

Modelación Predictiva de la Distribución Potencial de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) en Ecuador Bajo Condiciones Climáticas Cambiantes: Una Base para las Estrategias de Gestión

Predictive Modelling of the Potential Distribution of *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) in Ecuador Under Changing Climatic Conditions: A Basis for Management Strategies

Yarelys Ferrer-Sánchez¹ , Jazmín Margarita García-Figueroa² ,
Génesis Jumiley Zambrano-Salazar³ , Danna Belén Castillo-Quijije³ ,
Adriana Lisseth Gracia-Chica³  y Alexis Herminio Plasencia-Vázquez^{4†} 

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Facultad de Ciencias Pecuarias y Biológicas; (Y.F.S.). ² Facultad de Posgrado; (J.M.G.F.). ³ Facultad de Ciencias de la Ingeniería; (G.J.Z.S.), (D.B.C.Q.), (A.L.G.C.). Av. Quito, km 1.5 vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador.

⁴ Universidad Autónoma de Campeche, Centro de Investigaciones Históricas y Sociales. Avenida Agustín Melgar S/N, Colonia Buenavista. 24039 San Francisco de Campeche, Campeche, México; (A.H.P.V.).

† Autor para correspondencia: ahplasen@uacam.mx

RESUMEN

Entre las plagas agrícolas de mayor relevancia, *Spodoptera frugiperda* sobresale por el impacto económico significativo que genera. En Ecuador, esta especie representa una amenaza persistente y se requiere reforzar las estrategias de seguimiento y gestión dentro de su área de distribución. En este estudio se evaluaron los cambios en la distribución geográfica potencial de *S. frugiperda* a través de los modelos de nicho ecológico, teniendo en cuenta las alteraciones asociadas al cambio climático. A partir de 211 registros de presencia en Ecuador continental, se desarrolló un modelo de distribución de especies basado en idoneidad climática para caracterizar la distribución actual y potencial de la especie en dos escenarios climáticos futuros. El nicho óptimo se define por precipitaciones del mes más seco entre 0-20 mm, rangos térmicos anuales de 10.5-13 °C, y altitudes < 500 m de altitud. Las precipitaciones excesivas están asociadas con áreas de baja favorabilidad. Aproximadamente 78 151 km² de territorio contienen condiciones climáticas favorables para *S. frugiperda*. La Costa alberga el 62.5% del área favorable en las provincias Los Ríos, Guayas, Manabí, Santa Elena y El Oro. La Sierra contiene el 36.5% del área favorable y la Amazonía es la menos vulnerable por sus precipitaciones excesivas. Las proyecciones bajo el escenario conservador indican una relativa estabilidad. En contraste, el escenario extremo proyecta una expansión progresiva hasta 89 482 km² para el 2100. El cambio alarmante será en la región Amazónica, que experimentaría una potencial expansión pasando de 527 km² actuales a 9680 km² en 2100. Esta dinámica compleja de redistribución espacial implica que algunas áreas que actualmente son focos de infestación se volverán menos favorables, mientras que regiones históricamente libres de la plaga se convertirán en zonas de alto riesgo. Este cambio requiere una reconfiguración fundamental de las estrategias de monitoreo y control. Esta información permitirá un diagnóstico consolidado y la aplicación de medidas de gestión eficaces.

Palabras clave: calentamiento global, gestión fitosanitaria, gusano cogollero del maíz, nicho ecológico, plaga.

SUMMARY

Among the most significant agricultural pests, *Spodoptera frugiperda* stands out for the significant economic impact it causes. In Ecuador, this species represents a persistent threat, and monitoring and management strategies within its distribution area need to be strengthened. This study evaluated changes in the potential



Cita recomendada:

Ferrer-Sánchez, Y., García-Figueroa, J. M., Zambrano-Salazar, G. J., Castillo-Quijije, D. B., Gracia-Chica, A. L., & Plasencia-Vázquez, A. H. (2026). Modelación Predictiva de la Distribución Potencial de *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) en Ecuador Bajo Condiciones Climáticas Cambiantes: Una Base para las Estrategias de Gestión. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-26. e2498. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2498>

Recibido: 17 de diciembre de 2025.
Aceptado: 24 de marzo de 2026.
Artículo. Volumen 44.
Junio de 2026.

Editor de Sección:
Dr. Fernando Abasolo Pacheco



Copyright: © 2026 by the authors.
Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

geographic distribution of *S. frugiperda* using ecological niche models, considering alterations associated with climate change. Based on 211 records of presence in mainland Ecuador a species distribution model based on climatic suitability was developed to characterize the current and potential distribution of the species in two future climate scenarios. The optimal niche is defined by rainfall in the driest month between 0-20 mm, annual temperature ranges of 10.5-13 °C, and elevations < 500 m of altitude. Excessive rainfall is associated with areas of low favorability. Approximately 78 151 km² of territory contain favorable climatic conditions for *S. frugiperda*. The coast is home to 62.5% of the favorable area in the provinces of Los Ríos, Guayas, Manabí, Santa Elena, and El Oro. The highlands contain 36.5% of the favorable area, and the Amazon is the least vulnerable due to its excessive rainfall. Projections under the conservative scenario indicate relative stability. In contrast, the extreme scenario projects a progressive expansion to 89 482 km² by 2100. The alarming change will be in the Amazon region, which would experience a potential expansion from the current 527 km² to 9680 km² in 2100. This complex dynamic of spatial redistribution implies that some areas that are currently hotspots for infestation will become less favorable, while regions historically free of the pest will become high-risk areas. This change requires a fundamental reconfiguration of monitoring and control strategies. This information will enable a consolidated diagnosis and the implementation of effective management measures.

Index words: *global warming, phytosanitary management, fall armyworm, ecological niche, pest.*

INTRODUCCIÓN

Spodoptera frugiperda (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), comúnmente conocido como el gusano cogollero del maíz, es una plaga agrícola de gran impacto, originaria de los trópicos americanos, incluidas las regiones del Caribe y el Pacífico. Su rápido ciclo de vida, su alta fecundidad y su naturaleza polífaga (se alimenta de más de 300 especies de plantas) contribuyen a su amplia distribución (Montezano *et al.*, 2018). Desde 2016, *S. frugiperda* ha sido reportada como una plaga invasiva en África y Asia, propagándose rápidamente debido al comercio internacional (Wang *et al.*, 2020). A finales de 2018, invadió China, donde posteriormente fue incluida en la lista de nuevas plagas invasoras (Jiang *et al.* 2022). Las consecuencias económicas a largo plazo de esta invasión están influenciadas por varios factores, entre ellos el clima, la geografía, las prácticas agrícolas y los vientos estacionales (Nagoshi *et al.*, 2019).

En países sudamericanos como Ecuador, la agricultura enfrenta importantes desafíos debido a la expansión de esta plaga, principalmente por el agresivo ataque del gusano cogollero del maíz a los cultivos de este cereal. Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos, el maíz seco duro, el arroz con cáscara y la papa son los cultivos de producción más importantes a nivel nacional. El maíz es uno de los cultivos de mayor importancia económica, fundamental para la soberanía alimentaria, la alimentación animal y el desarrollo agroindustrial (Monteros, 2014). En la región central de Ecuador, la provincia Los Ríos representa el 46.02% de la producción nacional de maíz, Guayas el 14.13% y Manabí el 29.82% (INEC, 2021). Sin una gestión adecuada, las infestaciones de *S. frugiperda* pueden reducir los rendimientos hasta en un 100%, lo que provoca graves pérdidas económicas (INIAP, 2016).

La diversidad geográfica y climática de Ecuador, junto con fenómenos como El Niño y La Niña, agravan la vulnerabilidad de sus agroecosistemas al cambio climático (Cáceres y Nuñez, 2011) y a los ataques de plagas. Esta mayor vulnerabilidad subraya la urgente necesidad de contar con herramientas predictivas para anticiparse y responder con resiliencia a los efectos simultáneos del cambio climático y de plagas como *S. frugiperda* (FAO, 2012). Para abordar esta situación, es esencial determinar la distribución geográfica potencial de esta plaga en las condiciones climáticas actuales y proyectarla en el futuro, contribuyendo a la propuesta de estrategias preventivas que disminuyan así las pérdidas agrícolas y salvaguarden la seguridad alimentaria.

Los avances en las tecnologías de simulación climática y su integración con los datos meteorológicos han consolidado los modelos de distribución de especies (SDM) como herramientas cruciales para predecir la propagación de plagas en futuros escenarios climáticos. Los modelos de nicho ecológico permiten establecer relaciones estadísticas entre la distribución de las especies y las variables ambientales que influyen en su

presencia. Al combinar múltiples enfoques de modelación, es posible identificar las zonas con condiciones favorables para la supervivencia y expansión de una especie. Los estudios realizados en zonas de invasión de África y Asia han demostrado que la calibración de los modelos de nicho ecológico para *S. frugiperda* permite predecir eficazmente su área de distribución e identificar los factores climáticos dominantes que influyen en este (Wang *et al.*, 2020; Zacarias, 2020; Abasolo-Pacheco, Carranza, Ferrer y Plasencia, 2026). Por ejemplo, el algoritmo Maxent (Entropía Máxima) ha demostrado una precisión suficiente para predecir las zonas de distribución ideales para esta especie en el oeste de China, lo que facilita el desarrollo de estrategias preventivas para limitar su expansión y reducir las pérdidas económicas (Li *et al.*, 2022). Otras investigaciones recientes han proyectado las posibles zonas de distribución de *S. frugiperda* en diversas regiones, entre ellas China, África y a escala mundial. La temperatura, un factor ambiental primario que influye en la dinámica de las poblaciones de insectos, podría facilitar la expansión geográfica de esta especie debido al calentamiento global. Jiang *et al.* (2022) enfatizan además que las fluctuaciones térmicas son determinantes para la supervivencia, el desarrollo y la reproducción de esta plaga. La información generada a partir de estos modelos puede conducir al desarrollo de estrategias de gestión más eficaces y mejor orientadas, lo que podría reducir la dependencia del uso de insecticidas (Adan, Tonnang, Greve, Borgemeister y Goergen, 2025).

Este estudio evalúa los cambios en la distribución geográfica potencial de *S. frugiperda* en Ecuador a través de los modelos de nicho ecológico y distribución de especies, teniendo en cuenta las alteraciones climáticas asociadas al calentamiento global y al cambio climático. También tiene como objetivos específicos: (1) modelar el nicho ecológico de *S. frugiperda* en Ecuador; (2) caracterizar su distribución potencial; (3) transferir los modelos a condiciones futuras de cambio climático centradas en el año 2050, 2070 y 2100 y en dos trayectorias representativas de gases, analizando las tendencias en la variación del área de distribución geográfica; (4) así como identificar las ganancias, pérdidas o estabilidad en su distribución geográfica potencial entre los escenarios climáticos actuales y futuros. Esta investigación proporciona una base sólida de datos e información para facilitar la detección temprana de infestaciones, la contención de poblaciones y el diseño de estrategias de gestión sostenibles. Además, contribuye a futuras investigaciones sobre *S. frugiperda* al identificar los factores climáticos que influyen en la distribución, lo que sirve como punto de partida fundamental para formular medidas preventivas más eficaces.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

Este estudio se llevó a cabo en Ecuador continental, situado en el noroeste de Sudamérica (Figura 1). Ecuador es un país ecuatorial que se caracteriza por una alta diversidad de paisajes, entre los que se incluyen la selva amazónica, las tierras altas andinas y las Islas Galápagos, con alta biodiversidad. La cordillera de los Andes divide el territorio continental en tres regiones naturales: Litoral (Costa), Interandina (Sierra) y Amazonía (Oriente) (Cáceres y Nuñez, 2011).

El fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) es el patrón climático más influyente en los trópicos de la costa pacífica de América, ya que influye en los ciclos de inundaciones y sequías. Las lluvias anormalmente intensas asociadas con El Niño representan el patrón de precipitación dominante en la zona costera norte de Ecuador en escalas temporales interanuales. Las lluvias torrenciales, el aumento de la escorrentía fluvial y las inundaciones son el resultado de fuertes anomalías positivas en la temperatura de la superficie del mar a lo largo de la costa de Ecuador y de la expansión hacia el ecuador y la intensificación de la zona de convergencia intertropical sobre el Pacífico oriental.

Los Andes presentan un patrón de precipitaciones complejo, influenciado tanto por el Pacífico como por la cuenca del Amazonas (al este). En consecuencia, las zonas costeras y las laderas occidentales más bajas de los Andes ecuatorianos están influenciadas principalmente por masas de aire procedentes del Pacífico, mientras que la parte oriental del país está dominada por los vientos alisios del este, que transportan la humedad procedente del Atlántico tropical y la cuenca del Amazonas (Hastenrath, 1981). Los valles interandinos experimentan una influencia variable de las masas de aire oceánicas y continentales, con dos estaciones lluviosas distintas (febrero-mayo y octubre-noviembre). El primer período seco (junio-septiembre) es más pronunciado que el segundo, que se produce alrededor de diciembre. Como las masas de aire pierden una cantidad significativa de humedad a ambos lados de los Andes, las precipitaciones en los valles y las cuencas interandinas son escasas, oscilando normalmente entre 800 y 1500 mm al año (Vuille, Bradley y Keimig, 2000).

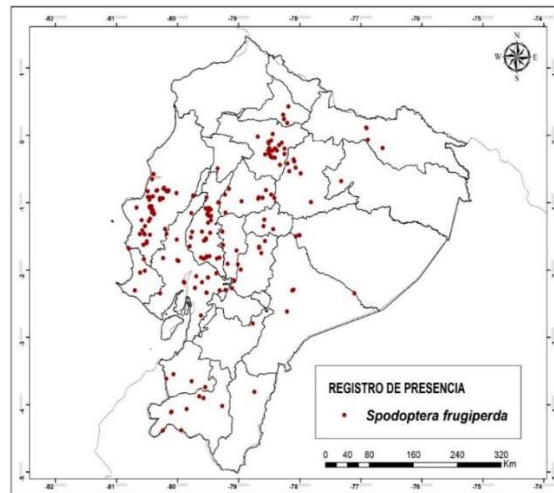


Figura 1. Registros de presencia de *Spodoptera frugiperda* en Ecuador continental, área de estudio para modelar el nicho ecológico de la especie.
Figure 1. Records of the presence of *Spodoptera frugiperda* in continental Ecuador, the study area for modelling the ecological niche of the species.

En las últimas décadas, Ecuador ha sufrido importantes pérdidas económicas debido a las sequías, estimadas en aproximadamente el 4% de su PIB, que han afectado principalmente a los sectores agrícola, ganadero e hidroeléctrico (FAO, 2012). Ecuador también se enfrenta con alta vulnerabilidad a los efectos del cambio climático (Toulkeridis *et al.*, 2020). Si bien los cantones menos vulnerables se concentran alrededor de las ciudades más grandes del país (por ejemplo, Quito y Guayaquil), aproximadamente el 20% de la población nacional reside en cantones clasificados como altamente y muy altamente vulnerables al cambio climático (Fernandez, Bucaram y Rentería, 2015). Entre los principales factores determinantes de la alta vulnerabilidad se encuentran la falta de tenencia de la tierra en las zonas agrícolas y la ausencia de programas financiados por el Gobierno para la gestión del medio ambiente y el cambio climático (Fernandez *et al.*, 2015). Las proyecciones del cambio climático para Ecuador indican variaciones en la temperatura y las precipitaciones que pueden superar el promedio mundial. La agricultura en los Andes ha mostrado una mayor sensibilidad a este cambio en los últimos años, lo que ha dado lugar a procesos como la erosión del suelo (Lozano-Povis, Alvarez y Moggiano, 2021).

Adquisición y Limpieza de Datos de Presencia

Para modelar el nicho ecológico de *S. frugiperda*, se recopilieron datos de presencia en Ecuador continental, excluyendo las Islas Galápagos (Región Insular). Los registros de presencia se obtuvieron de múltiples fuentes: (1) la base de datos del Sistema Mundial de Información sobre Biodiversidad (GBIF, 2025) por su importancia y relevancia en la dirección de los estudios sobre biodiversidad y cambio climático (Steinke *et al.*, 2025); (2) la base de datos del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP, 2025); (3) la plataforma iNaturalist (versión Ecuador) (iNaturalist, 2025); y (4) la literatura publicada y los informes científicos relacionados con *S. frugiperda* en el país (Figura 1). Se buscó literatura científica con datos de presencia utilizando plataformas como Google Scholar, repositorios de universidades ecuatorianas, el repositorio digital del INIAP, ScienceDirect y Springer Link (Figura 2). Los criterios de selección de la literatura para extraer registros de presencia incluyeron: (1) la relevancia directa del estudio para la especie; y (2) la mención explícita de la presencia de *S. frugiperda* dentro del ámbito geográfico del estudio.

