de los datos de calibración. Se utilizó este percentil para evitar problemas con el sobreajuste de los modelos (Liu et al., 2013). Con los mapas binarios se realizaron comparaciones entre la distribución actual y futura para identificar expansiones, estabilidad o contracción en la distribución geográfica potencial de la especie. Para esto se empleó el complemento *Distribution Changes Between Binary SDM* de la caja de herramientas SDMToolBox v. 2.4 en ArcGIS v. 10.5 (ESRI, 2016). A partir de este análisis, se obtuvo la extensión del área en km² para cada escenario y se visualizó el rango de expansión, contracción o si las condiciones favorables para *F. oxysporum* f. *cubense* no presentan cambios hacia el futuro.

Resultados

El modelo tuvo un alto rendimiento para los datos de entrenamiento y de validación, con un valor de AUC de 0.85 y 0.77, respectivamente. Para el ROC parcial se obtuvo un valor promedio de 1.24. Estos valores indican que el modelo tuvo un buen rendimiento según las variables utilizadas y que predice adecuadamente las zonas con condiciones ambientales similares a los sitios con registros de presencia de la especie.

La temperatura media anual tuvo el mayor aporte al modelo (39.8%). La temperatura máxima del mes más cálido también tuvo un aporte elevado (31.2%), al igual que la precipitación anual (16.9%). Según la representación de la variación en la favorabilidad ambiental para *F. oxysporum* f. *cubense* en el espacio ambiental, en función de estas variables se identificó una alta tolerancia de la especie a un amplio rango de temperaturas medias anuales (Fig. 1), alcanzando los valores más altos de favorabilidad ambiental a los 25 °C. La dispersión de los datos fue alta, fundamentalmente para las variables de temperatura; sin embargo, en el caso de la precipitación anual, se observó un rango estrecho de valores alrededor de los 1000 mm para los cu-



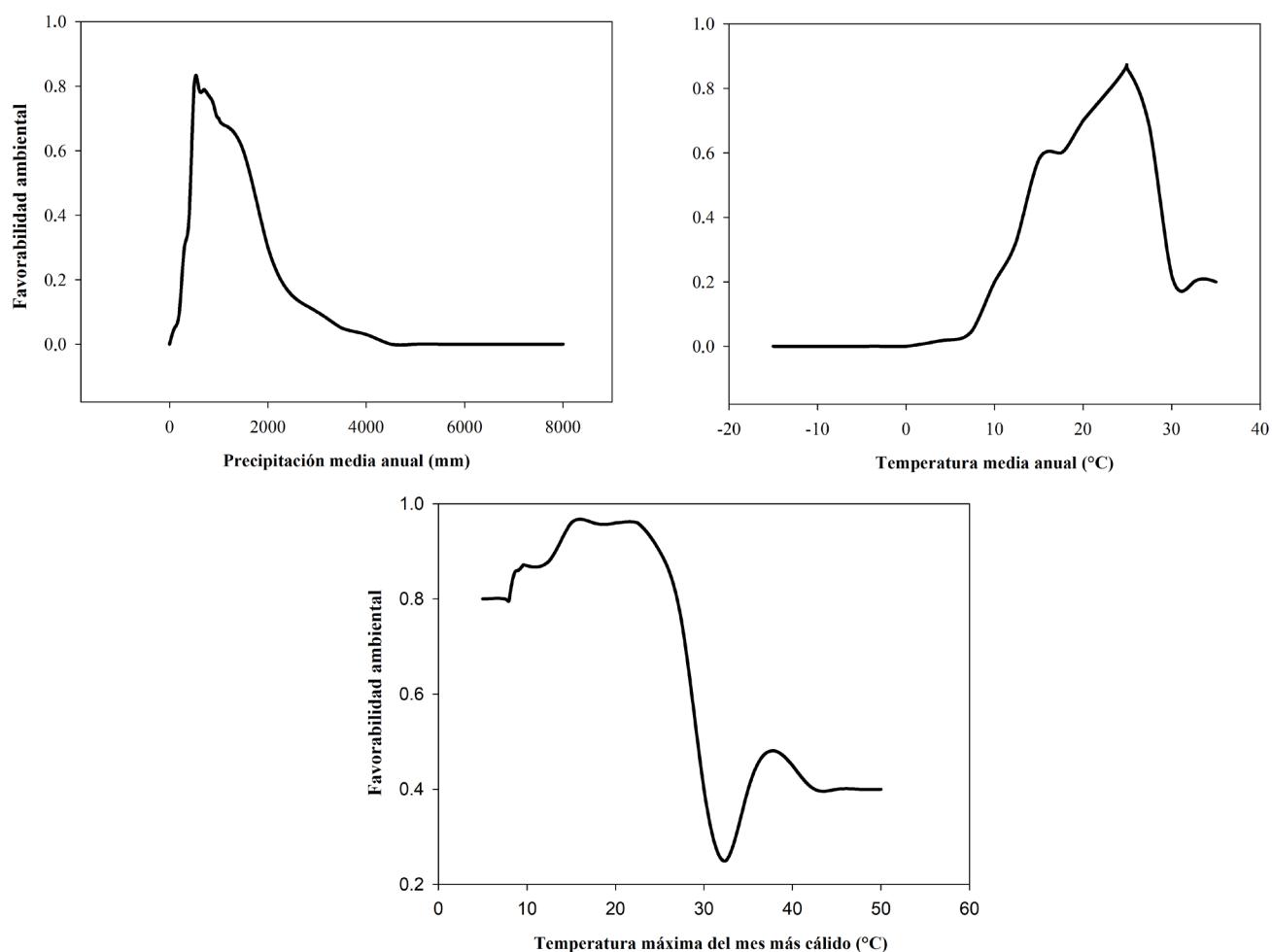


Figura 1: Respuesta de la favorabilidad ambiental para *Fusarium oxysporum* f. *cubense* (E.F. Sm.) W.C Snyder & H.N. Hansen en función de las variaciones en la precipitación media anual, la temperatura media anual y la temperatura máxima del mes más cálido, variables de mayor aporte al modelo de nicho ecológico generado con MaxEnt.

les la favorabilidad fue óptima; por encima o por debajo de este valor la favorabilidad ambiental es baja para la especie (*Fig. 1*). La influencia de la temperatura máxima del mes más cálido tuvo un intervalo entre los 15 y 25 °C, en el cual se produjeron los valores más altos de favorabilidad ambiental (*Fig. 1*).

