

Modelado del riesgo de establecimiento de *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) en el sur del Estado de México a partir de variables agroclimáticas y fenológicas

Modeling the risk of establishment of *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) in the south of the State of Mexico from agroclimatic and phenological variables

Aurelio Pérez-Constantino¹ , José Francisco Ramírez-Dávila^{1*} , Román Mora-Gutiérrez² 

¹ Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Ciencias Agrícolas, Cerrillo Piedras Blancas s/n, km 15 carretera Toluca-Ixtlahuaca, entronque al Cerrillo, 50200, Toluca, Estado de México, México.

² Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Campus Azcapotzalco, Departamento de Sistemas, 02200, Ciudad de México, México.

*Autor para correspondencia: jframirez@uaemex.mx

Fecha de recepción:
12 de junio de 2025

Fecha de aceptación:
20 de enero de 2026

Disponible en línea:
13 de marzo de 2026

Este es un artículo en acceso abierto que se distribuye de acuerdo a los términos de la licencia Creative Commons.



**Reconocimiento-
NoComercial-
CompartirIgual 4.0
Internacional
(CC BY-NC-SA 4.0)**

Cómo citar:
Pérez-Constantino, A.,
Ramírez-Dávila, J. F.,
& Mora-Gutiérrez, R.
(2026). Modelado del
riesgo de establecimiento
de *Hypothenemus hampei*
(Ferrari) (Coleoptera:
Curculionidae: Scolytinae)
en el sur del Estado
de México a partir de
variables agroclimáticas y
fenológicas. *Acta Agrícola
y Pecuaria*, 12, e0121013.
https://doi.org/10.30973/
aap/2026.12.0121013

RESUMEN

La broca del café [*Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae)] representa una amenaza creciente para la cafecultura del sur del Estado de México. El presente estudio tuvo como objetivo desarrollar un modelo predictivo de la incidencia de esta plaga a partir de variables climáticas, topográficas y fenológicas. Se recolectaron datos de infestación, condiciones climáticas y estado fenológico del cultivo en parcelas distribuidas en tres municipios. Se aplicaron análisis de componentes principales, pruebas estadísticas y algoritmos de aprendizaje automático como redes neuronales optimizadas por programación genética. Los resultados mostraron que la humedad relativa, la madurez del fruto y la pendiente del terreno explican buena parte de la variación en los niveles de infestación. Este enfoque ofrece una base para sistemas de alerta temprana que permitan mejorar el monitoreo y manejo fitosanitario del cafeto en regiones crecientes de producción.

PALABRAS CLAVE

Broca del café, variables fenológicas, predicción de plagas, humedad relativa, redes neuronales, alerta temprana.

ABSTRACT

The coffee berry borer [*Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae)] poses an increasing threat to coffee production in southern State of Mexico. This study aimed to develop a predictive model of pest incidence using climatic, topographic, and phenological variables. Data on infestation, microclimate, and crop phenology were collected from plots in three municipalities. Principal component analysis, statistical tests, and machine learning algorithms, such as neural networks optimized with genetic programming, were applied. Results indicated that relative humidity, fruit maturity, and slope explained much of the variation in infestation levels. This approach provides a basis for early warning systems that may improve monitoring and phytosanitary management in emerging coffee-growing areas.

KEYWORDS

Coffee berry borer, phenological variables, pest prediction, relative humidity, neural networks, early warning.