El proceso de importación y limpieza de los datos de presencia de especies a menudo implica el uso de herramientas especializadas en R. El conjunto inicial de registros de presencia se sometió a un riguroso proceso de curación para mitigar posibles sesgos en la calibración de los modelos de nicho ecológico (Syfert, Smith y Coomes, 2013; Figura 2). Este filtrado espacial ayuda a abordar cuestiones relacionadas con los sesgos de muestreo espacial (Boria, Olson, Goodman y Anderson, 2014; Aiello-Lammens, Boria, Radosavljevic, Vilela y Anderson, 2015). Se excluyeron los registros que indicaban ausencias o con incertidumbre en las coordenadas

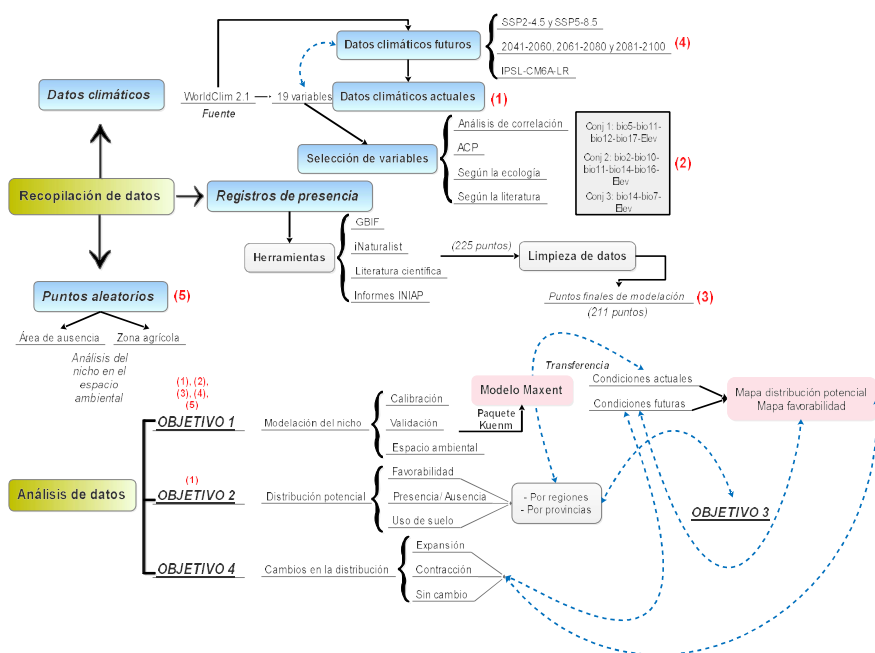


Figura 2. Estructura general del diseño metodológico de la investigación; las flechas con líneas discontinuas indican las relaciones entre los recursos y los datos utilizados para obtener la información.
Figure 2. General structure of the methodological design for the research; arrows with broken lines indicate relationships between resources and data used to obtain the information.

que superaba la resolución espacial de la cuadrícula de análisis (1 km × 1 km). Además, se utilizó el paquete *scrubr* (Chamberlain, 2020) en RStudio v2023.06.1 (RStudio Team, 2023) para eliminar las coordenadas incompletas, inexactas, imposibles o improbables. Los datos se redujeron aún más para conservar un único registro de presencia por celda de la cuadrícula climática de 1 km². De este modo se garantizó que cada celda ocupada de la cuadrícula contribuyera con una sola presencia, independientemente del número de registros brutos que contuviera. Este enfoque mitiga la influencia del sesgo de muestreo, que a menudo da lugar a una sobrerrepresentación de las localidades de fácil acceso debido a los esfuerzos desproporcionados de los estudios (Pereira *et al.*, 2020). Cualquier autocorrelación espacial restante en los datos después de este proceso se consideró un resultado natural de la dispersión de la especie y, por lo tanto, no se eliminó artificialmente (Legendre y Legendre, 2012). La cuantificación del rango de autocorrelación de la distribución de las especies en el espacio es necesaria para cuestiones ecológicas aplicadas, como la implementación de diseños de muestreo eficaces (Laroche, 2024).

Este procedimiento de filtrado espacial reduce los problemas asociados con la agrupación artificial de registros de ocurrencia, a menudo vinculados a sesgos de muestreo (Alkische, Peterson y Samy, 2017). Sin embargo, se recomienda precaución, ya que una limpieza exhaustiva en sitios con altas concentraciones de registros puede subestimar el verdadero valor ecológico de las áreas adecuadas, donde las altas densidades reflejan las condiciones óptimas para la especie (Fourcade, Engler, Rödder y Secondi, 2014). Finalmente, se conservaron 211 registros de presencia únicos para su análisis (Figura 1). Este riguroso proceso de limpieza de datos fue crucial para mitigar sesgos de muestreo inherentes a bases de datos como GBIF (Syfert *et al.*, 2013).

Variables Climáticas y Topográfica

Los datos climáticos se descargaron del sitio web oficial de WorldClim versión 2.1, con una resolución espacial de 30 segundos de arco (aproximadamente 1 km²), para el período de referencia 1970-2000 (Fick y Hijmans, 2017). Las variables bioclimáticas representan las tendencias anuales, la estacionalidad y los factores ambientales extremos relacionados con la temperatura y las precipitaciones, que son ecológicamente significativos. Las 19 variables bioclimáticas (Bio1-Bio19) se descargaron junto con los datos de altitud. Particularmente, las variables topográficas, como la altitud, no son variables climáticas en sí mismas, pero a menudo actúan como

indicadores de variaciones climáticas no medidas o con una estructura espacial, especialmente en regiones con fuertes gradientes altitudinales como Ecuador. Por lo tanto, a escala continental, el clima puede considerarse el factor dominante, mientras que a escalas más locales cobran cada vez más importancia factores como la topografía (Pearson y Dawson, 2003). Estas capas bioclimáticas y la altitud se recortaron al área de accesibilidad definida para la especie (Ecuador continental).

Los puntos de presencia de *S. frugiperda* se importaron a ArcGIS 10.5 (ESRI, 2016) para extraer los valores de las variables en cada localidad de presencia. A modo de referencia, se extrajo la misma información climática de 10 000 puntos aleatorios distribuidos por zonas de presencia potencial predichas por el modelo de distribución de especies basado en idoneidad climática, concretamente dentro de zonas agrícolas y regiones donde *S. frugiperda* está actualmente ausente. Estos puntos permitieron caracterizar el espacio ambiental potencial del país, lo que permitió identificar las condiciones ambientales dentro de las zonas agrícolas y las áreas específicamente afectadas por *S. frugiperda*.

Selección de variables. La selección de variables para la modelación del nicho ecológico se basó en un análisis exhaustivo de criterios ecológicos y estadísticos. Inicialmente, se excluyeron cuatro de las 19 variables bioclimáticas: temperatura media del trimestre más húmedo (Bio8), temperatura media del trimestre más seco (Bio9), precipitaciones del trimestre más cálido (Bio18) y precipitaciones del trimestre más frío (Bio19). Estas se eliminaron debido a su conocida asociación con artefactos espaciales (Alkishe *et al.*, 2017; Datta, Schweiger y Kühn, 2020). Además, los hallazgos recientes indican discontinuidades relacionadas con cambios abruptos en los períodos trimestrales utilizados para calcular estas variables, particularmente prevalentes en regiones ecuatoriales caracterizadas por fluctuaciones mínimas de temperatura anual (Booth, 2022).

A las 15 variables bioclimáticas restantes y la altitud, se aplicaron cinco criterios para identificar el conjunto más adecuado para modelar a *S. frugiperda*. El primer criterio consistió en seleccionar variables basadas en los requisitos ecológicos conocidos para la especie (Early, González, Murphy y Day, 2018), en particular los relacionados con factores climáticos como la temperatura, que son favorables para su desarrollo, supervivencia y reproducción (Prasad *et al.*, 2022). El segundo criterio consistió en una revisión exhaustiva de la bibliografía de estudios previos de modelación de la distribución de *S. frugiperda* para identificar las variables que se consideraban significativas de forma sistemática (p. ej.: Early *et al.*, 2018; Baloch, Fan, Haseeb y Zhang, 2020; Cokola *et al.*, 2020; Fan *et al.*, 2020; Liu, Wang, Hu y Feng, 2020; Wang *et al.*, 2020; Zacarias, 2020; Tapa-Yotto *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2022). En tercer lugar, se realizó un análisis de correlación de Spearman y se seleccionaron las variables con un coeficiente de correlación ($r \leq 0.8$) para minimizar la multicolinealidad (Dormann *et al.*, 2013). En cuarto lugar, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) y se conservaron las variables con una ponderación de componentes ≥ 0.8 . Por último, se calibró un modelo preliminar utilizando el algoritmo MaxEnt (Entropía Máxima) con las 15 variables bioclimáticas para evaluar sus porcentajes de contribución individual al modelo. Para ello se usó la configuración de parámetros por defecto.

Tras este análisis exhaustivo de selección, se recopilaron tres conjuntos distintos de variables para el modelado del nicho climático de la especie. El primer conjunto comprendió las variables identificadas con mayor frecuencia en los criterios de selección y aquellas con las contribuciones más elevadas registradas en estudios previos de modelación de *S. frugiperda*. El segundo conjunto incluyó variables seleccionadas en función de la ecología de la especie, y el tercer conjunto estuvo formado por variables menos correlacionadas según el coeficiente de Spearman (Cuadro 1).

Cuadro 1. Parámetros utilizados para calibrar los modelos candidatos con el fin de obtener el modelo de distribución de especies basado en idoneidad climática de *Spodoptera frugiperda* en el Ecuador continental. l: lineal, q: cuadrático, p: producto, t: umbral, h: bisagra.

Table 1. Parameters used to calibrate the candidate models to obtain the species distribution model based on climatic suitability of *Spodoptera frugiperda* in continental Ecuador. l: linear, q: quadratic, p: product, t: threshold, h: hinge.

Parámetros	
Multiplicadores de regularización	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 2, 3, 4, 5
Clases características	l, q, p, t, h, lq, lp, lt, lh, qp, qt, qh, pt, ph, th, lqp, lqt, lqh, lpt, lph, lth, qpt, qph, qth, pth, lqpt, lqph, lqth, lpth, qpth, lqpth
Conjuntos de variables predictivas	<p>Conjunto 1 (bio5: temperatura máxima del mes más cálido, bio11: temperatura media del trimestre más frío, bio12: precipitación anual, bio17: precipitación del trimestre más seco y altitud)</p> <p>Conjunto 2 (bio2: rango diurno medio, bio10: temperatura media del trimestre más cálido, temperatura media del trimestre más frío, bio14: precipitación del mes más seco, bio16: precipitación del trimestre más húmedo)</p> <p>Conjunto 3 (precipitación del mes más seco, bio7: rango anual de temperatura y altitud)</p>

Calibración del modelo. Para el desarrollo del modelo se empleó el algoritmo de Entropía Máxima (MaxEnt) v.3.4.1 (Phillips, Anderson y Schapire, 2006). Todos los análisis, desde la calibración final del modelo hasta la generación del archivo de salida, se realizaron utilizando el paquete kuenm (Cobos, Peterson, Barve y Osorio, 2019) dentro del entorno R. Para la calibración del modelo se definió el área accesible adecuada (M) como la región a la que la especie podría dispersarse de forma realista (Barve et al., 2011). Esta delimitación precisa del área de calibración mejora el rendimiento del modelo (Anderson y Raza, 2010) al minimizar la influencia de las suposiciones relativas a la ausencia de especies en regiones inaccesibles. El área accesible (M, dentro del marco biótico, abiótico y de movimiento BAM; Soberón y Peterson, 2005) abarcaba todo el territorio continental de Ecuador, incluyendo la cordillera de Los Andes donde hay agricultura y numerosos registros de presencia de la especie. Este enfoque garantizó que la zona accesible o de movilidad representara ampliamente la variabilidad ambiental en la que sobrevive la especie en el país, extendiéndose más allá de las zonas exclusivamente agrícolas. Durante este proceso de calibración, se evaluaron 1302 modelos candidatos en los tres conjuntos de variables. Estos modelos reflejaban todas las combinaciones de 14 ajustes del multiplicador de regularización (RM) y 31 combinaciones de clases de características (FC) (Cuadro 1). Los multiplicadores de regularización (RM) se probaron a intervalos de 0.1 (entre 0.1 y 0.9) y a intervalos de 1 (entre 1 y 5). Además, se tuvieron en cuenta las clases de características lineales (L), cuadráticas (Q), de producto (P), de umbral (T) y de bisagra (H) de MaxEnt. Para la calibración del modelo, se utilizó el 100% de los datos de presencia de *S. frugiperda* (211 puntos). De este conjunto de datos total, se seleccionó aleatoriamente (aleatorio estratificado) el 23% (48 puntos) para la validación interna y se utilizó el 77% (163 puntos) para el entrenamiento del modelo. Posteriormente, se empleó un conjunto de datos independiente de 37 registros de presencia para la validación externa del modelo, procedentes de la base del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.

La selección de modelos se basó en tres criterios: significación estadística, capacidad predictiva y complejidad. En primer lugar, los modelos se filtraron según su significación estadística. A partir de este conjunto reducido, se aplicó el criterio de tasa de omisión (Cobos et al., 2019). El rendimiento del mejor modelo candidato se evaluó en función de la significación (AUC_p ; Peterson et al., 2011), con un umbral de tasa de omisión (E) del 5%, y la complejidad del modelo (AIC_c). Los modelos significativos con tasas de omisión $\leq 5\%$ se identificaron como los mejores. De este subconjunto, se eligieron modelos finales con valores delta $AIC_c \leq 2$. La curva ROC parcial sirve como indicador directo de la significación estadística del modelo (Peterson et al., 2011).

El modelo final para *S. frugiperda* se generó utilizando el conjunto completo de registros de presencia, parametrizado según la configuración del mejor modelo candidato: multiplicador de regularización (RM): 0.9, clase de característica (FC): lineal, producto y umbral (LPT) del conjunto de variables 3 (rango de temperatura anual, precipitación del mes más seco y altitud). Este modelo arrojó un $AUC_{ratio} = 1.32$, una tasa de omisión (al 5%) = 0.042 y un $AIC_c = 4942.834$. Se ejecutaron 100 réplicas *Bootstrap* con salida logística y se proyectaron en escenarios actuales y futuros a lo largo de tres períodos definidos. Las evaluaciones finales incluyeron cálculos de $ROC_{parcial}$ y tasa de omisión (E=5%), con el uso del conjunto de datos independientes.

Manejo de Datos y Proyecciones Futuras

Los mapas de idoneidad del conjunto para los climas de referencia y futuros se convirtieron en mapas binarios de presencia-ausencia utilizando el método del umbral de corte del percentil 10 (Liu, White y Newell, 2013), extraído de la media de las réplicas. El valor del umbral de corte determinado fue 0.2874, lo que indica que los valores superiores a esta cifra se clasificaron como áreas adecuadas (1), y los valores inferiores a este umbral se consideraron áreas inadecuadas (0).

Las proyecciones de la distribución futura se basaron en tres períodos y dos escenarios del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) Trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP) (Fick y Hijmans, 2017). Se descargaron variables bioclimáticas para los períodos: 2041-2060 (2050), 2061-2080 (2070) y 2081-2100 (2100), con una resolución espacial de 30 segundos de arco. Estas proyecciones utilizaron el escenario conservador SSP2-4.5 y el extremo SSP5-8.5, derivados del Modelo de Circulación General (GCM) IPSL-CM6A-LR. Este GCM es reconocido por su sólida representación de las condiciones climáticas futuras en Ecuador (Armenta, Sofiea, Gordillo, Guerrero y Villa, 2016) y representa la última versión del modelo climático del Instituto Pierre-Simon Laplace (IPSL) (CMC, 2017). Estas proyecciones climáticas se seleccionaron para alinearse con el marco de las Naciones Unidas que aborda los desafíos globales en la agricultura (Lipper et al., 2014).