Para el escenario actual, la favorabilidad para la presencia de *F. oxysporum* f. *cubense* en la región Sierra, al oeste de la región Costa, en los límites con la región Amazónica y hacia el sur del país fue alta, mientras que para la zona central y oriental de la región Amazónica se encontraron valores más bajos de adecuación ambiental (*Fig. 2*). Más de 50% de las plantaciones de banano coinciden con zonas de una favorabilidad climática intermedia; sin embargo, las plantaciones ubicadas hacia el sur del país coinciden con

zonas de una favorabilidad >0.5 (*Fig. 2*). Para 2050 y 2070, las mayores variaciones de la favorabilidad se observaron en la región Costa (*Fig. 2*) en los tres escenarios (SSP-126, SSP-245, SSP-585), y se mantuvo alta la favorabilidad del ambiente para la especie en la región Sierra, al oeste de la región Costa y Amazónica, y muy baja para la zona norte y centro de la región Amazónica (*Fig. 2*). Para ambos años del escenario SSP-126, se observa un aumento en el área de alta favorabilidad en la región Costa, destacándose el aumento en 2050 (*Fig. 2*).

El modelo mostró un área de ~146,270 km² con condiciones climáticas favorables para el desarrollo de *F. oxysporum* f. *cubense* en la actualidad, con mayor adecuación en la Sierra (65,701 km²) y la Costa (48,292 km²) (*Figs. 3, 4*). En todas las áreas de presencia de FOC, tanto para el



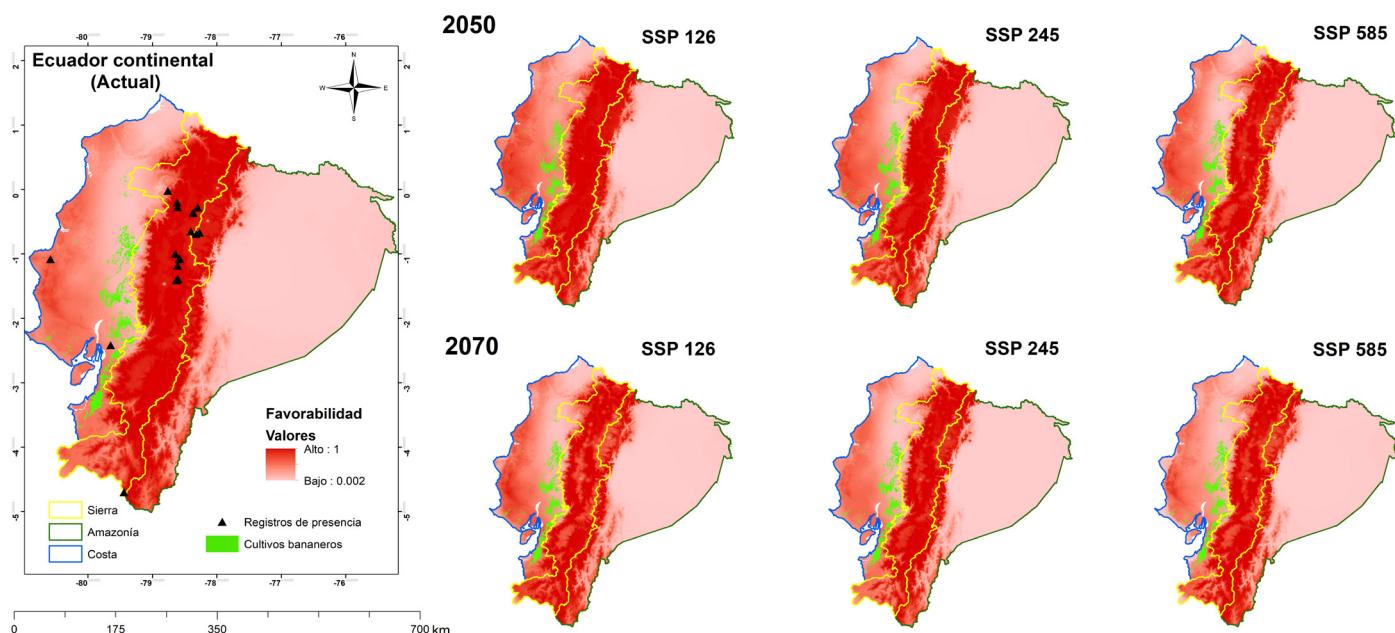


Figura 2: Mapas de favorabilidad ambiental para el patógeno *Fusarium oxysporum* f. *cubense* (E.F. Sm.) W.C Snyder & H.N. Hansen, en el presente y futuro en Ecuador continental. Años 2050 y 2070 en escenario de mitigación (SSP 126), escenario moderado (SSP 245) y otro extremo (SSP 585).

presente como para los diferentes escenarios, la temperatura media anual se mantuvo dentro de los valores óptimos para la especie ($23\text{--}26^{\circ}\text{C}$), aunque, en gran parte del área de ausencia también se registraron estos valores (Fig. 3). Para el año 2050, bajo un escenario de mitigación SSP-126, se encontró un área de $\sim 164,820 \text{ km}^2$ con condiciones climáticas favorables, fundamentalmente hacia la región Sierra (41.5%), seguida de la región Costa (39.2 %), lo que representa 81% de la extensión con condiciones favorables para el desarrollo de FOC en dicho escenario del 2050, y supera en $18,550 \text{ km}^2$ la extensión de las condiciones actuales (Figs. 3, 4). Ese incremento fue el mayor para todos los escenarios y años y se observó fundamentalmente en la Costa, la cual ganó $16,253 \text{ km}^2$ respecto a la actualidad (Fig. 3). A su vez, este incremento ocupa $>95\%$ de la extensión de zonas cultivadas con banano, en un área con temperatura media anual favorable para el fitopatógeno de $23\text{--}26^{\circ}\text{C}$ (Fig. 3). Para el escenario cauteloso SSP-245 en este mismo año, el área con condiciones favorables fue menor respecto al SSP-126 ($145,513 \text{ km}^2$), encontrándose nuevamente mayor favorabilidad para la presencia de FOC en la región Sierra (45%) y Costa (35.2%) (Fig. 3), que representa 79.5%

de la distribución actual. En el escenario extremo SSP-585, se encontró un área de $\sim 149,499 \text{ km}^2$ bastante similar a la actualidad (Fig. 3). Para este caso, la Sierra ecuatoriana (44%) y la Costa (34%) fueron, de igual forma, las regiones que ofrecerían mayor extensión geográfica con condiciones climáticas favorables (Figs. 3, 4).