INTRODUCCIÓN

La caficultura es uno de los pilares agroproductivos de México, con una superficie aproximada de 480,000 hectáreas distribuidas en 14 estados del país, principalmente Chiapas, Veracruz, Puebla y Oaxaca, que concentran más del 90 % de la producción nacional (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2024). Además de su peso económico, el café constituye la principal fuente de ingreso para más de 500,000 familias productoras, muchas de ellas de pequeña escala. En este marco de relevancia nacional, la caficultura del sur del Estado de México enfrenta múltiples desafíos asociados a factores climáticos, topográficos y biológicos que afectan directamente la producción y calidad del grano. Entre estas amenazas destaca la broca del café [*Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae)], considerada la plaga de mayor impacto económico a nivel mundial. Esta plaga se desarrolla dentro del fruto del cafeto, lo que dificulta su control y genera pérdidas significativas si no se detecta y maneja oportunamente. La hembra perfora el fruto en las etapas de desarrollo lechoso, consistente y maduro, donde establece galerías en el endospermo para alimentarse y ovipositar. Este daño directo reduce el peso y calidad del grano, mientras que la presencia de orificios y hongos asociados a causa del daño disminuye de manera significativa el valor comercial (Aristizábal et al., 2016; Jaramillo et al., 2009).

Aunque el Estado de México no es reconocido como principal productor de café a nivel nacional como Veracruz, Chiapas o Oaxaca, la caficultura mexiquense se ha convertido en una actividad estratégica para los municipios de Amatepec, Tejupilco, Temascaltepec y Sultepec, en donde representa una fuente relevante de ingresos para pequeños productores, así como de generación de empleos. Además, el creciente posicionamiento de cafés de especialidad de la zona ha elevado el valor en taza y abre nichos con sobrepresios respecto al mercado convencional, por lo que mantener condiciones fitosanitarias adecuadas es estratégico para los ingresos de los productores, como lo han señalado Pérez-Constantino et al. (2024).

Sin embargo, este potencial se ve amenazado por la creciente presencia de la broca del café, cuya dinámica poblacional en la región aún no ha sido suficientemente caracterizada (Pérez Constantino et al.,

2023). A diferencia de regiones tradicionales cafetaleras como Chiapas o Veracruz, en el Estado de México no existen suficientes estudios enfocados a entender los factores que favorecen o limitan la presencia de *H. hampei*. Algunos reportes preliminares han sugerido que esta plaga presenta patrones irregulares en cuanto a distribución y niveles de daño, lo que dificulta el diseño de estrategias eficaces de manejo preventivo (Jaramillo et al., 2009). A pesar de avances puntuales, sigue siendo escasa la información sobre los factores que favorecen o limitan su establecimiento en la zona cafetalera mexiquense.

Frente a esta problemática, resulta prioritario identificar en qué condiciones ambientales y agronómicas es probable que la broca del café se establezca o experimente aumentos en su población. En este contexto, los modelos predictivos surgen como herramientas clave para detectar o anticipar escenarios de riesgo. Dichos modelos permiten identificar relaciones entre múltiples variables climáticas, topográficas, fenológicas y la incidencia de la plaga. Comprender por qué la broca del café aparece con mayor frecuencia en ciertas zonas y en determinados momentos puede facilitar la toma de decisiones oportunas en el manejo fitosanitario del cultivo (Donatelli et al., 2017).

Estudios recientes han demostrado que el uso de modelos de predicción en sanidad vegetal permite anticipar explosiones poblacionales de plagas, definir ventanas críticas de monitoreo y focalizar las intervenciones (Damos, 2015; Donatelli et al., 2017). En este trabajo se parte de un enfoque basado en análisis multivariado, reducción de dimensionalidad mediante el análisis de componentes principales (PCA) y algoritmos de aprendizaje automático como redes neuronales profundas optimizadas con algoritmos genéticos que permiten identificar los factores con mayor peso explicativo, eliminando redundancias y mejorando el desempeño predictivo de los modelos. Estas herramientas posibilitan la construcción de modelos robustos que no solo expliquen lo que está ocurriendo, sino que también puedan predecir en qué condiciones agroclimáticas y fenológicas es más probable que ocurran brotes importantes de la plaga.