Para caracterizar las áreas adecuadas para la especie, se identificaron los tipos de uso del suelo y de ecosistemas dentro de las áreas más favorables mediante la superposición del mapa de uso del suelo y el mapa de ecosistemas nativos del Ecuador continental. Para cuantificar las ganancias, pérdidas o estabilidad en la distribución geográfica potencial de la plaga entre el escenario actual y los de cambio climático, los mapas de idoneidad continua se transformaron en mapas binarios de presencia-ausencia. Se utilizó el percentil 10 de presencia de entrenamiento de los datos de calibración como umbral de corte para mitigar los problemas relacionados con el sobreajuste del modelo (Liu, Berry, Dawson y Pearson, 2005; Liu *et al.*, 2013). Para este análisis se empleó el complemento *Distribution Changes Between Binary SDM* en la caja de herramientas SDMTToolBox v.2.4 en ArcGIS v.10.5. Este análisis arrojó la extensión del área en km² para cada escenario y proporcionó una visualización del rango de expansión, contracción o estabilidad de las condiciones favorables para *S. frugiperda* en el futuro.

Los riesgos de extrapolación asociados con las transferencias de modelos a condiciones futuras se identificaron utilizando el análisis de Superficie de Similitud Ambiental Multidimensional (MESS) en MaxEnt. El análisis MESS compara la similitud ambiental entre los períodos de calibración (presente) y proyección (futuro), indicando cuán similares son las condiciones ambientales futuras a las utilizadas para la calibración del modelo. Por lo tanto, las predicciones en las áreas destacadas por MESS como diferentes deben interpretarse con precaución. Además, se generó una imagen de la variable más diferente (MoD), que identifica la variable ambiental más alejada de su rango de calibración (Cobos *et al.*, 2019).

Los análisis de correlación de variables y de componentes principales se realizaron utilizando el complemento XLSTAT para Excel. La interpretación de los datos se basó en los valores medios y la desviación estándar de las variables obtenidas a partir de estadísticas descriptivas y ACP. Se realizaron pruebas no paramétricas, concretamente la prueba Kruskal-Wallis, para identificar diferencias del clima entre los sitios de presencia, los sitios de ausencia, los sitios de presencia potencial de *S. frugiperda* en el modelo de distribución actual y las zonas agrícolas. Del mismo modo, en los escenarios climáticos futuros SSP2-4.5 y SSP5-8.5, se realizaron comparaciones climáticas entre los sitios de presencia potencial y los sitios de ausencia con puntos aleatorios, basándose en el modelo MaxEnt. Todas las representaciones gráficas se generaron utilizando la herramienta en línea RAWGraphs 2.0 (Mauri, Elli, Caviglia, Uboldi y Azzi, 2017).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los 211 registros de presencia contenían datos bioclimáticos que podrían introducir redundancia en el análisis y en la modelación del nicho climático de *S. frugiperda*. El análisis de correlación de Spearman identificó relaciones significativas ($r \geq 0.8$) entre las variables climáticas. Debido a la alta dimensionalidad del conjunto de variables utilizadas para construir el nicho climático, el ACP capturó la mayor parte de la varianza de los datos originales en los dos primeros componentes (CP1 y CP2), que explicaron el 80% de la varianza total (Figura 3). La distribución de puntos basada en los dos primeros componentes principales indicó que el área climáticamente favorable, según los puntos de presencia real, coincide con la zona agrícola. Los registros de presencia obtenidos reflejan concordancia climática con los puntos en las áreas de actividad agrícola en Ecuador continental, lo cual se evidencia en la proximidad de sus medias (Figura 3). Por otro lado, los puntos de presencia potencial mostraron una distribución espacial más amplia. El área predicha por el modelo se superpuso con zonas marginales de baja favorabilidad (puntos aleatorios), mientras que los puntos aleatorios en áreas de ausencia se distanciaron significativamente de los demás grupos analizados. En general, se observó que las zonas agrícolas, incluidas las áreas marginales, presentaron una coincidencia climática significativa (Figura 3).

Las variables relacionadas con la temperatura son similares en su mayoría entre los sitios donde se encuentra *S. frugiperda* y los puntos aleatorios dentro de las zonas agrícolas (Anexos 1, 2 y 3), lo que confirma la preferencia de la especie por climas tropicales con abundantes plantas hospedadoras como el maíz y el arroz. Se han reportado más de 350 plantas hospedadoras para *S. frugiperda*, lo que aumenta su probabilidad de establecerse en diversas regiones agrícolas (Montezano *et al.*, 2018). Por el contrario, las zonas con temperaturas medias, máximas y mínimas más bajas representan las zonas de distribución marginal de la plaga.

De los modelos candidatos, 1190 fueron estadísticamente significativos, 19 cumplieron los criterios de tasa de omisión y dos modelos cumplieron los criterios AICc. Esta gran cantidad de modelos significativos se asocia a que *S. frugiperda* es nativa del hemisferio occidental, es decir, se encuentra en su propio espacio nativo lo que conlleva a la fácil adaptación bajo las condiciones de Ecuador (Nagoshi *et al.*, 2019). La mayoría de los climas tropicales y subtropicales del mundo son climáticamente favorables para el establecimiento de *S. frugiperda* durante todo el año. En América del Sur, todo el continente posee un clima óptimo para el asentamiento de esta especie, a excepción de la región de los Andes y Argentina (Paudel Timilsena *et al.*, 2022).

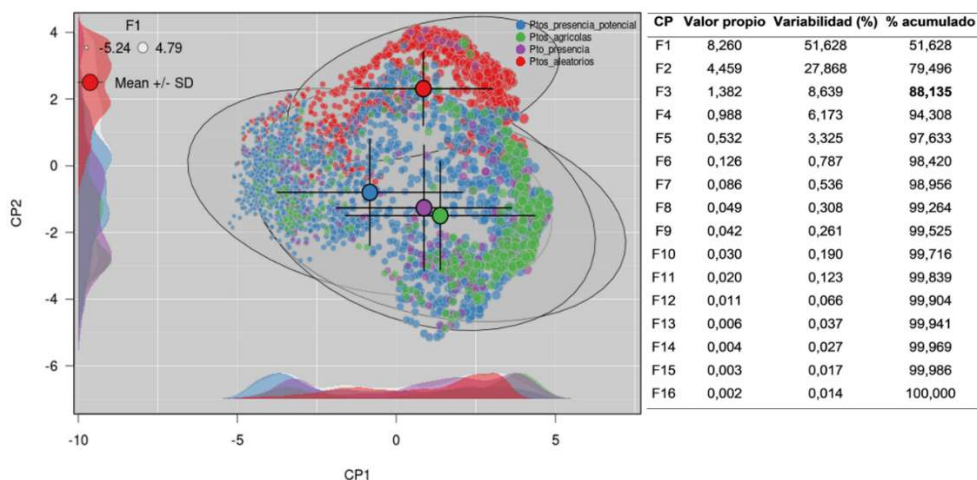


Figura 3. Análisis de componentes principales con el 80% de la varianza de datos de las variables bioclimáticas en relación con los puntos de presencia, puntos de presencia potencial predicha, puntos aleatorios en la zona agrícola y puntos aleatorios en el área de ausencia de *Spodoptera frugiperda* en Ecuador continental.
Figure 3. Principal component analysis with 80% of the variance of the data of bioclimatic variables in relation to the points of presence, points of predicted potential presence, random points in the agricultural zone and random points around absence of *Spodoptera frugiperda* in continental Ecuador.

Según las estadísticas de rendimiento de todos los modelos evaluados, el mejor candidato, con un multiplicador de regularización de 0.9, logró la mejor bondad de ajuste. Por lo tanto, satisfizo los tres criterios de selección: significación estadística, una tasa de omisión del 5% y el AICc más bajo. Este proceso de calibración permitió identificar la configuración óptima, balanceando complejidad del modelo con la capacidad predictiva, lo cual es fundamental para evitar el sobreajuste que frecuentemente afecta a los modelos de máxima entropía cuando se utilizan configuraciones por defecto (Radosavljevic y Anderson, 2014).

El modelo final para *S. frugiperda* tuvo un rendimiento sólido, con un valor medio de AUC = 0.89 ± 0.01 para el conjunto de datos independiente. Este AUC fue superior a valores reportados en estudios previos sobre esta especie en otras regiones: Wang *et al.* (2020) obtuvieron AUC = 0.85 para China, mientras que Jiang *et al.* (2022) reportaron 0.87 en su análisis global. Esto indica una alta precisión en la predicción de áreas potencialmente favorables para la distribución de la especie en Ecuador. La prueba ROC_{parcial} = 1.82 ± 0.04 confirmó la precisión predictiva del modelo, que fue significativamente diferente de un modelo aleatorio ($p < 0.00001$). Estos valores confirman en conjunto que el modelo funcionó bien dadas las variables utilizadas, prediciendo adecuadamente las áreas con condiciones ambientales similares a los registros conocidos de presencia de la especie, lo que da solidez a las relaciones identificadas entre las variables ambientales y la distribución de la especie. Este desempeño estadístico bueno (> 80%) se relaciona también con el adecuado equilibrio entre la importancia, la capacidad predictiva y la complejidad del modelo (Cobos *et al.*, 2019). Muchas veces los parámetros de configuración predeterminados de Maxent presentan sobreajuste (Jiang *et al.*, 2022), precisamente eso es lo que el paquete Kuenm trata de disminuir. Así mismo, Cokola *et al.* (2020) obtuvieron un rendimiento del modelo de distribución de *S. frugiperda* bajo las condiciones tropicales de la provincia de Kivu del Sur, República Democrática del Congo, con un valor de AUC = 0.827 ± 0.03, lo que demuestra la precisión del modelo para esta especie en este tipo de clima.

África y China son de las principales regiones que en los últimos años han sufrido las consecuencias de la invasión de *S. frugiperda*. Este problema ha llamado la atención de numerosos organismos internacionales, especialmente la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Por esta razón, existen numerosos estudios sobre la distribución de la especie en esta parte del hemisferio oriental (p. ej.: Early *et al.*, 2018; Cokola *et al.*, 2020; Fan *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2020; Tapa-Yotto *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2022; Paudel Timilsena *et al.*, 2022) que sirven de referencia para una mejor comprensión de los resultados de esta investigación en Ecuador.

Las variables que más contribuyeron al modelo fueron la precipitación del mes más seco, el intervalo de temperatura anual y la altitud en las distintas regiones. Estas variables ambientales destacan la influencia del clima y la topografía en la distribución de esta especie, proporcionando información clave para determinar su distribución óptima y mejorando la precisión y el realismo biológico del modelo. La precipitación del mes más seco (Bio14) fue la variable con mayor aporte (62.5% de contribución al modelo y 50.5% de importancia según la permutación), superando los 300 mm para maximizar la idoneidad climática (Figura 4).

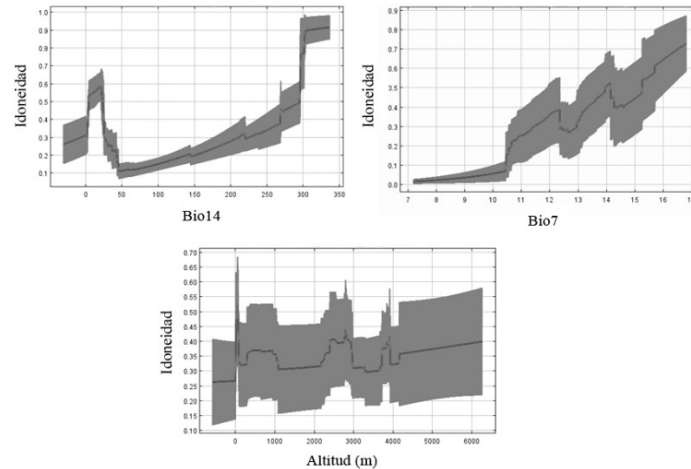


Figura 4. Curvas de respuesta de las variables ambientales incluidas en el modelo de distribución potencial de *S. frugiperda* obtenidas mediante el algoritmo MaxEnt. La figura muestra el comportamiento de la idoneidad ambiental en función de las variaciones ambientales de cada variable climática.

Figure 4. Response curves of the environmental variables included in the potential distribution model of *S. frugiperda*, obtained with the MaxEnt algorithm. The figure shows the behavior of environmental suitability with respect to the environmental variations of each climatic variable.

Le siguieron el rango anual de temperatura (Bio7) y la altitud, con contribuciones del 20.5% y 16.9%, y una importancia del 32.5% y 17.1%, respectivamente. En conjunto, estas variables climáticas fueron las más relevantes para simular el hábitat climáticamente favorable para *S. frugiperda*, y tuvieron muy bajas correlaciones ($r_{\text{spearman}} = -0.11$ bio7 vs bio14; $r_{\text{spearman}} = 0.061$ bio7 vs altitud; $r_{\text{spearman}} = 0.065$ bio14 vs altitud).

Según el análisis del nicho ecológico de *S. frugiperda* en el espacio ambiental (Figura 5), los sitios de presencia potencial mostraron precipitaciones en el mes más seco que oscilaron entre 0 y 225 mm, y un rango de temperatura anual de 8.7 °C a 15.9 °C. Los valores medios fueron de 24.09 ± 20.92 mm y 11.86 ± 1.18 °C, respectivamente. En cuanto a las precipitaciones del mes más seco, la mayor frecuencia de puntos de presencia potencial se observó entre 0 y 20 mm y para el rango de temperatura anual entre 10.5 y 13 °C.

Los sitios de presencia real de *S. frugiperda* mostraron precipitaciones de entre 0 a 306 mm y un intervalo de temperatura anual alrededor de los 10.1 °C a los 15.8 °C. El valor promedio de la precipitación del mes más seco fue de 28.57 ± 58.21 mm y de 12.17 ± 1.07 °C para el rango anual de temperatura. Sin embargo, la mayor concentración de puntos de presencia se presentó bajo precipitaciones del mes más seco de 0 a 20 mm; mientras que, de 10.5 a 12.5 °C se presentó la mayor frecuencia de puntos para la temperatura.

Los puntos de presencia fueron extraídos de zonas que presentaron altitudes entre 4 a 4163 m (933.05 ± 1223.73 m). Se observó que en altitudes bajas ~ 500 m hubo mayor concentración de datos de presencia de la especie (Figura 5). De la misma forma, los puntos de presencia potencial tuvieron la mayor frecuencia de 0 a 500 m. Los puntos aleatorios en áreas con muy baja favorabilidad para la especie mostraron precipitaciones en el mes más seco entre 16 y 289 mm (media: 145.77 ± 71.39 mm), un rango de temperatura anual de 8.2 °C a 13.5 °C (media: 10.90 ± 0.89 °C) y altitudes de 4 a 4962 m (media: 965.38 ± 1013.44 m). En cuanto a las precipitaciones en el mes más seco, la mayor frecuencia de datos se observó entre 50 y 90 mm y entre 190 y 250 mm. El rango diurno medio tuvo la mayor frecuencia de valores entre 10.5 y 11.5 °C, y la altitud de 0 a 500 m. Los puntos agrícolas presentaron una precipitación media del mes más seco de 15.72 ± 26.50 mm, un rango de temperatura anual de 11.81 ± 1.09 °C y una altitud de 809.92 ± 1132.78 m.

Estos hallazgos coinciden con estudios anteriores que indican que las lluvias excesivas y las altas temperaturas limitan el hábitat adecuado para *S. frugiperda* (Jiang *et al.*, 2022). La plaga se encuentra más comúnmente en áreas con temperaturas medias anuales entre 19 °C y 23 °C y precipitaciones anuales inferiores a 1600 mm (Cokola *et al.*, 2020). La especie también está presente en regiones con temperaturas mínimas anuales de 18-26 °C (Early *et al.*, 2018; Nagoshi *et al.*, 2019; Cokola *et al.*, 2020.).