Para el 2070 no hubo grandes variaciones en los resultados respecto al 2050 y a la actualidad (Figs. 3, 4). Sin embargo, se observó una tendencia a la disminución de condiciones favorables, aunque de manera general las regiones Costa y Sierra siguen teniendo una mayor favorabilidad para la presencia de FOC (Figs. 3, 4). En el escenario SSP-126, el área con condiciones climáticas adecuadas para este patógeno fue de $149,442 \text{ km}^2$, 10% menor al área registrada en este mismo escenario para el 2050 (Figs. 3, 4), pero superior por 3172 km^2 a la distribución potencial actual (Fig. 4). Bajo el escenario cauteloso, se encontró un área de $140,911 \text{ km}^2$ con condiciones climáticas favorables, ligeramente menor al mismo escenario en 2050 y al SSP-126 del 2070 (Figs. 3, 4). Contrario a lo esperado, para el escenario extremo se visualiza una tendencia a la disminución, ya que el área de presencia potencial del fitopatógeno



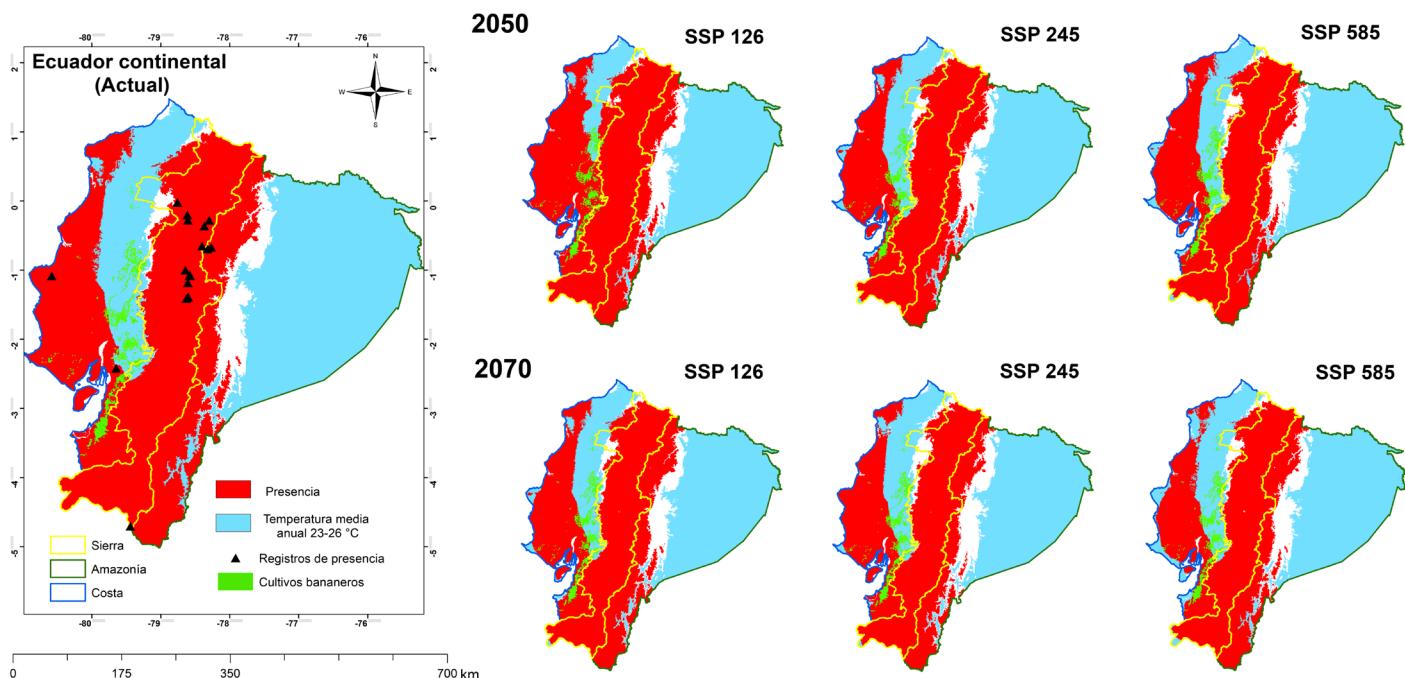


Figura 3: Distribución espacial de las áreas de presencia de *Fusarium oxysporum* f. *cubense* (E.F. Sm.) W.C Snyder & H.N. Hansen (mapa binario) en las diferentes regiones de Ecuador continental para el presente y en escenarios de cambio climático (de mitigación SSP 126, moderado SSP 245 y extremo SSP 585) para los años 2050 y 2070.

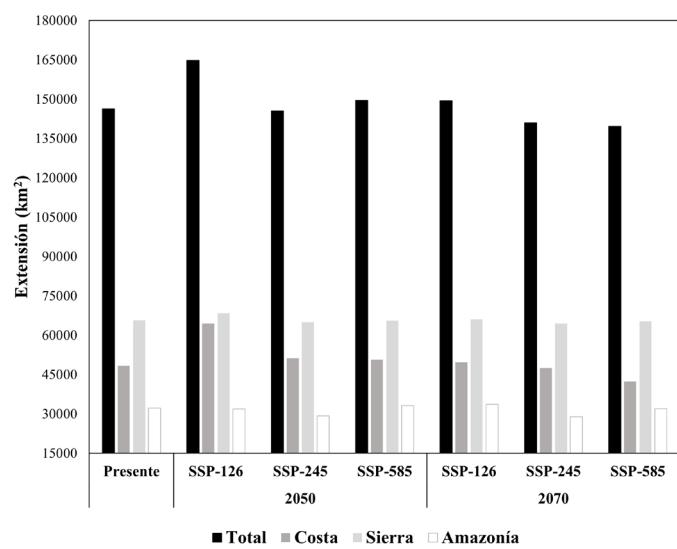


Figura 4: Posibles variaciones en la extensión (km^2) de la distribución geográfica potencial de *Fusarium oxysporum* f. *cubense* (E.F. Sm.) W.C Snyder & H.N. Hansen, en Ecuador continental, para los años 2050 y 2070 bajo diferentes escenarios de cambio climático.

es inferior a la actualidad con $139,660 \text{ km}^2$ (Figs. 3, 4). Este es el valor más bajo para todos los escenarios analizados (Figs. 3, 4) y representa el 95.5% de la extensión potencial

actual de FOC. Además, para este escenario extremo, la región Amazónica contiene 23% de la extensión del área ocupada por FOC, lo cual es superior respecto a la misma región en el resto de los escenarios (Figs. 3, 4).