El presente trabajo tuvo como objetivo desarrollar un modelo predictivo de la incidencia de la broca del café, en cafetales del sur del Estado de México, a partir del análisis de variables climáticas, topográficas y feno-

lógicas. Para ello, se buscó identificar los principales factores asociados a su presencia, evaluar la capacidad predictiva de distintos modelos y generar una base técnica para fortalecer los sistemas de monitoreo y alerta temprana en la región. Se espera que los resultados de este estudio contribuyan al fortalecimiento de programas de manejo integrado y al aprovechamiento sostenible del potencial cafetalero del Estado de México

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en plantaciones de café en los municipios de Amatepec, Tejupilco, Temascaltepec y Tlatlaya, en el sur del Estado de México, México. Esta región cafetalera se caracteriza por estar en una altitud entre los 1,000 msnm y 2,100 msnm. El área presenta climas cálidos subhúmedo y semicálido subhúmedo, conforme a la clasificación de Koppen modificada por García, con suelos predominantemente volcánicos. Las unidades de muestreo correspondieron a parcelas de una hectárea con plantaciones de cafetos adultos en plena producción de entre 10 y 25 años, establecidos bajo sombra en un arreglo a marco real a 2×2 , pertenecientes a pequeños productores. Las variedades eran una mezcla de Typica y Caturra. Sin aplicación de insecticidas durante el periodo de evaluación.

Diseño del muestreo y recolección de datos

Se colocaron trampas artesanales tipo ECO-IAPAR (Barrera et al., 2004) (16/ha) con atrayentes a base de metanol y etanol en una porción 3:1, a 1.5 m de altura (tercio medio del dosel del cafeto), suspendidas de las bandolas, distribuidas en un arreglo sistemático en zigzag dentro de cada parcela. Se tuvo una distancia aproximada de 25 m entre trampas para cubrir homogéneamente el terreno, procurando que la trampa más cercana al borde quedara a una distancia > 10 m del perímetro para minimizar efectos de borde. El acomodo de las trampas se ajustó siguiendo el trazo de la plantación, la forma y la pendiente del terreno. Las trampas permanecieron instaladas durante todo el periodo de evaluación con reposición de atrayente

y mantenimiento o cambio de la trampa según lo requiriera.

Muestreos

Adultos capturados en las trampas fueron trasladados al laboratorio de Entomología de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, donde se realizó la identificación taxonómica mediante observación morfológica bajo estereoscopio y las claves de Baker et al. (1992) y Jaramillo et al. (2009).

El periodo de evaluación fue seleccionado dentro de la ventana de mayor susceptibilidad en las etapas fenológicas más relevantes para *H. hampei* en la región (fruto lechoso, consistente y maduro), que son los de mayor riesgo e impacto operativo para el manejo. Los muestreos se realizaron cada 15 días a partir del 15 de agosto de 2024 hasta el 28 de abril de 2025 (ciclo productivo de 9 meses), integrando un promedio mensual a partir de dos quincenas.

Medición de pendiente, altitud y orientación de la parcela

La pendiente de cada parcela se midió usando la aplicación Clinometer v.3.0 (plaincode™, Stephanskirchen, Alemania), colocando el dispositivo sobre una regla rígida alineada con la inclinación del terreno apuntando a un lugar fijo a metro y medio del suelo. Se realizaron tres mediciones por parcela, tomando el promedio como valor final. La orientación se obtuvo con la función de brújula, registrando el ángulo azimutal (0° - 360°) con respecto a la exposición del Sol. La altitud se midió de tres puntos de la parcela con un GPS Garmin eTrex 30x (Garmin Ltd., Olathe, Estados Unidos) y se registró el promedio (Cuadro 1).

Control de calidad de las mediciones

Para garantizar consistencia, la pendiente se midió con tres lecturas por parcela con el clinómetro del dispositivo, verificando el “cero” con un nivel de burbuja al inicio de cada jornada y promediando las lecturas. Dado que la pendiente se utilizó como covariable a escala de parcela (comparaciones relativas entre predios), y que las variables continuas del análisis fueron

estandarizadas al igual que en la orientación de la parcela, pequeñas desviaciones instrumentales no modificaron las relaciones evaluadas ni las conclusiones del modelo.