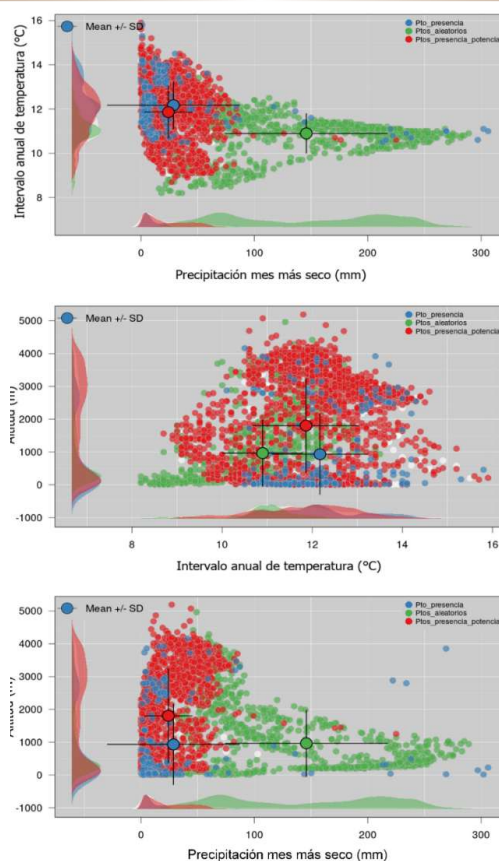


Figura 5. Relación en el espacio ambiental entre los sitios de presencia, presencia potencial y de ausencia para las variables climáticas de mayor influencia sobre *Spodoptera frugiperda* en Ecuador continental.

Figure 5. Relationship in the environmental space between the sites of presence, potential presence and absence for the climatic variables with the greatest influence on *Spodoptera frugiperda* in continental Ecuador.

La mayoría de los registros de *S. frugiperda* en este estudio se produjeron en lugares donde el rango de temperatura anual era de 10.5 °C a 12.5 °C, lo que indica cierta tolerancia a la variabilidad de la temperatura. La bibliografía indica que las fluctuaciones diarias de temperatura entre 15 y 25 °C pueden acelerar el desarrollo de las larvas y las pupas (Early *et al.*, 2018). Esto puede explicar la prevalencia de la plaga en las regiones costeras y montañosas de Ecuador. La menor cantidad de casos en la Amazonía, donde las precipitaciones son mucho más abundantes y la humedad relativa fluctúa de 80 a 100%, se asocia al efecto negativo sobre las larvas. Se ha demostrado que la humedad ambiental puede afectar al desarrollo, la supervivencia y la reproducción de *S. frugiperda* en China (He, Zhao, Ali, Ge y Wu, 2021). La humedad relativa elevada del 80% resulta ser la más adecuada para el desarrollo, la reproducción y el crecimiento poblacional de la especie. Sin embargo, si se supera este límite disminuye. Cuando la humedad relativa del suelo es de entre 88.39% y 95.19% no pueden pupar con normalidad. La tasa de supervivencia y eclosión de las pupas y la emergencia de adultos se reducen debido al riego (He *et al.*, 2021). Estos hallazgos pueden ser útiles para la previsión de poblaciones y el manejo de *S. frugiperda*.

La altitud también influye en la distribución; los niveles de infestación suelen ser más bajos en altitudes elevadas (Wyckhuys y O'Neil, 2006), lo que concuerda con estos datos, que muestran que la mayoría de los registros proceden de zonas bajas (0-500 m), con algunas apariciones hasta los 3000 m en los campos agrícolas de la región Sierra. Las variables derivadas de la temperatura no tuvieron diferencias entre los puntos de presencia de *S. frugiperda* y los puntos aleatorios que proceden de la zona agrícola, a excepción del intervalo medio diario e intervalo anual de temperatura. Por lo tanto, los puntos de presencia coincidieron mayormente con las áreas agrícolas. Es decir, la presencia de la especie fue registrada en áreas de cultivos del Ecuador, que principalmente son hospederos de *S. frugiperda*, como el maíz, arroz, entre otros tipos de vegetación herbácea.

Distribución Geográfica Potencial de *Spodoptera frugiperda*

Según los resultados del modelo, aproximadamente 78151 km² de Ecuador continental presentaron condiciones climáticas favorables para la presencia y distribución de *S. frugiperda* (Figura 6B). El análisis por regiones mostró que la Costa concentra la mayor proporción de estas áreas favorables (62.5%; 48 848 km²). Le sigue la Sierra con el 36.5% (28 568 km²) de la extensión favorable. En contraste, la región Amazónica tuvo la menor extensión climáticamente adecuada para la especie (527 km²).

El mapa de favorabilidad ambiental (Figura 6A) identificó las zonas con condiciones ideales para la presencia de *S. frugiperda*, destacando una alta probabilidad de distribución en la Costa. Dentro de esta región, las áreas más extensas con favorabilidad se encuentran en las provincias Los Ríos, Guayas, Manabí, Santa Elena y El Oro, principalmente en el centro y sur del país. Sin embargo, las provincias Esmeraldas y Santo Domingo de los Tsáchilas no presentaron áreas con condiciones favorables significativas.

En la región Sierra, las condiciones climáticas favorables se distribuyeron ampliamente desde el norte hasta el sur. Las provincias con mayor extensión favorable incluyeron a Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Bolívar, Chimborazo, Cañar, Azuay, Loja, y una franja de transición sur entre Carchi e Imbabura (Figura 6A). En la Amazonía, las condiciones climáticas favorables son más limitadas. La provincia Napo presentó favorabilidad media, mientras que Pastaza mostró zonas de alta favorabilidad, principalmente en áreas de transición hacia Tungurahua. Las provincias Sucumbíos, Orellana, Morona Santiago, y Zamora Chinchipe, así como las partes centrales y este de Pastaza, no presentaron condiciones ambientales favorables, catalogándose como áreas de ausencia para *S. frugiperda*.

Estas zonas climáticamente favorables para *S. frugiperda* predichas por el modelo en Ecuador tienen temperaturas anuales de entre 10.5 °C y 13 °C, temperaturas máximas de hasta 23 °C y temperaturas mínimas superiores a 11 °C, lo que coincide con los hallazgos de Wang *et al.* (2020). La plaga no puede sobrevivir a temperaturas bajo cero y prospera donde la temperatura media mensual más fría es > 10 °C (Tepa-Yotto *et al.*, 2021; Jiang *et al.*, 2022).

De acuerdo con el análisis de usos de suelo dentro de la distribución potencial de la plaga, los tipos de suelo más propensos a ser afectados por su presencia fueron los de uso agropecuario (Figura 7). Dentro del área de presencia potencial se encontraron suelos destinados para cultivos de maíz duro, maíz suave, cultivo de arroz, vegetación herbácea, zonas antrópicas, cuerpos de agua y bosques. De la extensión total del área de presencia el 5.27% estuvo dedicado a la producción de maíz duro (4120 km²). Este tipo de superficie destinada a esta actividad se concentra generalmente en las provincias Los Ríos, Guayas, Manabí y Santa Elena de la región Costa y gran parte de la provincia Loja en la parte sur de la región Sierra (Figura 7).

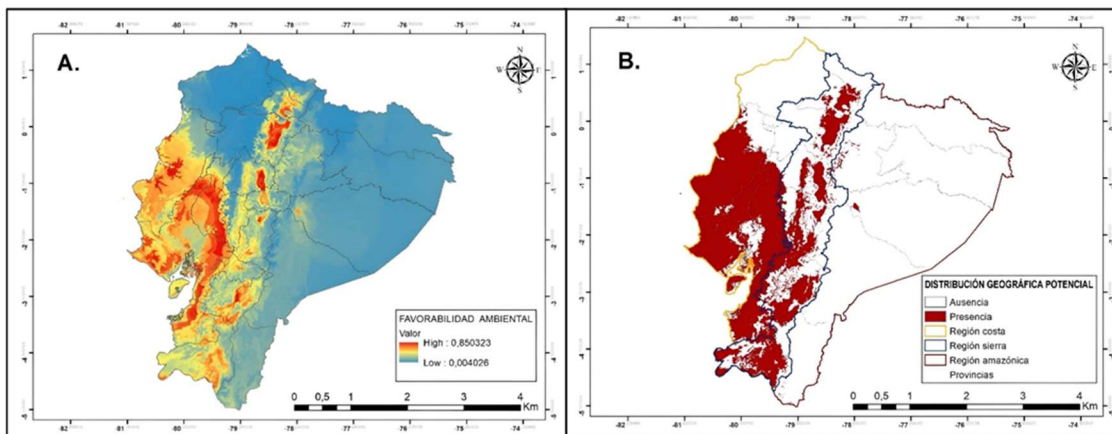


Figura 6. Distribución geográfica potencial de *Spodoptera frugiperda* en Ecuador continental. Mapa de favorabilidad ambiental (A) y mapa de presencia-ausencia (B) bajo condiciones climáticas actuales.

Figure 6. Potential geographic distribution of *Spodoptera frugiperda* in mainland Ecuador. (A) Environmental favorability map and (B) presence-absence map under current climatic conditions.

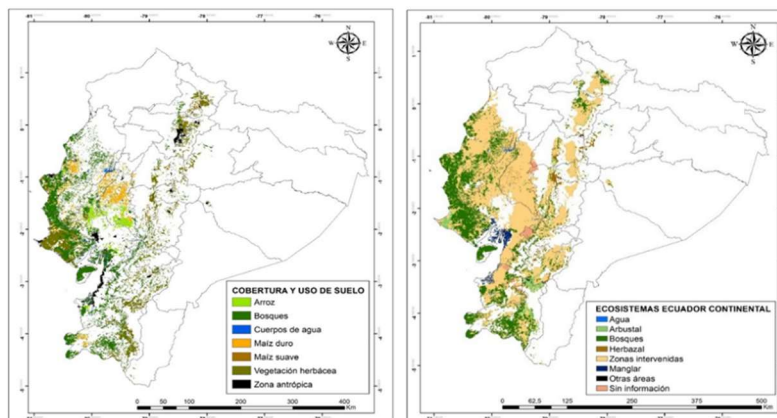


Figura 7. Coberturas, usos de suelo y ecosistemas nativos comprendidos dentro de la distribución geográfica potencial de *Spodoptera frugiperda* en Ecuador continental. Se destacan coberturas agropecuarias, naturales y otros tipos de uso de suelo.

Figure 7. Land cover, land use, and native ecosystems within the potential geographic distribution of *Spodoptera frugiperda* in continental Ecuador. Agricultural areas, natural ecosystems, and other land use categories are highlighted.

Las tierras utilizadas para el cultivo de maíz suave representaron el 1.18 % (924 km²) de la superficie de distribución potencial de la plaga. Esta actividad se concentra en la región montañosa, concretamente en las provincias de Carchi, Imbabura, Pichincha, Cotopaxi, Tungurahua, Bolívar, Chimborazo, Cañar, Azuay y Loja. La superficie de suelo que está dedicada al arroz correspondió al 3.02% (2358 km²) de la distribución de la especie, abarcando solo en la región Costa a las provincias Los Ríos, Guayas, Manabí y El Oro (Figura 7).

Dentro de la distribución geográfica potencial de *S. frugiperda* también se encontraron diferentes tipos de ecosistemas nativos que reflejan la diversidad de hábitats potenciales para la especie. Entre estos, la vegetación arbustiva ocupó ~ 2226 km², e incluye arbustales desérticos, semidecíduos y siempreverdes en las montañas de los Andes (Figura 7). Los bosques representan una amplia proporción del área climáticamente favorable, con 20 750 km². Estos incluyen bosques bajos, deciduos de la región costera, de tierras bajas, montanos y piemontanos.

Por otro lado, los ecosistemas con vegetación herbácea se extienden sobre 2035 km², concentrándose mayormente en la región Sierra. Este tipo de vegetación incluye herbazales del páramo, herbazales húmedos e inundables. Las áreas intervenidas por el hombre para la agricultura constituyen el ecosistema más extenso dentro del rango de idoneidad climática de la especie, cubriendo 50 157 km². Estas zonas presentaron una alta favorabilidad para *S. frugiperda* y se distribuyen ampliamente en las tres regiones del país (Figura 7). En estas regiones, las provincias Los Ríos, Guayas, Manabí y Santa Elena destinan los suelos para la producción de maíz duro, el 5.27% coincide con el área total de distribución potencial. El arroz es otro de los productos de mayor comercialización en Los Ríos, Guayas, Manabí y El Oro, alrededor del 3% concuerda con el área de presencia potencial. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC, 2021), la superficie de maíz duro seco representa el 37.12%, principalmente en Manabí, Guayas y Los Ríos. El arroz ocupa el 34.08% de la superficie total, Guayas, Los Ríos y Manabí son los mayores productores; le sigue el Oro y Loja. Los resultados del modelo coinciden con los datos proporcionados de la Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua (ESPAC), con respecto a la producción agropecuaria por provincias. Esto indicaría que la Costa es una de las regiones que proporciona a la especie una serie de factores beneficiosos, aumentando la probabilidad de presencia en el sector agrícola.

En la Sierra generalmente se produce el maíz suave, que representa el 2.43% y se distribuye en amplias provincias de esta región (INEC, 2021). El 1.18% del suelo destinado al maíz suave coincide con el área de idoneidad ambiental para la especie. La caracterización de la distribución de *S. frugiperda* mostró que todas las provincias de esta región presentaron áreas de uso de suelo para este cultivo, por esta razón el modelo predice que todas las provincias de la Sierra tuvieron zonas climáticamente favorables. A pesar de que, la presencia de

S. frugiperda ha sido informada solo en zonas donde predomina la agricultura, pueden existir muchas áreas cubiertas por bosques que son climáticamente adecuadas para la presencia de la especie, pero que se encuentra ausente por la carencia de plantas hospederas (Early *et al.*, 2018). Por esta razón se tomó en cuenta en la caracterización la cobertura de bosques y vegetación herbácea, esto incluye otros tipos de plantas hospederas para *S. frugiperda*. Este análisis de superposición de los tipos de ecosistemas en el área de presencia potencial que muestra el modelo de distribución puede servir para un mejor entendimiento del desplazamiento actual de la especie.

Distribución bajo escenarios de cambio climático. El escenario climático SSP2-4.5 proyectó para el 2050 un área de presencia moderadamente inferior ($77\,020\text{ km}^2$) a la actual ($78\,151\text{ km}^2$). El análisis por regiones indica que el área que presentó condiciones climáticas favorables para la especie fue menor en la Costa ($48\,346\text{ km}^2$) y en la Sierra ($26\,692\text{ km}^2$) en comparación al escenario actual ($48\,848\text{ km}^2$; $28\,568\text{ km}^2$). La misma tendencia se observó en el 2070. De la transición del periodo anterior hacia el 2070 ($78\,853\text{ km}^2$) existió un aumento del área total con favorabilidad climática asociado al aumento progresivo del área climáticamente favorable en la Amazonía ecuatoriana. En el 2050 se observó un aumento de hasta 1774 km^2 , en el 2070 alcanzó los 3050 km^2 y en el 2100 $\sim 3616\text{ km}^2$ (Figura 8).

Las condiciones del escenario SSP5-8.5 son más extremas. Se observó un aumento consecutivo del área total entre los periodos de tiempo y de un escenario a otro. El área total en el 2050 fue de $77\,414\text{ km}^2$, aumentó en el 2070 a los $79\,364\text{ km}^2$ y concentró la mayor área favorable para la presencia de la especie en el 2100 con $89\,482\text{ km}^2$ (Figura 8).