Los posibles cambios a futuro en la distribución geográfica potencial de *F. oxysporum* f. *cubense*, bajo los diferentes escenarios proyectados, fueron alarmantes en el 2050, fundamentalmente en el escenario SSP-126 (Fig. 5). En dicho escenario, la expansión duplica y triplica a las expansiones visualizadas en el SSP-245 y 585 del 2050, respectivamente (Fig. 5). De forma más acentuada, la expansión en SSP-126 del 2050 sería 3.4 veces mayor respecto al mismo escenario en 2070 (Fig. 5), así como 9.6 y 11.6 veces mayor respecto al SSP-245 y 585 de 2070, respectivamente (Fig. 5). La tendencia a la expansión se visualiza hacia la región noroccidental del país y abarca las principales provincias productoras de banano en Ecuador (El Oro, Guayas y Los Ríos), así como las regiones que actualmente tienen producción bananera (Fig. 5).

Entre las provincias bananeras, Los Ríos sería potencialmente la más afectada en 2050 (SSP-126), según las proyecciones de expansión que cubren toda su extensión



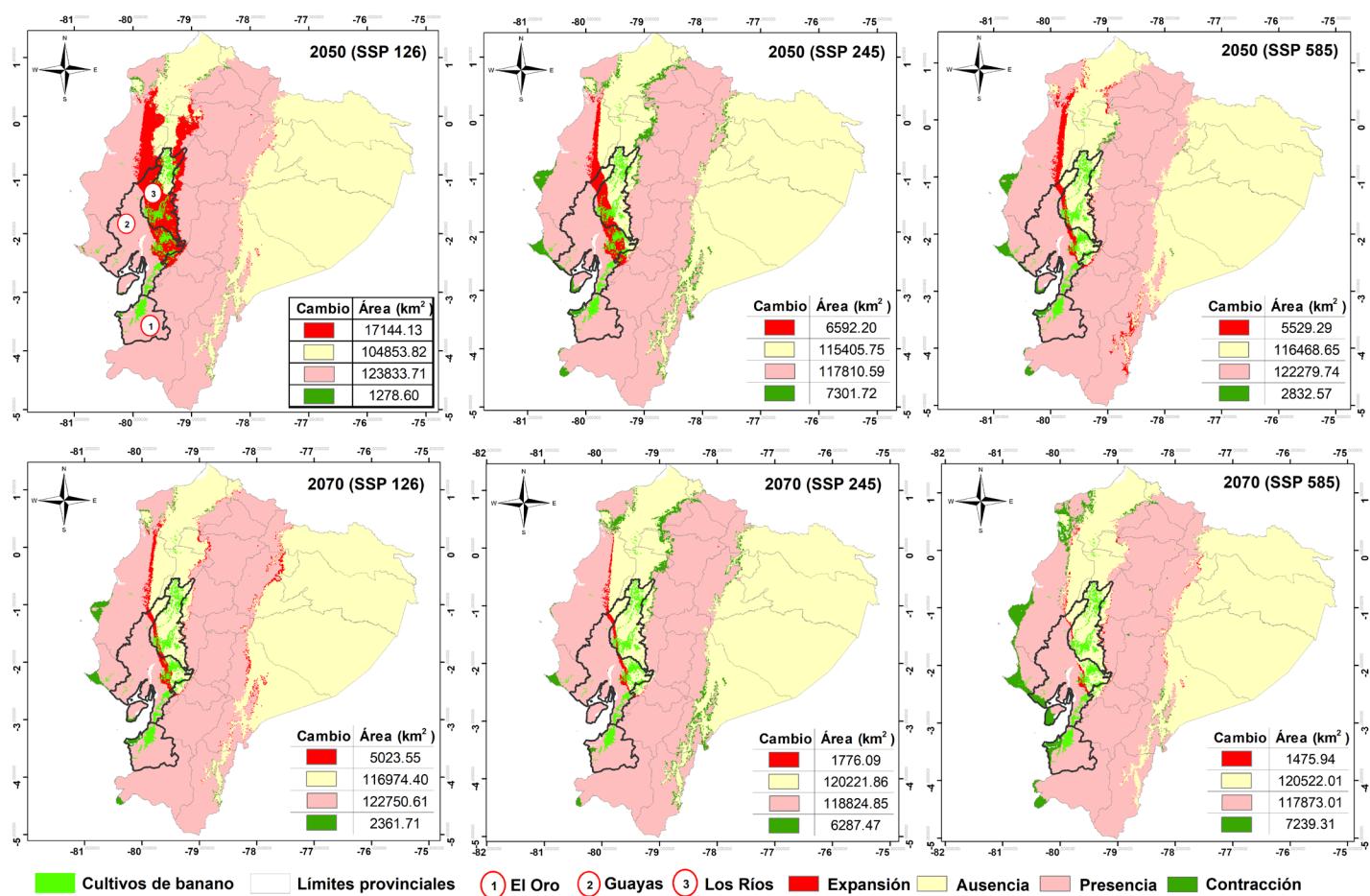


Figura 5: Regiones de expansión y contracción de la distribución geográfica potencial de *Fusarium oxysporum* f. *cubense* (E.F. Sm.) W.C Snyder & H.N. Hansen, en Ecuador continental para el futuro (2050 y 2070), bajo escenarios de mitigación (SSP 126), moderado (SSP 245) y extremo (SSP 585).

provincial (Fig. 5). En el 2070 se visualizan más contracciones que expansiones hacia el escenario conservador (SSP-126) y el extremo (SSP-585) (Fig. 5). La tendencia a la contracción de la distribución potencial de FOC en 2070 estaría concentrada hacia la zona costera del país (de norte a sur) fundamentalmente, y las estribaciones orientales de la región Sierra, transición entre Sierra y Amazonía, y noroccidentales en la transición Costa-Sierra (Fig. 5).

La distribución de FOC se expandirá en ~14,731 km² en la Costa y ~2413 km² en la Sierra bajo un escenario de mitigación de gases de efecto invernadero (SSP-126) en 2050. Además, se contraerá en ~6050 km² hacia la zona costera, ~650 km² en la Sierra y ~540 km² hacia las estribaciones orientales de la transición entre Sierra y Amazonía para el escenario extremo del 2070 (Fig. 5). A futuro, para todos los escenarios analizados, se observa gran estabilidad en cuan-

to a la extensión del área de distribución potencial del patógeno que se mantiene sin cambios (Fig. 5). En general, las expansiones no alcanzan valores elevados en el escenario más crítico y extremo SSP- 585 para 2070 (~1476 km²), contrario a lo observado en el escenario de mitigación SSP-126 del 2050 (~17,144 km²). En este último, la Costa sería la más afectada por un posible proceso de invasión del patógeno según la favorabilidad ambiental, que constituiría un gran cambio y afectación a nivel nacional (Fig. 5), y que resulta superior a la distribución potencial actual.

Discusión

La producción bananera forma parte de un sector que es crucial para la economía de Ecuador, ya que es fuente importante de empleo que influye en la balanza comercial del país (Elbehri et al., 2015). Sin embargo, fitopatógenos como



F. oxysporum f. *cubense* ponen en riesgo sus plantaciones y la economía de muchas familias ecuatorianas. Los mapas obtenidos predicen a futuro un incremento significativo de las áreas adecuadas para el desarrollo de *F. oxysporum* f. *cubense* en el periodo cercano del 2050, y coinciden en la ocupación de regiones que son clave para el desarrollo de este cultivo agrícola.

En Ecuador, la mayoría de los productores de banano se concentran en las provincias El Oro, Guayas y Los Ríos, las cuales abarcan 41%, 34% y 16% de los productores, respectivamente (MCE, 2017). El Oro concentra la mayor parte de los pequeños productores de banano del país (aproximadamente 42%), mientras que en las provincias Guayas y Los Ríos están principalmente los grandes productores (MCE, 2017). Todas estas provincias se localizan en la región Costa, para la cual los modelos predicen condiciones adecuadas para el desarrollo del fitopatógeno, lo cual resulta alarmante, particularmente en el escenario SSP 126 del 2050 y 2070. Además, debe tenerse en cuenta que las distribuciones de los patógenos pueden cambiar rápidamente en respuesta a muchos factores, incluido el cambio climático (Shaw y Osborne, 2011).

De manera general, para el año 2050, en los tres escenarios analizados existen condiciones climáticas favorables para que potencialmente este fitopatógeno se continúe desarrollando. En el 2017, el Instituto Nacional de Estadística y Censos en el Ecuador expuso que la superficie nacional bananera presentaba un decrecimiento de 9.98%, y la superficie cosechada también había tenido un decrecimiento del 12.35% en comparación a los datos del 2016 (INEC, 2017). En la mayoría de los casos, estas pérdidas son ocasionadas por plagas que afectan a los cultivos bananeros y *F. oxysporum* f. *cubense* es una de las principales. Dadas las predicciones de los modelos obtenidos, esta situación presenciada en 2017 puede exacerbarse hacia 2050, por la influencia de la expansión potencial de *F. oxysporum* f. *cubense*.

Para el año 2070 se prevé una mejoría en este sentido y las condiciones propicias para el desarrollo de este fitopatógeno disminuyen, pero bajo el escenario extremo donde el incremento de la temperatura y la variación en los patrones de precipitación es mayor. La situación más preocupante se aprecia en el escenario SSP 126, ya que se

espera que este fitopatógeno comience a ganar terreno en regiones de la provincia Los Ríos, una de las mayores productoras de banano, donde hasta la actualidad no se presentan condiciones adecuadas para su desarrollo. De no tomarse las medidas necesarias en este momento, la industria bananera podría sufrir grandes estragos a futuro, ya que las áreas donde actualmente se establecen los cultivos seguirán siendo vulnerables y las que se pudieran perfilar como áreas de cultivo alternativas también se verían afectadas.

Dado que en la actualidad no existe alguna estrategia efectiva para contrarrestar la agresión de este hongo, la clave para combatirlo es la prevención. Las herramientas para predecir cambios basados en correlaciones ambientales dependen de buenos datos primarios, que a menudo están ausentes, y deben compararse con el registro histórico, que sigue siendo muy deficiente para casi todos los patógenos (Shaw y Osborne, 2011). Los productores deben evitar, en la medida de lo posible, que se creen condiciones favorables para que este fitopatógeno se desarrolle y se extienda por las plantaciones.

Se ha descrito que *F. oxysporum* f. *cubense* se desarrolla óptimamente en un rango de temperaturas de 23 a 29 °C (Pérez-Vicente y Porras, 2015). Desafortunadamente, este rango de temperatura es el que se presenta en muchas áreas de las regiones Costa, Sierra y Amazonía, razón por la cual son tan propensas a la invasión de este fitopatógeno. Además, durante eventos extremos de lluvia que provocan inundaciones, la enfermedad se distribuye rápidamente entre plantas y campos enfermos y sanos, de manera que aumenta su poder de dispersión (Pérez-Vicente, 2004). Con patógenos tan peligrosos como los del género *Fusarium* se debe ser muy cuidadoso, ya que algunas especies han sido catalogadas como las enfermedades más severas de diferentes cultivos con mayor distribución geográfica. Además, están presentes en la mayoría de los países cultivadores, y pueden llegar a devastar plantaciones completas si existen condiciones favorables para el desarrollo de la enfermedad (Fernández, 2011).