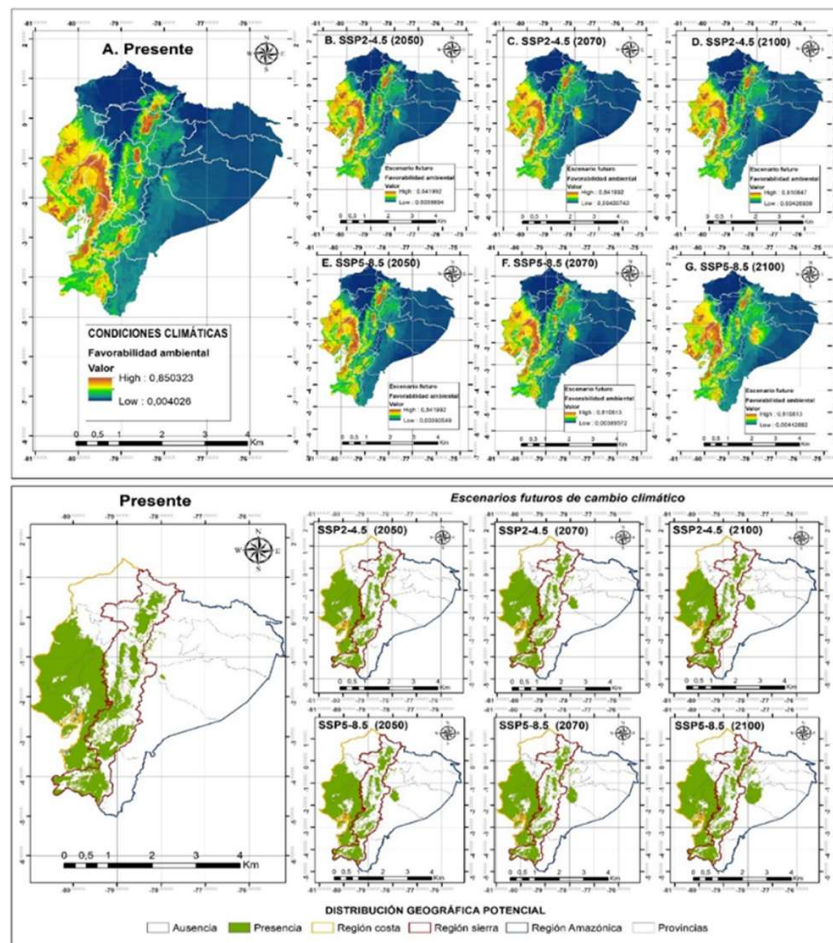


Figura 8. Mapas de favorabilidad ambiental y de presencia/ausencia para la distribución potencial de *Spodoptera frugiperda* por periodos (2050, 2070 y 2100) y escenarios climáticos futuros en Ecuador continental.

Figure 8. Environmental favorability and presence/absence maps for the potential distribution of *Spodoptera frugiperda* by periods (2050, 2070, and 2100) and future climate scenarios in continental Ecuador.

Sin embargo, el área idónea que proyectó el modelo en el 2050 no superó al escenario actual (78 151 km²). La región Amazónica mostró la expansión más pronunciada: de 2770 km² en 2050 a 4649 km² en 2070 y 9680 km² en 2010, en comparación con la referencia de 527 km². En las tierras altas, el área favorable fue de 26 230 km² en 2050, fluctuando a 25 839 km² en 2070 y aumentando a 27 610 km² en 2010 (Figura 8). Esta expansión probablemente esté asociada a la tendencia de aumento de temperatura hacia la zona Amazónica, así como al cambio en el patrón de precipitaciones (más escasas), que facilite la dispersión y sobrevivencia de las larvas y pupas en el escenario futuro amazónico.

Para los riesgos de extrapolación se aplicó el análisis MESS, que de cierta forma ayudó a identificar las zonas y las variables que no tenían analogía con el presente (Figura 9). El análisis MESS proporciona información sobre qué tan idénticas son las variables ambientales entre un tiempo y otro. Las áreas en rojo contienen una o más variables ambientales que se encontraron fuera del rango en comparación al presente, ubicadas en la provincia Pastaza, Amazonía (Figura 9). Significa que las predicciones en estas áreas deben ser interpretadas con mucha cautela. La misma situación se repite en todos los años bajo los dos escenarios climáticos. La variable ambiental que fue más disímil fue la precipitación del mes más seco, lo que indica que se encuentra más lejos de su rango de entrenamiento del presente. Estas zonas deben ser interpretadas con precaución por presentar incertidumbre adicional.

A partir de un análisis comparativo de los mapas binarios se identificaron las zonas con posibles expansiones, contracciones o de estabilidad de la distribución potencial de *S. frugiperda* en cada uno de los escenarios climáticos de los periodos 2050, 2070 y 2100. En el escenario SSP2-4.5 del 2050, se estimó una reducción del área de distribución de 3822 km² en algunas zonas dentro de la Costa y en la Sierra (Figura 10). Ahora bien, el escenario SSP5-8.5 predijo ~ 4636 km² con áreas adecuadas que se reducen. Bajo las condiciones climáticas en el 2070 se identificó un área de 4177 km² que se reduce en el escenario SSP2-4.5. En cuanto a las condiciones del escenario SSP5-8.5, se estimó una contracción de la distribución de ~ 5658 km². En el 2100, el escenario SSP2-4.5 indicó una reducción de áreas con favorabilidad ambiental para la distribución de la especie de ~ 4362 km² y de 5478 km² en el SSP5-8.5.

A pesar de estas contracciones, la expansión de las zonas climáticamente adecuadas para *S. frugiperda* suscita preocupación por un posible aumento de su distribución en diversas regiones. Para 2050, se proyectó una expansión de 2881 km² (SSP2-4.5) y 4055 km² (SSP5-8.5), siendo el aumento más significativo el de la región Amazónica. Del mismo modo, se observaron expansiones menores en varias provincias de la Sierra (Figura 10).

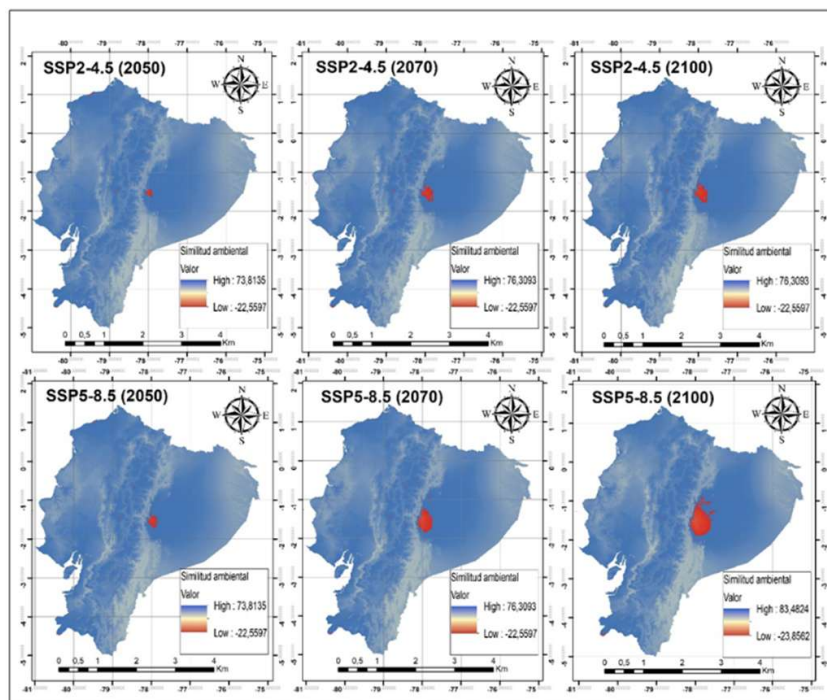


Figura 9. Análisis MESS (Multidimensional Environmental Similarity Surface) de similitud ambiental de las variables con los datos ambientales utilizados en el entrenamiento del modelo.

Figure 9. MESS (Multidimensional Environmental Similarity Surface) analysis of the environmental similarity of the variables using the environmental data employed in training the model.

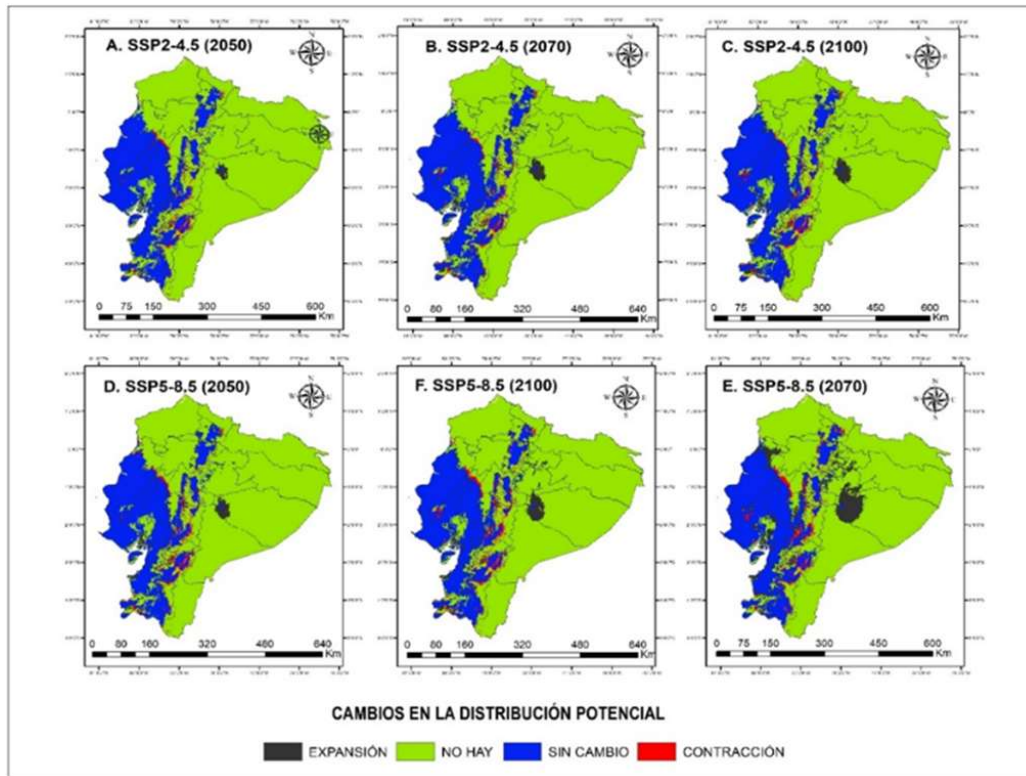


Figura 10. Mapa binario de ganancias, pérdidas o estabilidad de la distribución potencial de *Spodoptera frugiperda* bajo escenarios climáticos futuros de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) en Ecuador continental.

Figure 10. Binary map of gains, losses or stability of the potential distribution of *Spodoptera frugiperda* under future climate scenarios of the Shared Socioeconomic Pathways (SSP) in continental Ecuador.

Para 2070, se estimaron expansiones de 4844 km² (SSP2-4.5) y 6783 km² (SSP5-8.5). La provincia Pastaza presentó el mayor aumento en el escenario extremo, con expansiones menores adicionales en las provincias costeras y de la Sierra. Esta tendencia continuó en 2100, con una expansión estimada de 15 295 km², predominantemente en Pastaza y partes de la región costera (Figura 10).

En todo el mundo se han evidenciado las consecuencias del cambio climático, y como ya se ha mostrado en esta investigación, las áreas climáticamente favorables para *S. frugiperda* cambiarán en consecuencia (Jiang *et al.*, 2022; Paudel Timilsena *et al.*, 2022). El modelo de distribución actual en Ecuador continental ha revelado una amplia distribución de la especie, principalmente en la región Costa. Bajo los diferentes escenarios climáticos futuros las áreas con favorabilidad para la presencia potencial de *S. frugiperda* se expandirán consecutivamente. Hay que tener en cuenta que, al predecir la distribución potencial bajo un clima futuro, los diferentes datos climáticos van a afectar los resultados de predicción (Jiang *et al.*, 2022). El modelo de distribución que se ha proyectado a futuro ha demostrado que, bajo condiciones de cambio climático extremo, la distribución potencial se amplía durante los próximos periodos de tiempo. Los impactos más severos se experimentarían en el escenario SSP5-8.5.

Es necesario prestar mucha atención a las áreas con adecuación climática, especialmente a las zonas descritas con alta favorabilidad. Además, se deben reforzar y/o replantear las estrategias de prevención y control de plagas en la región Costa, principalmente en Los Ríos, Guayas, Manabí y Santa Elena (Gaibor-Fernández *et al.*, 2023). El manejo de las plagas será más desafiante ante escenarios climáticos extremos, puesto que los factores climáticos influyen en el momento de las infestaciones (Paudel Timilsena *et al.*, 2022). Esta investigación pretende ser una herramienta de ayuda para agricultores, autoridades nacionales y regionales, investigadores y demás responsables relacionados con el sector agrícola de Ecuador. La finalidad es que se implementen herramientas sostenibles para la prevención, control y alerta temprana de posibles infestaciones de *S. frugiperda* en el presente y futuro.

La temperatura y precipitación son las principales variables que influyeron en la distribución de *S. frugiperda*, además la disponibilidad de plantas hospederas puede garantizar el fácil desplazamiento de la especie.

El modelo asume implícitamente que la relación entre clima y distribución se mantiene constante hasta 2100 (nicho conservado). Sin embargo, la expansión global rápida y reciente (2016-2024) de *S. frugiperda* en África/Asia, sugiere alta plasticidad. Esta adaptación local o plasticidad fenotípica de la especie podría empeorar las proyecciones a 2100. La inclusión de la altitud como variable topográfica en el modelo implicó asumir que su relación con las variables bioclimáticas permanece estacionaria, lo cual puede no ser válido bajo el desplazamiento altitudinal de isotermas proyectado para finales del siglo XXI. Este supuesto constituye una limitación inherente al enfoque correlativo utilizado y debe considerarse al interpretar las proyecciones futuras.

Limitaciones y consideraciones. A pesar de que el modelo indica esta valoración de los potenciales cambios en la distribución de la especie a futuro, existen desventajas asociadas al método predictivo, especialmente cuando se trata de predicciones futuras. Las transferencias siempre presentan cierto nivel de extrapolación fuera de los límites del rango de las variables con respecto al presente. Esta incertidumbre notoria en las proyecciones futuras se debe generalmente a otros factores que probablemente son difíciles de tomar en cuenta en las predicciones, ya que están sujetas a dinámicas de tiempo y cambios espaciales (Cobos *et al.*, 2019). Jiménez y Méndez (2021) indican que la no extrapolación puede predecir mejor la distribución potencial en este caso de *Pinus engelmannii*, ya que extrapolar libremente hacia el futuro conlleva a predicciones ilógicas y exageradas (Owens *et al.*, 2013). Se recomendaría en este caso probar las diferentes opciones de extrapolación en la transferencia temporal del modelo. También podría depender de los cambios a los que están expuestas las variables climáticas en un espacio de tiempo desconocido.

Los modelos correlativos utilizados en este estudio predicen idoneidad climática basándose en asociaciones estadísticas entre presencias conocidas y variables ambientales, aproximando el nicho realizado de *S. frugiperda* más que su nicho fundamental (*sensu* Hutchinson). Estos modelos no capturan limitaciones bióticas (enemigos naturales, competencia interespecífica), procesos demográficos (dinámica fuente-sumidero), ni barreras de dispersión no climáticas (Paudel Timilsena *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2020). De hecho, Cokola *et al.* (2020) y Liu *et al.* (2020) indican que el uso de suelo puede llegar a ser más importante que los factores climáticos, lo que ocasionaría distribuciones potenciales más extensas. Se espera que, en futuras investigaciones, se tomen en consideración otros aspectos para evaluar la distribución potencial de *S. frugiperda* que, en conjunto con los resultados de esta, logre una información más integral.

Las líneas de investigación futuras deberían integrar variables de uso del suelo, distribución espacial de cultivos hospederos, presencia de enemigos naturales, y factores socioeconómicos relacionados con prácticas agrícolas para desarrollar modelos más comprehensivos del riesgo de infestación por *S. frugiperda*. Sería valioso incorporar datos de series temporales de infestaciones reales para validar las proyecciones del modelo y ajustar los parámetros predictivos. Los estudios podrían diseñar parcelas de monitoreo en zonas de transición climática identificadas con estos modelos. La integración de múltiples Modelos de Circulación General (GCMs) en lugar de depender de un solo modelo climático (IPSL-CM6A-LR) proporcionaría una estimación más robusta de las incertidumbres asociadas con las proyecciones climáticas. Finalmente, el desarrollo de modelos mecanísticos que incorporen procesos fisiológicos y demográficos de la especie, en conjunto con los modelos correlativos de nicho ecológico como el presentado en este estudio, permitiría una comprensión más profunda de los mecanismos causales que determinan la distribución de esta plaga bajo condiciones climáticas cambiantes, lo que facilitaría el diseño de estrategias de manejo más efectivas y sostenibles para la seguridad alimentaria de Ecuador.

El calentamiento global está modificando estas condiciones climáticas. Áreas previamente inadecuadas se vuelvan progresivamente más favorables para el establecimiento de la plaga. Esta transformación del paisaje de riesgo tiene implicaciones profundas no solo para la agricultura de maíz, arroz y otros cultivos básicos, sino también para los sistemas de agricultura familiar y de subsistencia que prevalecen en las áreas de transición andino-amazónicas, donde las capacidades de respuesta ante nuevas amenazas fitosanitarias son frecuentemente limitadas.

Este estudio proporciona información geoespacial específica y cuantitativa que puede servir como base para el desarrollo de sistemas de alerta temprana, la priorización de recursos de monitoreo fitosanitario, y el diseño de estrategias de manejo integrado de plagas adaptadas regionalmente. Las autoridades agrícolas nacionales y locales deben prestar atención prioritaria a las provincias identificadas con alta favorabilidad climática actual, así como a las áreas de expansión futura. La implementación de programas de capacitación para agricultores en estas regiones emergentes de riesgo, el fortalecimiento de las capacidades de diagnóstico temprano, y el establecimiento de protocolos de respuesta rápida ante detecciones iniciales, serán elementos críticos para contener infestaciones futuras antes de que alcancen niveles económicamente devastadores.

CONCLUSIONES

La precipitación del mes más seco es la variable ambiental con mayor contribución al modelo de distribución de *S. frugiperda*, seguida por el rango anual de temperatura y la altitud. El nicho realizado predominante se define por precipitaciones del mes más seco entre 0-20 mm, rangos térmicos anuales de 10.5-13°C, y altitudes preferentemente < 500 m de altitud. Este hallazgo tiene implicaciones teóricas importantes, que sugieren que la disponibilidad de la humedad durante la estación seca constituye un cuello de botella crítico para la supervivencia y reproducción continua de la plaga, incluso en regiones tropicales generalmente húmedas. Las precipitaciones excesivas están fuertemente correlacionadas con áreas de baja favorabilidad, probablemente debido a efectos adversos sobre la oviposición y las larvas. Esto sugiere que la disponibilidad moderada de humedad durante la estación seca o en las zonas más secas, puede ser un factor limitante para la supervivencia y reproducción continua, consistente con estudios experimentales en otras regiones.

El análisis de la distribución actual identificó aproximadamente 78 151 km² de territorio continental ecuatoriano con condiciones climáticas favorables para *S. frugiperda*, con una marcada concentración regional. La región Costa alberga el 62.5% del área favorable, predominantemente en las provincias Los Ríos, Guayas, Manabí, Santa Elena y El Oro, que constituyen el centro y sur costero del país. La región Sierra contiene el 36.5% del área favorable, distribuida ampliamente a lo largo del callejón interandino desde Carchi e Imbabura en el norte hasta Loja en el sur. La región Amazónica representa actualmente la zona menos vulnerable debido a sus precipitaciones excesivas.

Las proyecciones bajo el escenario conservador SSP2-4.5 indican una relativa estabilidad en la extensión total del área apta, con 77 020 km² proyectados para 2050 y 78 853 km² para 2070. En contraste, el escenario extremo SSP5-8.5 proyecta una expansión sustancial progresiva de las condiciones favorables, que alcanza los 89 482 km² para el 2100 (incremento del 14.5%). Bajo escenarios de favorabilidad climática creciente (9680 km² proyectados) y potencial expansión agrícola hacia la Amazonía, esta región enfrenta riesgo sinérgico elevado, aunque la distribución real dependerá críticamente de patrones de uso de suelo y políticas agrícolas. Esta dinámica compleja de redistribución espacial implica que algunas áreas que actualmente son focos de infestación se volverán menos favorables, mientras que regiones históricamente libres de la plaga se convertirán en zonas de alto riesgo. Este cambio requiere una reconfiguración fundamental de las estrategias de monitoreo y control.

Los resultados confirman la hipótesis del estudio de que el cambio climático amplificará significativamente el riesgo de infestación por *S. frugiperda* en Ecuador, particularmente bajo escenarios de emisiones extremas. La expansión proyectada hacia la región Amazónica es preocupante porque representa la colonización de ecosistemas que históricamente han actuado como barreras naturales contra esta plaga debido a sus condiciones de precipitación excesiva.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

Proyecto FOCICYT 9° Convocatoria: Modelación de la distribución potencial del gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*) bajo diferentes métodos estadísticos y escenarios de cambio climático en Ecuador.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: Y.F.S., J.M.G.F., G.J.Z.S., D.B.C.Q., A.L.G.C. y A.H.P.V.; Metodología: Y.F.S. y A.H.P.V.; Software: Y.F.S., J.M.G.F. y A.H.P.V.; Validación: J.M.G.F., G.J.Z.S., D.B.C.Q. y A.L.G.C.; Investigación: Y.F.S., J.M.G.F., G.J.Z.S., D.B.C.Q., A.L.G.C. y A.H.P.V.; Recursos: Y.F.S. y J.M.G.F.; Curación de datos: J.M.G.F., G.J.Z.S., D.B.C.Q. y A.L.G.C.; Escritura - preparación del borrador original: J.M.G.F., G.J.Z.S., D.B.C.Q. y A.L.G.C.; Escritura - revisión y edición: Y.F.S. y A.H.P.V.; Visualización: J.M.G.F.; Supervisión: Y.F.S.; Administración del proyecto: Y.F.S. y A.H.P.V.; Adquisición de fondos: Y.F.S.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la SENESYT por la beca de posgrado (JMGGF). A la Facultad de Posgrado de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo por el apoyo académico y logístico y al Dirección de Investigación por la gestión de la publicación. A los revisores anónimos del manuscrito y los editores de la revista por sus sugerencias.

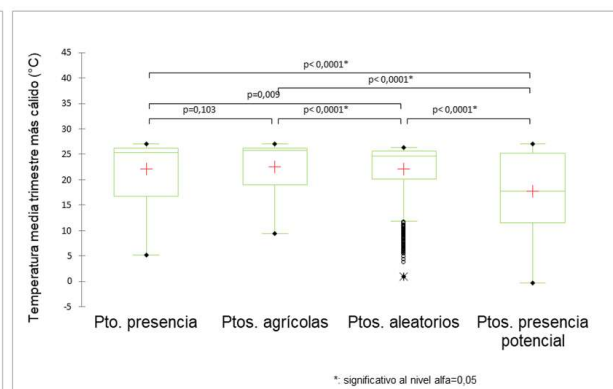
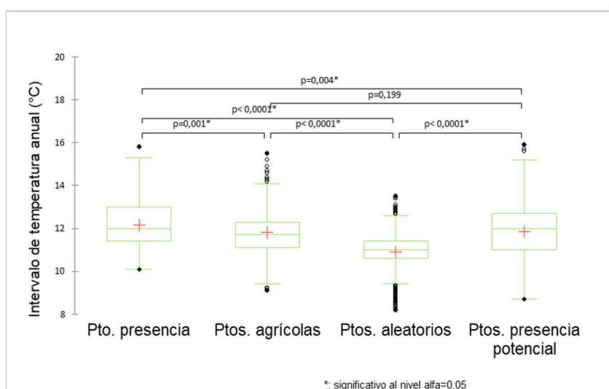
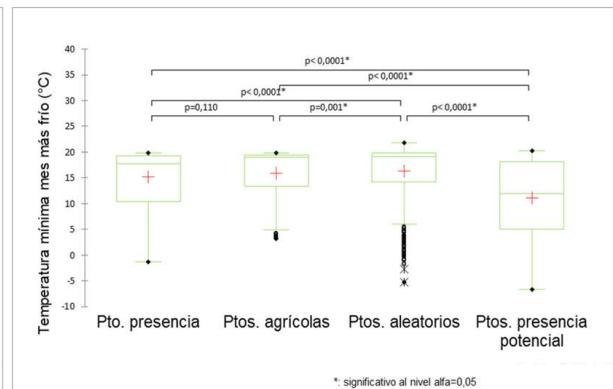
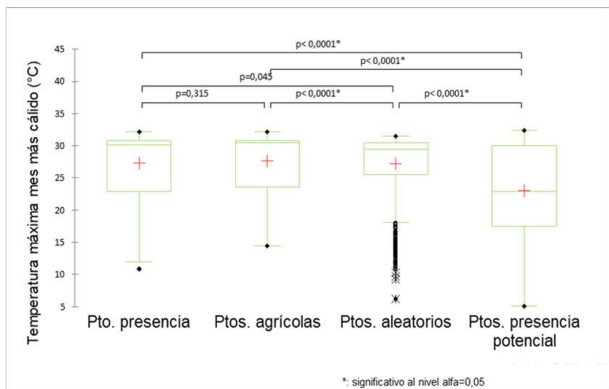
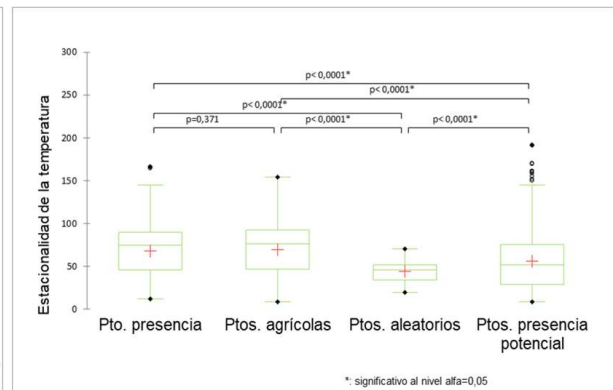
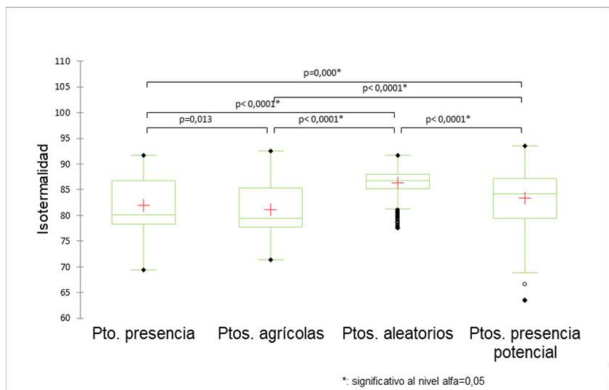
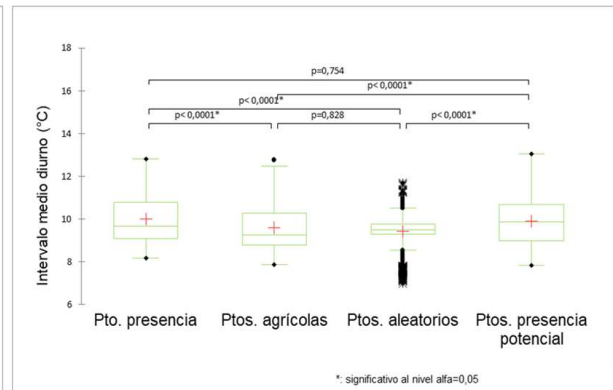
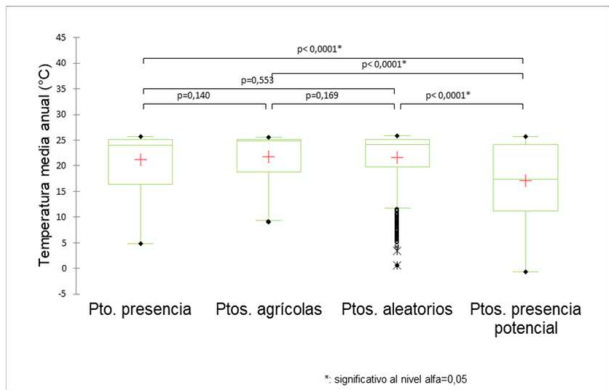
LITERATURA CITADA

- Abasolo-Pacheco, F., Carranza-Valencia, M., Ferrer-Sánchez, Y., & Plasencia-Vázquez, A. H. (2026). Integración de modelos ecológicos y herramientas bioinformáticas para la estimación del riesgo de *Spodoptera frugiperda* en zonas agrícolas ecuatorianas. *Terra Latinoamericana*, 44, 1-19. <https://doi.org/10.28940/terralatinoamericana.v44i.2440>
- Adan, M., Tonnang, H. E., Greve, K., Borgemeister, C., & Goergen, G. (2025). Modelling the environmental and terrestrial drivers of the spread of the invasive fall armyworm *Spodoptera frugiperda* in Africa. *Crop Protection*, 192, 107133. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2025.107133>
- Anderson, R. P., & Raza, A. (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. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02290.x>
- Aiello-Lammens, M. E., Boria, R. A., Radosavljevic, A., Vilela, B., & Anderson, R. P. (2015). spThin: an R package for spatial thinning of species occurrence records for use in ecological niche models. *Ecography*, 38(5), 541-545. <https://doi.org/10.1111/ecog.01132>
- Alkhishe, A. A., Peterson, A. T., & Samy, A. M. (2017). Climate change influences on the potential geographic distribution of the disease vector tick *Ixodes ricinus*. *PloS One*, 12(12), e0189092. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189092>
- Armenta, G. E., Sofiea, C., Gordillo, F., Guerrero, A., & Villa, J. L. (2020). Análisis de las amenazas climáticas futuras en las cuencas hidrográficas: Santiago, Mayo, Puyango y Catamayo. *AXIOMA*, 21, 5-21.
- Baloch, M. N., Fan, J., Haseeb, M., & Zhang, R. (2020). Mapping potential distribution of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in central Asia. *Insects*, 11(3), 172. <https://doi.org/10.3390/insects11030172>
- Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S. P., Peterson, A. T., ... & Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling*, 222(11), 1810-1819. <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(7), 1506-1514. <https://doi.org/10.1111/aec.13234>
- Boria, R. A., Olson, L. E., Goodman, S. M., & Anderson, R. P. (2014). Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models. *Ecological Modelling*, 275, 73-77. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.12.012>
- Cáceres, L., & Núñez, A. M. (2011). *Segunda comunicación nacional sobre cambio climático ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente del Ecuador.
- Chamberlain, S. (2020). *scrubr: Clean biological occurrence records (Version 0.3.2)*. R package. San Francisco, CA, USA: rOpenSci.
- CMC (Climate Modelling Center). (2017). *IPSL-CM6A-LR*. Paris, France: Institut Pierre-Simon Laplace. Consultado el 6 de mayo, 2023, desde <https://cmc.ipsl.fr/ipsl-climate-models/ipsl-cm6/>
- Cobos, M. E., Peterson, A. T., Barve, N., & Osorio-Olvera, L. (2019). kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 7, e6281. <https://doi.org/10.7717/peerj.6281>
- Cokola, M. C., Mugumaarhama, Y., Noël, G., Bisimwa, E. B., Bugeme, D. M., Chuma, G. B., ... & Francis, F. (2020). Bioclimatic zonation and potential distribution of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in south Kivu Province, DR Congo. *BMC Ecology*, 20(1), 66. <https://doi.org/10.1186/s12898-020-00335-1>
- Datta, A., Schweiger, O., & Kühn, I. (2020). Origin of climatic data can determine the transferability of species distribution models. *NeoBiota*, 59, 61-76. <https://doi.org/10.3897/neobiota.59.36299>
- Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., ... & Lautenbach, S. (2013). Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36(1), 27-46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Early, R., González-Moreno, P., Murphy, S. T., & Day, R. (2018). Forecasting the global extent of invasion of the cereal pest *Spodoptera frugiperda*, the fall armyworm. *NeoBiota*, 40, 25-50. <https://doi.org/10.3897/neobiota.40.28165>
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). (2016). *ArcGIS Desktop 10.5* [Software]. Redlands, CA, USA: ESRI.
- Fan, J., Wu, P., Tian, T., Ren, Q., Haseeb, M., & Zhang, R. (2020). Potential distribution and niche differentiation of *Spodoptera frugiperda* in Africa. *Insects*, 11(6), 383. <https://doi.org/10.3390/insects11060383>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2012). *Herramientas para la adaptación y mitigación del cambio climático en el sector agropecuario. Resultados del taller práctico*. Roma, Italia: FAO. ISBN: 978-92-5-307287-3.
- Fernandez, M. A., Bucaram, S. J., & Renteria, W. (2015). Assessing local vulnerability to climate change in Ecuador. *SpringerPlus*, 4, 1-20. <https://doi.org/10.1186/s40064-015-1536-z>