Como la temperatura es uno de los factores ambientales que repercute en la presencia de *F. oxysporum*, una de las medidas que se toma para su control es manipular los sitios donde se establecen plantaciones. En cultivos de clavel



(*Dianthus caryophyllus* L.) por ejemplo, una de las medidas de control para combatir a *Fusarium oxysporum* f. *dianthi* (Prill. & Delacr.) W.C. Snyder & H.N. Hansen, es colocar una película de plástico transparente sobre el suelo húmedo durante días cálidos y soleados, para de esta forma generar temperaturas en la capa superior que pueden llegar a superar los 50 °C y que se transmiten a profundidades de hasta 30 cm, pudiendo así eliminar el potencial nocivo del hongo (Acurio Váscone, 2010). Sin embargo, tomar medidas como estas resulta muy complejo en plantaciones como las de banano, debido a la extensión de estas. Por ello, la prevención sigue siendo importante y evitar las áreas más sensibles al ataque del fitopatógeno puede ser unas de las mejores opciones. Además, es de vital importancia divulgar y hacer llegar a productores y tomadores de decisiones los resultados de investigaciones como la que se presenta, como una forma de contribuir a mejorar sus sistemas de producción y la economía del país. Los mapas actuales de distribución de *F. oxysporum* f. *cubense* les pueden servir a los productores para tomar medidas preventivas en aquellos sitios con mayor probabilidad de ocurrencia de FOC. Mientras que, los mapas que muestran la favorabilidad para la presencia de FOC a futuro, les brindan la oportunidad a los productores de poder decidir en qué áreas tienen mayor probabilidad de establecer nuevas plantaciones de banano que corran un menor riesgo de ser infectadas por *F. oxysporum* f. *cubense*.

Se debe seguir trabajando en generar información sobre la incidencia del cambio climático en los cultivos que se han visto afectados por *F. oxysporum*, para comprender mejor y poder pronosticar las modificaciones que se presentan en los sistemas agrícolas y su entorno. Además, hay que tener muy presente que las distribuciones geográficas de los patógenos son el resultado de procesos dinámicos que implican la disponibilidad, la susceptibilidad y la abundancia del huésped, así como la idoneidad de las condiciones climáticas de los sitios donde estos se desarrollan (Shaw y Osborne, 2011). Es importante que Ecuador cuente con una base de datos sobre la distribución actual de *F. oxysporum* f. *cubense*, ya que es la única forma de tener una idea más clara acerca del avance del patógeno en las zonas más vulnerables del país y poder predecir futuras afectaciones a los cultivos. Además, se debe fomentar el trabajo conjunto entre ministerios y otras organizaciones nacionales, a fin de que se logren

acuerdos para el diseño e implementación de estrategias de prevención, para evitar la distribución futura del mal de Panamá por todas las regiones de Ecuador.

Contribución de autores

YFS, DGBM, AHPV, FAP concibieron, diseñaron el estudio, recolectaron los datos. YFS administró tanto el proyecto, en el que se basó este manuscrito, como los recursos. YFS, DGBM procesaron y editaron los datos. YFS, DGBM, AHPV, FAP redactaron el documento. YFS, AHPV, FAP revisaron la versión final del manuscrito.

Financiamiento

Este trabajo recibió apoyo de la 8va convocatoria del Fondo Competitivo de Investigación Científica y Tecnológica (FOCICYT), de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, a través del proyecto: “Relación entre los escenarios de cambio climático y la distribución geográfica potencial de *Fusarium oxysporum* en Ecuador”.

Agradecimientos

A los revisores anónimos y el editor asociado por su contribución en la mejora del documento.

Literatura citada

- Acurio Váscone, R. D. 2010. Técnicas de prevención y control de *Fusarium oxysporum* f. *dianthi* en clavel *Dianthus caryophyllus* y su incidencia en la productividad. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería Agronómica, Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador. 98 pp.
- AGROCALIDAD. 2013. Plan Nacional de Contingencia para *Fusarium oxysporum* f. *cubense* (Foc R4T). Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, Agencia Ecuatoriana de Aseguramiento de la Calidad del Agro. Quito, Ecuador. 104 pp.
- Alkishe, A. A., A. T. Peterson y A. M. Samy. 2017. Climate change influences on the potential geographic distribution of the disease vector tick *Ixodes ricinus*. PLOS ONE 12(12): e0189092. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189092>
- Anderson, R. P. y A. Raza. 2010. The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of niche evolution: preliminary