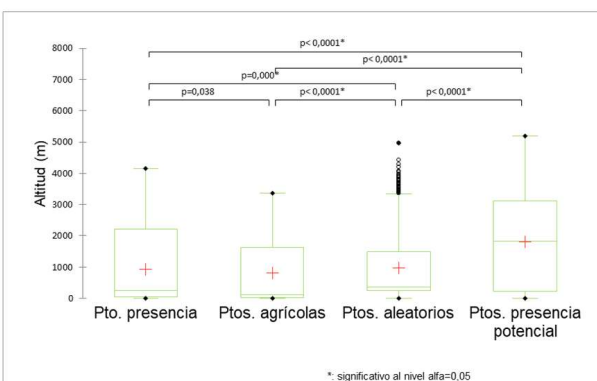
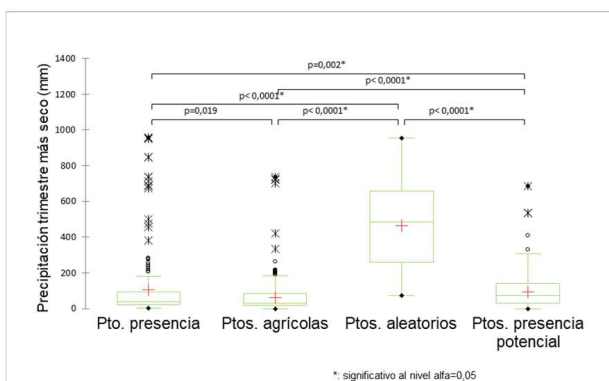
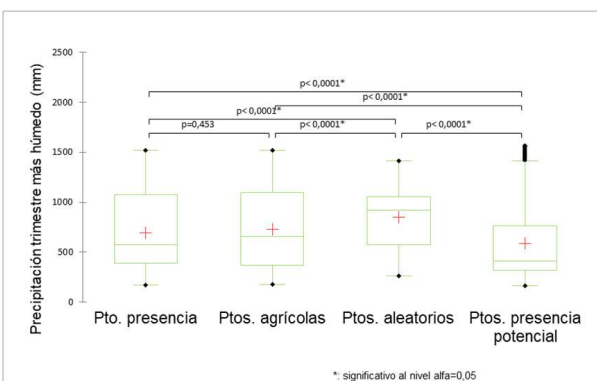
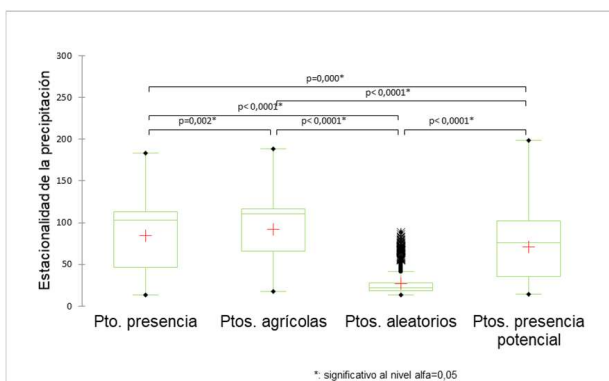
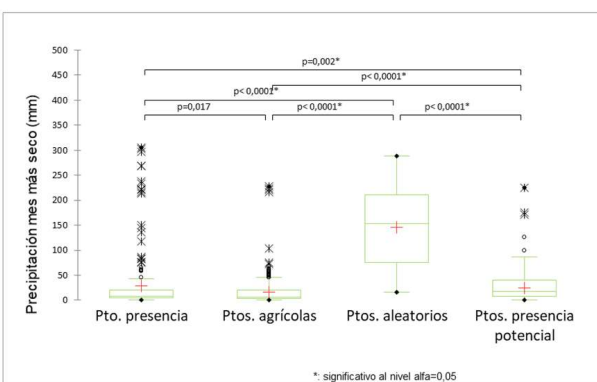
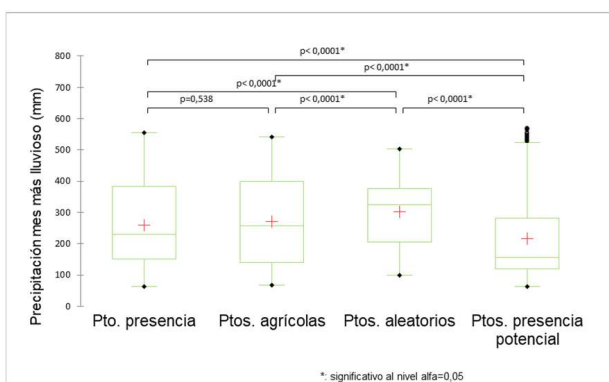
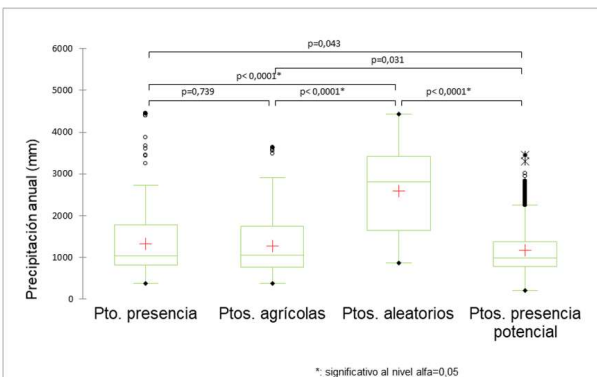
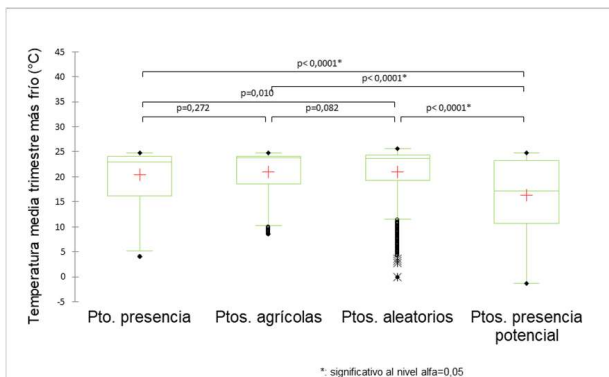
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Fourcade, Y., Engler, J. O., Rödder, D., & Secondi, J. (2014). Mapping species distributions with MAXENT using a geographically biased sample of presence data: a performance assessment of methods for correcting sampling bias. *PLoS One*, 9(5), e97122. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097122>
- Gaibor-Fernández, R., Rodríguez-Rodríguez, S., Reyes-Pérez, J. J., Jiménez-Pizarro, M., González-Rosales, B., Jacas-Vega, L., ... & Hernández-Montiel, L. G. (2023). Spodoptera Frugiperda Management in *Zea mays* L. Using Vinasse and Corn-Mulberry Mulching. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(1), 1-10. <http://doi.org/10.56369/tsaes.4541>
- GBIF (Global Biodiversity Information Facility). (2025). *GBIF Occurrence Download*. Copenhagen, Denmark: Global Biodiversity Information Facility.
- Hastenrath, S. (1981). *The glaciation of the Ecuadorian Andes*. Rotterdam. The Netherlands: A. A. Balkema. ISBN: 978-90-6191-038-1
- He, L., Zhao, S., Ali, A., Ge, S., & Wu, K. (2021). Ambient humidity affects development, survival, and reproduction of the invasive fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), in China. *Journal of Economic Entomology*, 114(3), 1145-1158. <https://doi.org/10.1093/jee/toab056>
- iNaturalist. (2025). *iNaturalist Ecuador*. San Francisco, CA, USA: California Academy of Sciences y National Geographic Society.
- INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos). (2021). Encuesta de superficie y producción agropecuaria continua (ESPAC 2021). Principales resultados. Quito, Ecuador: INEC. Consultado el 15 de diciembre, 2022, desde <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>
- INIAP. (2016). Estimación de la incidencia de plagas y enfermedades en el cultivo de maíz en las provincias de Los Ríos, Guayas y Manabí. Portoviejo, Ecuador, Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. Consultado el 5 mayo, 2023, desde <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5388>
- INIAP (Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias). (2025). *Repositorio institucional y bases de datos de investigación agropecuaria*. Quito, Ecuador: Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias.
- Jiang, C., Zhang, X., Xie, W., Wang, R., Feng, C., Ma, L., ... & Wang, H. (2022). Predicting the potential distribution of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) under climate change in China. *Global Ecology and Conservation*, 33, e01994. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01994>
- Jiménez-Salazar, M. Á., & Méndez-González, J. (2021). Distribución actual y potencial de *Pinus engelmannii* Carrière bajo escenarios de cambio climático. *Madera y bosques*, 27(3), 1-14. <https://doi.org/10.21829/myb.2021.2732117>
- Laroche, F. (2024). Efficient sampling designs to assess biodiversity spatial autocorrelation: should we go fractal? *Peer Community Journal*, 4, 1-23. <https://doi.org/10.24072/pcjournal.454>
- Legendre, P., & Legendre, L. (2012). *Numerical ecology* (3rd ed.). *Developments in Environmental Modelling*, Vol. 24. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. ISBN: 978-0444538680
- Li, C., Liao, J., Ya, Y., Liu, J., Li, J., & Yu, G. (2022). Analysis of potential distribution of *Spodoptera frugiperda* in western China. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 25(4), 101985. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2022.101985>
- Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B. M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., ... & Torquebiau, E. F. (2014). Climate-smart agriculture for food security. *Nature Climate Change*, 4(12), 1068-1072. <https://doi.org/10.1038/nclimate2437>
- Liu, C., Berry, P. M., Dawson, T. P., & Pearson, R. G. (2005). Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28(3), 385-393. <https://doi.org/10.1111/j.0906-7590.2005.03957.x>
- Liu, C., White, M., & Newell, G. (2013). Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography*, 40(4), 778-789. <https://doi.org/10.1111/jbi.12058>
- Liu, T., Wang, J., Hu, X., & Feng, J. (2020). Land-use change drives present and future distributions of Fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). *Science of The Total Environment*, 706, 135872. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135872>
- Lozano-Povis, A., Alvarez-Montalván, C. E., & Moggiano, N. (2021). El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: una revisión sistemática. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 101-108. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.012>
- Mauri, M., Elli, T., Caviglia, G., Uboldi, G., & Azzi, M. (2023). *RAWGraphs 2.0* [Software]. Milan, Italy: DensityDesign Lab, Politecnico di Milano. Consultado el 8 de febrero de 2026, desde <https://app.rawgraphs.io/>
- Monteros, A. (2014). *Rendimientos de maíz duro seco en el Ecuador, invierno 2014 (enero-mayo)*. Quito, Ecuador: Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP).
- Montezano, D. G., Sosa-Gómez, D. R., Specht, A., Roque-Specht, V. F., Sousa-Silva, J. C., Paula-Moraes, S. D., ... & Hunt, T. E. (2018). Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. *African Entomology*, 26(2), 286-300. <https://doi.org/10.4001/003.026.0286>
- Nagoshi, R. N., Nagoshi, B. Y., Cañarte, E., Navarrete, B., Solórzano, R., & Garcés-Carrera, S. (2019). Genetic characterization of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in Ecuador and comparisons with regional populations identify likely migratory relationships. *PLoS One*, 14(9), e0222332. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222332>
- Owens, H. L., Campbell, L. P., Dornak, L. L., Saupe, E. E., Barve, N., Soberón, J., ... & Peterson, A. T. (2013). Constraints on interpretation of ecological niche models by limited environmental ranges on calibration areas. *Ecological Modelling*, 263, 10-18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.04.011>
- Paudel Timilsena, B., Niassy, S., Kimathi, E., Abdel-Rahman, E. M., Seidl-Adams, I., Wamalwa, M., ... & Subramanian, S. (2022). Potential distribution of fall armyworm in Africa and beyond, considering climate change and irrigation patterns. *Scientific Reports*, 12(1), 539. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04369-3>
- Pearson, R. G., & Dawson, T. P. (2003). Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecology and Biogeography*, 12(5), 361-371. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00042.x>
- Pereira, L. M., Davies, K. K., den Belder, E., Ferrier, S., Karlsson-Vinkhuyzen, S., Kim, H., ... & Lundquist, C. J. (2020). Developing multiscale and integrative nature-people scenarios using the Nature Futures Framework. *People and Nature*, 2(4), 1172-1195. <https://doi.org/10.1002/pan3.10146>
- Peterson, A. T., Soberón, J., Pearson, R. G., Anderson, R. P., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo, M. B. (2011). *Ecological niches and geographic distributions*. *Monographs in Population Biology*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press. ISBN: 978-0691136868
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Prasad, T. V., Rao, M. S., Rao, K. V., Bal, S. K., Muttapa, Y., Choudhary, J. S., & Singh, V. K. (2022). Temperature-based phenology model for predicting the present and future establishment and distribution of recently invasive *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) in India. *Bulletin of Entomological Research*, 112(2), 271-285. <https://doi.org/10.1017/S0007485321000882>

- Radosavljevic, A., & Anderson, R. P. (2014). Making better Maxent models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation. *Journal of Biogeography*, 41(4), 629-643. <https://doi.org/10.1111/jbi.12227>
- RStudio Team. (2023). *RStudio: Integrated Development Environment for R* (Version 2023.06.1+524) [Software]. Boston, MA, USA: Posit Software, PBC.
- Soberón, J., & Townsend-Peterson, A. (2005). Interpretation of Models of Fundamental Ecological Niches and Species' Distributional Areas. *Biodiversity Informatics*, 2, 1-10. <http://dx.doi.org/10.17161/bi.v2i0.4>
- Steinke, D., Gemeinholzer, B., Martínez-Meyer, E., Noesgaard, D., Young, A., & Schigel, D. (2025). Globally aggregated biodiversity data impact predictive and descriptive research. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(50), e2519119122. <https://doi.org/10.1073/pnas.2519119122>
- Syfert, M. M., Smith, M. J., & Coomes, D. A. (2013). The effects of sampling bias and model complexity on the predictive performance of MaxEnt species distribution models. *PLoS One*, 8(2), e55158. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0055158>
- Tepa-Yotto, G. T., Tonnang, H. E., Goergen, G., Subramanian, S., Kimathi, E., Abdel-Rahman, E. M., ... & Sæthre, M. G. (2021). Global habitat suitability of *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) (*Lepidoptera*, *Noctuidae*): key parasitoids considered for its biological control. *Insects*, 12(4), 273. <https://doi.org/10.3390/insects12040273>
- Toulkeridis, T., Tamayo, E., Simón-Baile, D., Merizalde-Mora, M. J., Reyes-Yunga, D. F., Viera-Torres, M., & Heredia, M. (2020). Climate Change according to Ecuadorian academics-Perceptions versus facts. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 31(1), 21-46. <https://doi.org/10.17163/lgr.n31.2020.02>
- Vuille, M., Bradley, R. S., & Keimig, F. (2000). Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 13(14), 2520-2535.
- Wang, R., Jiang, C., Guo, X., Chen, D., You, C., Zhang, Y., ... & Li, Q. (2020). Potential distribution of *Spodoptera frugiperda* (JE Smith) in China and the major factors influencing distribution. *Global Ecology and Conservation*, 21, e00865. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00865>
- Wyckhuys, K. A., & O'Neil, R. J. (2006). Population dynamics of *Spodoptera frugiperda* Smith (*Lepidoptera*: *Noctuidae*) and associated arthropod natural enemies in Honduran subsistence maize. *Crop Protection*, 25(11), 1180-1190. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.03.003>
- Zacarias, D. (2020). Global bioclimatic suitability for the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (*Lepidoptera*: *Noctuidae*), and potential co-occurrence with major host crops under climate change scenarios. *Climatic Change*, 161(4), 555-566. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02722-5>

ANEXO 1. Comparación de variables de temperatura (Kruskal Wallis) entre puntos con presencia, puntos aleatorios, puntos en zona agrícola y puntos dentro de la región con idoneidad climática.
ANNEX1. Comparison of temperature variables (Kruskal-Wallis test) among presence points, random points, points located in agricultural areas, and points within the climatically suitable region.



ANEXO 1 (continuación). Comparación de variables de temperatura (Kruskall Wallis) entre puntos con presencia, puntos aleatorios, puntos en zona agrícola y puntos dentro de la región con idoneidad climática.
ANNEX1 (continuation). Comparison of temperature variables (Kruskal-Wallis test) among presence points, random points, points located in agricultural areas, and points within the climatically suitable region.



ANEXO 2. Tabla general de los estadísticos descriptivos de las variables bioclimáticas por escenarios para puntos de presencia potencial y de ausencia (aleatorios); No. puntos de presencia= 5841 y No. puntos aleatorios= 3138; Mín.= mínimo; Máx.= máximo; CV= coeficiente de variación; E= error típico de la media.

ANNEX 2. General table of descriptive statistics for bioclimatic variables by scenario for potential presence and absence (random) points; number of presence points = 5841 and number of random points = 3138; Min. = minimum; Max. = maximum; CV = coefficient of variation; SE = standard error of the mean.

Variable	Estadístico	Mín	Máx	Media	CV	E	Límite inferior media (95%)	Límite superior media (95%)
Temperatura media anual (°C)	Puntos aleatorios 2-4.5	2.50	29.10	24.19 ± 5.08	0.21	0.09	24.01	24.37
	Puntos presencia 2-4.5	1.20	28.60	19.44 ± 6.81	0.35	0.09	19.26	19.61
	Puntos aleatorios 5-8.5	2.90	32.50	25.72 ± 5.29	0.21	0.09	25.54	25.91
	Puntos presencia 5-8.5	1.70	31.10	20.81 ± 6.87	0.33	0.09	20.63	20.98
Intervalo medio diurno (°C)	Puntos aleatorios 2-4.5	7.00	11.60	9.33 ± 0.75	0.08	0.01	9.31	9.36
	Puntos presencia 2-4.5	7.90	13.00	9.93 ± 1.06	0.11	0.01	9.90	9.96
	Puntos aleatorios 5-8.5	7.10	11.60	9.32 ± 0.75	0.08	0.01	9.29	9.35
	Puntos presencia 5-8.5	7.90	13.10	9.96 ± 1.06	0.11	0.01	9.93	9.99
Isotermalidad	Puntos aleatorios 2-4.5	77.70	93.40	86.99 ± 2.97	0.03	0.05	86.88	87.09
	Puntos presencia 2-4.5	66.70	93.20	84.08 ± 4.76	0.06	0.06	83.95	84.20
	Puntos aleatorios 5-8.5	74.60	93.30	86.19 ± 3.34	0.04	0.06	86.07	86.31
	Puntos presencia 5-8.5	67.00	93.50	84.11 ± 4.77	0.06	0.06	83.99	84.24
Estacionalidad temperatura	Puntos aleatorios 2-4.5	12.40	73.40	38.53 ± 13.44	0.35	0.24	38.06	39.00
	Puntos presencia 2-4.5	9.20	164.40	49.51 ± 29.35	0.59	0.38	48.76	50.27
	Puntos aleatorios 5-8.5	11.50	83.00	39.70 ± 14.77	0.37	0.26	39.19	40.22
	Puntos presencia 5-8.5	8.30	166.10	48.05 ± 29.42	0.61	0.38	47.30	48.81
Temperatura máxima mes más cálido (°C)	Puntos aleatorios 2-4.5	8.10	34.50	29.73 ± 4.94	0.17	0.09	29.56	29.91
	Puntos presencia 2-4.5	6.90	35.20	25.41 ± 6.80	0.27	0.09	25.23	25.58
	Puntos aleatorios 5-8.5	8.60	38.00	31.34 ± 5.18	0.17	0.09	31.16	31.52
	Puntos presencia 5-8.5	7.30	37.80	26.83 ± 6.85	0.26	0.09	26.65	27.00
Temperatura mínima mes más frío (°C)	Puntos aleatorios 2-4.5	-3.30	24.30	19.01 ± 5.23	0.28	0.09	18.82	19.19
	Puntos presencia 2-4.5	-4.70	22.80	13.59 ± 6.85	0.50	0.09	13.41	13.77
	Puntos aleatorios 5-8.5	-2.80	26.90	20.53 ± 5.43	0.26	0.10	20.34	20.72
	Puntos presencia 5-8.5	-4.20	25.00	14.98 ± 6.88	0.46	0.09	14.80	15.16
Intervalo de temperatura anual (°C)	Puntos aleatorios 2-4.5	8.10	13.00	10.73 ± 0.75	0.07	0.01	10.70	10.75
	Puntos presencia 2-4.5	8.70	15.80	11.82 ± 1.13	0.10	0.01	11.79	11.85
	Puntos aleatorios 5-8.5	8.10	13.00	10.81 ± 0.74	0.07	0.01	10.79	10.84
	Puntos presencia 5-8.5	8.80	15.90	11.85 ± 1.12	0.09	0.01	11.82	11.88
Temperatura media trimestre más cálido (°C)	Puntos aleatorios 2-4.5	2.80	29.60	24.60 ± 5.13	0.21	0.09	24.42	24.78
	Puntos presencia 2-4.5	1.50	29.80	20.00 ± 7.10	0.35	0.09	19.81	20.18
	Puntos aleatorios 5-8.5	3.20	33.30	26.17 ± 5.37	0.21	0.10	25.98	26.35
	Puntos presencia 5-8.5	1.90	32.30	21.36 ± 7.17	0.34	0.09	21.18	21.55

ANEXO 2 (continuación). Tabla general de los estadísticos descriptivos de las variables bioclimáticas por escenarios para puntos de presencia potencial y de ausencia (aleatorios); No. puntos de presencia= 5841 y No. puntos aleatorios= 3138; Mín.= mínimo; Máx.= máximo; CV= coeficiente de variación; E= error típico de la media.

ANNEX 2 (continuation). General table of descriptive statistics for bioclimatic variables by scenario for potential presence and absence (random) points; number of presence points = 5841 and number of random points = 3138; Min. = minimum; Max. = maximum; CV = coefficient of variation; SE = standard error of the mean.

Variable	Estadístico	Min	Más<	Media	CV	E	Límite inferior media (95%)	Límite superior media (95%)
	Puntos aleatorios 2-4.5	1.90	28.80	23.69 ± 5.05	0.21	0.09	23.52	23.87
Temperatura media trimestre más frío (°C)	Puntos presencia 2-4.5	0.70	27.50	18.83 ± 6.64	0.35	0.09	18.66	19.00
	Puntos aleatorios 5-8.5	2.40	31.70	25.22 ± 5.23	0.21	0.09	25.03	25.40
	Puntos presencia 5-8.5	1.30	30.00	20.22 ± 6.69	0.33	0.09	20.05	20.40
Precipitación Anual (mm)	Puntos aleatorios 2-4.5	938.00	5148.00	2853.95 ± 1067.71	0.37	19.06	2816.58	2891.32
	Puntos presencia 2-4.5	254.00	4032.00	1310.19 ± 679.70	0.52	8.89	1292.76	1327.63
	Puntos aleatorios 5-8.5	954.00	5983.00	3055.88 ± 1140.02	0.37	20.35	3015.97	3095.78
	Puntos presencia 5-8.5	258.00	4966.00	1487.05 ± 820.53	0.55	10.74	1466.00	1508.10
Precipitación mes más lluvioso (mm)	Puntos aleatorios 2-4.5	105.00	676.00	373.11 ± 134.42	0.36	2.40	368.41	377.82
	Puntos presencia 2-4.5	70.00	734.00	254.12 ± 158.50	0.62	2.07	250.06	258.19
	Puntos aleatorios 5-8.5	107.00	859.00	423.40 ± 160.74	0.38	2.87	417.78	429.03
	Puntos presencia 5-8.5	71.00	984.00	302.07 ± 201.42	0.67	2.64	296.90	307.23
Precipitación mes más seco (mm)	Puntos aleatorios 2-4.5	19.00	329.00	157.23 ± 76.82	0.49	1.37	154.54	159.92
	Puntos presencia 2-4.5	0.00	251.00	26.76 ± 23.03	0.86	0.30	26.17	27.35
	Puntos aleatorios 5-8.5	18.00	369.00	162.93 ± 78.33	0.48	1.40	160.19	165.68
	Puntos presencia 5-8.5	0.00	260.00	29.37 ± 24.89	0.85	0.33	28.73	30.01
Estacionalidad de la Precipitación	Puntos aleatorios 2-4.5	15.20	91.00	30.37 ± 12.86	0.42	0.23	29.92	30.82
	Puntos presencia 2-4.5	16.00	207.40	71.08 ± 35.53	0.50	0.46	70.17	71.99
	Puntos aleatorios 5-8.5	15.50	89.40	32.88 ± 12.40	0.38	0.22	32.45	33.31
	Puntos presencia 5-8.5	16.50	222.20	72.91 ± 36.14	0.50	0.47	71.98	73.83
Precipitación trimestre más húmedo (mm)	Puntos aleatorios 2-4.5	287.00	1752.00	982.39 ± 341.94	0.35	6.10	970.42	994.36
	Puntos presencia 2-4.5	192.00	1902.00	662.44 ± 421.29	0.64	5.51	651.63	673.25
	Puntos aleatorios 5-8.5	298.00	2200.00	1087.33 ± 396.45	0.36	7.08	1073.45	1101.20
	Puntos presencia 5-8.5	199.00	2534.00	766.75 ± 514.04	0.67	6.73	753.56	779.93
Precipitación trimestre más Seco (mm)	Puntos aleatorios 2-4.5	83.00	1045.00	501.85 ± 231.51	0.46	4.13	493.75	509.95
	Puntos presencia 2-4.5	0.00	795.00	101.57 ± 77.65	0.76	1.02	99.58	103.56
	Puntos aleatorios 5-8.5	84.00	1158.00	522.59 ± 238.55	0.46	4.26	514.24	530.94
	Puntos presencia 5-8.5	0.00	857.00	111.42 ± 84.57	0.76	1.11	109.25	113.59

Anexo 3. Tabla general de los estadísticos descriptivos de las variables bioclimáticas por periodos para puntos de presencia potencial y de ausencia (aleatorios). No. Puntos por periodo= 5986; Mín.= mínimo; Máx.= máximo; CV= coeficiente de variación; E= error típico de la media.
Annex 3. General table of descriptive statistics for bioclimatic variables by period for potential presence and absence (random) points. number of points per period = 5986; Min. = minimum; Max. = maximum; CV = coefficient of variation; SE = standard error of the mean.

Variable	Estadístico	Mín	Máx	Media	CV	E	Límite inferior media (95%)	Límite superior media (95%)
Temperatura media anual (°C)	Periodo 2041-2060	1,20	28,50	20,81 ± 6,65	0,32	0,09	20,64	20,98
	Periodo 2061-2080	1,80	30,30	21,78 ± 6,68	0,31	0,09	21,61	21,95
	Periodo 2081-2100	2,20	32,50	22,84 ± 6,79	0,30	0,09	22,67	23,01
Intervalo medio diario (°C)	Periodo 2041-2060	7,00	13,00	9,71 ± 1,01	0,10	0,01	9,69	9,74
	Periodo 2061-2080	7,00	13,00	9,72 ± 1,02	0,10	0,01	9,69	9,75
	Periodo 2081-2100	7,10	13,10	9,75 ± 1,02	0,10	0,01	9,73	9,78
Isotermalidad	Periodo 2041-2060	67,20	93,50	85,12 ± 4,31	0,05	0,06	85,01	85,23
	Periodo 2061-2080	67,20	93,40	85,09 ± 4,46	0,05	0,06	84,98	85,20
	Periodo 2081-2100	66,70	93,30	84,69 ± 4,55	0,05	0,06	84,57	84,80
Estacionalidad de la temperatura	Periodo 2041-2060	9,70	163,40	45,77 ± 25,20	0,55	0,33	45,13	46,41
	Periodo 2061-2080	9,20	164,40	44,94 ± 25,55	0,57	0,33	44,30	45,59
	Periodo 2081-2100	8,30	166,10	45,50 ± 25,90	0,57	0,33	44,85	46,16
Temperatura máxima mes más cálido (°C)	Periodo 2041-2060	6,90	34,70	26,63 ± 6,53	0,25	0,08	26,46	26,79
	Periodo 2061-2080	7,40	36,10	27,62 ± 6,58	0,24	0,09	27,45	27,79
	Periodo 2081-2100	7,80	38,00	28,74 ± 6,68	0,23	0,09	28,57	28,91
Temperatura mínima mes más frío (°C)	Periodo 2041-2060	-4,70	23,90	15,21 ± 6,83	0,45	0,09	15,03	15,38
	Periodo 2061-2080	-4,20	25,00	16,19 ± 6,86	0,42	0,09	16,01	16,36
	Periodo 2081-2100	-3,80	26,90	17,21 ± 6,94	0,40	0,09	17,03	17,39
Intervalo anual de temperatura (°C)	Periodo 2041-2060	8,10	15,80	11,42 ± 1,14	0,10	0,01	11,39	11,45
	Periodo 2061-2080	8,20	15,80	11,44 ± 1,13	0,10	0,01	11,41	11,46
	Periodo 2081-2100	8,30	15,90	11,53 ± 1,11	0,10	0,01	11,50	11,55
Temperatura media trimestre más cálido (°C)	Periodo 2041-2060	1,50	29,30	21,32 ± 6,83	0,32	0,09	21,14	21,49
	Periodo 2061-2080	2,00	30,90	22,29 ± 6,87	0,31	0,09	22,12	22,47
	Periodo 2081-2100	2,40	33,30	23,36 ± 6,99	0,30	0,09	23,18	23,54
Temperatura media trimestre más frío (°C)	Periodo 2041-2060	0,70	28,20	20,24 ± 6,55	0,32	0,08	20,07	20,40
	Periodo 2061-2080	1,30	29,90	21,23 ± 6,57	0,31	0,08	21,06	21,40
	Periodo 2081-2100	1,80	31,70	22,28 ± 6,66	0,30	0,09	22,11	22,45
Precipitación anual (mm)	Periodo 2041-2060	254,00	5048,00	1818,32 ± 1102,86	0,61	14,25	1790,37	1846,26
	Periodo 2061-2080	266,00	5518,00	1947,13 ± 1160,36	0,60	15,00	1917,73	1976,53
	Periodo 2081-2100	270,00	5983,00	2062,10 ± 1213,31	0,59	15,68	2031,36	2092,84
Precipitación mes más lluvioso (mm)	Periodo 2041-2060	70,00	685,00	285,41 ± 154,32	0,54	1,99	281,50	289,32
	Periodo 2061-2080	72,00	825,00	320,03 ± 177,29	0,55	2,29	315,54	324,52
	Periodo 2081-2100	73,00	984,00	354,83 ± 202,71	0,57	2,62	349,69	359,97
Precipitación mes más seco (mm)	Periodo 2041-2060	0,00	326,00	71,61 ± 78,34	1,09	1,01	69,63	73,60
	Periodo 2061-2080	0,00	349,00	74,28 ± 80,15	1,08	1,04	72,25	76,31
	Periodo 2081-2100	0,00	369,00	76,72 ± 82,20	1,07	1,06	74,64	78,80
Estacionalidad de la precipitación	Periodo 2041-2060	15,20	204,10	56,25 ± 35,33	0,63	0,46	55,36	57,15
	Periodo 2061-2080	15,90	214,30	57,96 ± 35,54	0,61	0,46	57,06	58,86
	Periodo 2081-2100	15,80	222,20	59,44 ± 35,67	0,60	0,46	58,53	60,34
Precipitación trimestre más húmedo (mm)	Periodo 2041-2060	192,00	1814,00	755,99 ± 412,32	0,55	5,33	745,54	766,44
	Periodo 2061-2080	202,00	2137,00	828,37 ± 461,40	0,56	5,96	816,68	840,06
	Periodo 2081-2100	205,00	2534,00	895,20 ± 510,15	0,57	6,59	882,27	908,12
Precipitación trimestre más seco (mm)	Periodo 2041-2060	0,00	1041,00	238,99 ± 240,21	1,01	3,10	232,90	245,07
	Periodo 2061-2080	0,00	1113,00	248,24 ± 246,19	0,99	3,18	242,01	254,48
	Periodo 2081-2100	0,00	1158,00	257,64 ± 254,45	0,99	3,29	251,19	264,09