- tests with montane rodents (genus *Nephelomys*) in Venezuela. *Journal of Biogeography* 37(7): 1378-1393. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02290.x>
- Arias, P., C. Dankers, P. Liu y P. Pilkauskas. 2004. La economía mundial del banano 1985-2002. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. <https://www.fao.org/3/y5102s/y5102s00.htm#Contents> (consultado junio de 2023).
- Armenta, G. E., J. L. Villa Cedeño y P. S. Jácome. 2016. Proyecciones climáticas de precipitación y temperatura para Ecuador, bajo distintos escenarios de cambio climático. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Quito, Ecuador. 122 pp. <https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/ECU/14%20Proyecciones%20de%20Clima%20Futuro%20para%20Ecuador%20en%20base%20a%20IPCC-AR5.pdf> (consultado junio de 2023).
- Barve, N., V. Barve, A. Jiménez-Valverde, A. Lira-Noriega, S. P. Maher, A. T. Peterson, J. Soberón y F. Villalobos. 2011. The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling* 222(11): 1810-1819. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.011>
- Booth, T. H. 2022. Checking bioclimatic variables that combine temperature and precipitation data before their use in species distribution models. *Austral Ecology* 47: 1506-1514. DOI: <https://doi.org/10.1111/aec.13234>
- Boria, R. A., L. E. Olson, S. M. Goodman y R. Anderson. 2014. Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models. *Ecological Modelling* 275: 73-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.12.012>
- Cadilhac, L., R. Torres, J. Calles, V. Vanacker y E. Calderón. 2017. Desafíos para la investigación sobre el cambio climático en Ecuador. *Neotropical Biodiversity* 3(1): 168-181. DOI: <https://doi.org/10.1080/23766808.2017.1328247>
- Chakraborty, S., A. V. Tiedemann y P. S. Teng. 2000. Climate change: potential impact on plant diseases. *Environmental Pollution* 108(3): 317-326. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00210-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00210-9)
- Coakley, S. M., H. Scherm y S. Chakraborty. 1999. Climate change and plant disease management. *Annual Review of Phytopathology* 37: 399-426. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.37.1.399>
- Cook, D. C., A. S. Taylor, R. A. Meldrum y A. Drenth. 2015. Potential economic impact of Panama disease (tropical race 4) on the Australian Banana Industry. *Journal of Plant Diseases and Protection* 122(5-6): 229-237. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03356557>
- Datta, A., O. Schweiger e I. Kühn. 2020. Origin of climatic data can determine the transferability of species distribution models. *NeoBiota* 59: 61-76. DOI: <https://doi.org/10.3897/neobiota.59.36299>
- Dita, M., M. Barquero, D. Heck, E. S. Mizubuti y C. P. Staver. 2018. *Fusarium* wilt of banana: current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management. *Frontiers in Plant Science* 9: 1468. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01468>
- Elbehri, A. 2015. Análisis económico y de políticas del sector del banano en el Ecuador y consecuencias para la sostenibilidad social y ambiental. In: Elbehri, A., G. Calberto, C. Staver, A. Hospido, L. Roibas, D. Skully, P. Siles, J. Arguello, I. Sotomayor y A. Bustamante (eds.). Cambio climático y sostenibilidad del banano en el Ecuador: Evaluación de impacto y directrices de política. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma, Italia. Pp. 17-53.
- Elbehri, A., G. Calberto, C. Staver, A. Hospido, L. Roibas, D. Skully, P. Siles, J. Arguello, I. Sotomayor y A. Bustamante. 2015. Cambio climático y sostenibilidad del banano en el Ecuador: Evaluación de impacto y directrices de política. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma, Italia. 179 pp. <https://www.fao.org/3/i5116s/i5116s.pdf> (consultado marzo de 2022).
- ESRI. 2015. ArcGIS Desktop: Release ver. 10.1. Environmental Systems Research Institute. Redlands, USA.
- ESRI. 2016. ArcGIS Desktop: Release ver.10.5. Environmental Systems Research Institute. Redlands, USA.
- Fernández, D. J. 2011. Estudio de la interacción de *Fusarium* spp. con cultivares de garbanzo (*Cicer arietinum* L.) asociados a la Fusariosis Vascular mediante técnicas biotecnológicas. Tesis de doctorado. Universidad de Córdoba. Córdoba, España. 248 pp.
- Ferrer-Sánchez, Y., A. A. Mafaldo-Sajami, A. H. Plasencia-Vázquez y J. P. Urdánigo-Zambrano. 2022. Riesgo para el cultivo de cacao por los cambios en la distribución potencial del fitopatógeno *Moniliophthora perniciosa* bajo escenarios de cambio climático en Ecuador continental. *Terra*



- Latinoamericana 40: e1338. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1338>
- Fick, S. E. y R. J. Hijmans. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology 37(12): 4302-4315. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fourcade, Y., J. O. Engler, D. Rödder y J. Secondi. 2014. Mapping species distributions with MAXENT using a geographically biased sample of presence data: a performance assessment of methods for correcting sampling bias. PLOS ONE 9(5): e97122. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097122>
- Fu, L., Y. Ruan, C. Tao, R. Li y Q. Shen. 2016. Continous application of bioorganic fertilizer induced resilient culturable bacteria community associated with banana *Fusarium* wilt suppression. Scientific Reports 6: 27731. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep27731>
- García-Bastidas, F. A., J. C. Quintero-Vargas, M. Ayala-Vasquez, T. Schermer, M. F. Seidl, M. Santos-Paiva, A. M. Noguera, C. Aguilera-Galvez, A. Wittenberg, R. Hofstede, A. Sørensen y G. H. J. Kema. 2019. First report of *Fusarium* wilt Tropical Race 4 in Cavendish bananas caused by *Fusarium odoratissimum* in Colombia. Plant Disease 104(3): 994-994. DOI: <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-19-1922-PDN>
- García Regalado, J., A. Marcillo Plaza y C. Palacios Sánchez. 2019. Amenazas de las manchas foliares de Sigatoka (*Mycosphaerella* spp.) en la producción sostenible de banano en el Ecuador. Revista Verde 14(5): 591-596. DOI: <https://doi.org/10.18378/rvads.v14i5.6623>
- GBIF. 2023. Bases de datos geográficos disponibles para *Fusarium oxysporum* f. *cubense* en Ecuador. Global Biodiversity Information Facility. <http://www.gbif.org> (consultado junio de 2016).
- Herrador-Valencia, D. y M. Paredes. 2016. Cambio climático y agricultura de pequeña escala en los Andes ecuatorianos: un estudio sobre percepciones locales y estrategias de adaptación. Journal of Latin American Geography 15(2): 101-121.
- INEC. 2017. Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Quito, Ecuador. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/> (consultado diciembre de 2022).
- Lipper, L., P. Thornton, B. Campbell, T. Baedeker, A. Braimoh, M. Bwalya, P. Caron, A. Cattaneo, D. Garrity, K. Henry, R. Hottle, L. Jackson, A. Jarvis, F. Kossam, W. Mann, N. McCarthy, A. Meybeck, H. Neufeldt., T. Remington, P. Thi Sen, R. Sessa, R. Shula, A. Tibu y E. Torquebiau. 2014. Climate-smart agriculture for food security. Nature Climate Change 4(12): 1068-1072. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate2437>
- Liu, C., M. White y G. Newell. 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>
- Lonsdale, D. y J. Gibbs. 1996. Effects of climate change on fungal diseases of trees. In: Frankland, J. C., N. Magan y G. M. Gadd (eds.). *Fungi and Environmental Change*. Cambridge University Press. Cambridge, UK. Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511753190.002>
- Macaroff, A. y S. Herrera (coord.). 2022. Estado del banano en Ecuador: acumulación, desigualdad y derechos laborales. Instituto de Estudios Ecuatorianos - ASTAC. Quito, Ecuador. 157 pp. <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/quito/19562-20220927.pdf> (consultado junio de 2023).
- Martínez-Quintero, B. G., A. Echeverri-Rubio y F. G. Gaviria-Ortiz. 2017. Distribución potencial de *Oxysternon conspicillatum* (Weber, 1801) en diferentes escenarios de cambio climático en Colombia. Boletín Científico. Centro de Museos 21(2): 190-206. DOI: <https://doi.org/10.17151/bccm.2017.21.2.13>
- Maryani, N., L. Lombard, Y. S. Poerba, S. Subandiyah, P. W. Crous y G. H. J. Kema. 2019. Phylogeny and genetic diversity of the banana *Fusarium* wilt pathogen *Fusarium oxysporum* f. *cubense* in the Indonesian centre of origin. Studies in Mycology 92(1): 155-194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simyco.2018.06.003>
- MCE. 2017. Informe sector bananero ecuatoriano. Ministerio de Comercio Exterior. Quito, Ecuador. 49 pp. <https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2019/06/Informe-sector-bananero-esp%C3%B3ol-04dic17.pdf> (consultado julio de 2023).
- Osorio-Olvera, L., A. Lira-Noriega, J. Soberón, A. T. Peterson, M. Falconi, R. G. Contreras-Díaz, E. Martínez-Meyer, V. Barve y N. Barve. 2020. NTBOX: an R package with graphical user interface for modeling and evaluating multidimensional



- ecological niches. *Methods in Ecology and Evolution* 11(10): 1199-1206. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13452>
- Perea Rosales, J. S. 2020. Evaluación del comportamiento del cambio climático en el sector bananero y su influencia en la economía del cantón Machala. Tesis de Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Agraria del Ecuador. Guayaquil, Ecuador. 81 pp.
- Pereira, J. C. R. y I. Gasparotto. 2008. BRS conquista: nova cultivar de bananeira para o agronegócio da banana no Brasil. Comunicado Técnico 60: 1-2.
- Pérez-Vicente, L. 2004. *Fusarium* wilt (Panama disease) of bananas: an updating review of the current knowledge on the disease and its causal agent. In: Orozco Santos, M., J. Orozco- Romero, J. Velázquez-Monreal, V. Medina-Urrutia y J. A. Hernández (eds.). *Memorias de la XVI Reunión Internacional Acorbat 2004*. Oaxaca, México. Pp. 1-16.
- Pérez-Vicente, L. y A. Porras. 2015. Impacto potencial del cambio climático sobre las plagas de bananos y plátanos en Cuba. *Fitosanidad* 19(3): 201-211.
- Peterson, A. T., M. Papeş y M. Eaton. 2007. Transferability and model evaluation in ecological niche modeling: a comparison of GARP and Maxent. *Ecography* 30(4): 550-60. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2007.05102.x>
- Peterson, A. T., J. Soberón, R. G. Pearson, R. P. Anderson, E. Martínez-Meyer, M. Nakamura y M. B. Araújo. 2011. *Ecological Niches and Geographic Distributions* (MPB-49). Princeton University Press. New Jersey, USA. 328 pp.
- Phillips, S. J., R. P. Anderson, M. Dudík, R. E. Schapire y M. E. Blair. 2017. Opening the black box: an open-source release of Maxent. *Ecography* 40(7): 887-893. DOI: <https://doi.org/10.1111/ecog.03049>
- Ploetz, R. C. 2006. *Fusarium* wilt of banana is caused by several pathogens referred to as *Fusarium oxysporum* f. *cubense*. *Phytopathology* 96(6): 653-656. DOI: <https://doi.org/10.1094/phyto-96-0653>
- Ploetz, R. C. 2015a. *Fusarium* wilt of banana. *Phytopathology* 105(12): 1512-1521. DOI: <https://doi.org/10.1094/PHYTO-04-15-0101-RVW>
- Ploetz, R. C. 2015b. Management of *Fusarium* wilt of banana: A review with special reference to tropical race 4. *Crop Protection* 73: 7-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.01.007>
- R Core Team. 2023. R: A language and environment for statistical computing, Version 4.3.1. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ramirez, J., A. Jarvis, I. Van den Bergh, C. Stave y D. Turner. 2011. *Changing climates: Effects on growing conditions for banana and plantain (*Musa* spp.) and possible responses*. In: Yadav, S., B. Redden, J. L. Hattfield y H. Lotze-Campen (eds.). *Crop adaptation to climate change*. Wiley-Blackwell. Chichester, UK. Pp. 426-438.
- Salas Torres, V. A. 2015. Determinación del antagonismo in vitro de *Bacillus* spp. aislado del suelo de los cultivos de banano de la región costa del Ecuador frente al hongo fitopatógeno *Fusarium oxysporum* f. *cubense* raza tropical 1. Tesis de licenciatura. Escuela de Bioanálisis, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador. 62 pp.
- Sánchez-Espinosa, A. C., J. L. Villarruel-Ordaz y L. D. Maldonado-Bonilla. 2020. The cause and potential solution to the *Fusarium* wilt disease in banana plants. *Terra Latinoamericana* 38(2): 435-442. DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.617>
- Shabani, F. y L. Kumar. 2013. Risk levels of invasive *Fusarium oxysporum* f. in areas suitable for date palm (*Phoenix dactylifera*) cultivation under various climate change projections. *PLOS ONE* 8(12): e83404. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083404>
- Shaw, M. W. y T. M. Osborne. 2011. Geographic distribution of plant pathogens in response to climate change. *Journal Plant Pathology* 60(1): 31-43. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.2010.02407.x>
- Skully, D. y A. Elbehri. 2015. El cambio climático y sus efectos en el sector del banano en el Ecuador. In: Elbehri, A., G. Calberto, C. Staver, A. Hospido, L. Roibas, D. Skully, P. Siles, J. Arguello, I. Sotomayor y A. Bustamante (eds.). *Cambio climático y sostenibilidad del banano en el Ecuador: Evaluación de impacto y directrices de política*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma, Italia. Pp. 55-70.
- Soberón, J. y A. T. Peterson. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2: 1-10. DOI: <https://doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Syfert, M. M., M. J. Smith y D. A. Coomes. 2013. The effects of sampling bias and model complexity on the predictive



performance of MaxEnt species distribution models. PLOS One 8(2): e55158. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055158>

Warren, R., J. Price, E. Graham, N. Forstenhaeusler y J. VanDerWal. 2018. The projected effect on insects, vertebrates, and

plants of limiting global warming to 1.5°C rather than 2°C. Science 360(6390): 791-795. DOI: <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.aar3646>