Fenología del cultivo

Se dio seguimiento a las etapas fenológicas (brotación, floración, fruto lechoso, consistente y maduro) durante cada muestreo. Esta información se recolectó de forma paralela al monitoreo de la broca a fin de explorar su posible relación con la incidencia de *H. hampei*. Los datos registrados fueron el número de árboles de los 16 con trampa que presentaba alguna de las etapas fenológicas mencionadas.

Manejo agronómico

Los predios se trabajaron bajo sombra parcial o media sombra y manejo semintensivo. Durante el periodo de evaluación no se aplicaron plaguicidas; las labores se limitaron a podas de mantenimiento, deschuponado y control de malezas de forma manual, siguiendo el calendario habitual de los productores.

Condiciones climáticas

Se complementó el análisis con registros de temperatura y humedad relativa obtenidos de sensores HOBO Pro v2 (Onset Computer Corporation, Bourne, Estados Unidos) colocados *in situ* y complementados con información del portal NASA Power (s. f.) para validar tendencias y establecer la presencia de condiciones favorables para el desarrollo del insecto (Cuadro 1).

Procesamiento estadístico y modelado

Cuando los modelos tradicionales como ANOVA o regresión lineal múltiple no son suficientes para explicar la complejidad de los datos, es útil recurrir a técnicas más avanzadas como el PCA, la regresión exponencial o la programación genética (James et al., 2013). El PCA permite reducir la cantidad de variables cuando estas están correlacionadas, facilitando la interpolación sin perder demasiada información. La regresión exponencial es adecuada cuando la relación entre variables muestra un crecimiento o decaimiento no lineal, mientras que la programación genética resulta útil cuando las relaciones entre variables son demasiadas complejas para modelarse con formula predefinidas.

Sección de variables y preprocesamiento

Todos los análisis estadísticos, de PCA y de aprendizaje automático se realizaron en el lenguaje de programación Python (versión 3.11). Se emplearon bibliotecas especializadas como pandas, numpy, scikit-learn y matplotlib para el procesamiento, análisis y visualización de los datos.

Se aplicó un análisis de colinealidad mediante el cálculo del factor de inflación de la varianza para eliminar variables redundantes. Posteriormente, se utilizó la prueba estadística de Mann-Whitney U para conservar solo las variables predictoras con diferencias significativas entre niveles de incidencia de broca. Las variables finales seleccionadas fueron: PENDIENTE_GRAD, PRECOTCORR, floración y etapas de desarrollo del fruto (lechoso, consistentes y maduro).

Cuadro 1. Descripción de las variables climáticas y topográficas utilizadas en el modelo predictivo de *Hypothenemus hampei*.

Variable	Significado
QV2M	Humedad específica a 2 metros de altura (g/kg)
RH2M	Humedad relativa a 2 metros de altura (%)
T2MDEW	Temperatura del punto de rocío a 2 metros (°C)
T2M	Temperatura media del aire a 2 metros (°C)
T2M_MAX	Temperatura máxima del aire a 2 metros (°C)
T2M_MIN	Temperatura mínima del aire a 2 metros (°C)
PRECOTCORR	Precipitación acumulada corregida (mm)
ALT	Altitud sobre el nivel del mar (m)
PENDIENTE_GRAD	Pendiente del terreno (grados)
ORIENT	Orientación del terreno (norte, sur, este, oeste)

Reducción de dimensionalidad

Posteriormente, se realizó un PCA para reducir la dimensionalidad, explicando el 95.37 % de la varianza con 10 componentes principales. Las variables con mayor distribución en los primeros componentes incluyeron: humedad específica, humedad relativa, temperatura del punto de rocío, altitud, pendiente del terreno y variables fenológicas como brotación, floración y madurez.

Ajuste y evaluación de modelos

Los datos fueron divididos en conjuntos de entrenamiento y prueba. Se ajustaron varios modelos: regresión lineal múltiple, regresión cuadrática, modelo sinusoidal y una red neuronal profunda optimizada mediante programación genética. Esta red incluyó cinco capas densas y se entrenó mediante validación cruzada (K-Fold), regularización por *dropout* (10 %) y *early stopping*. También se construyeron modelos polinómicos completos y modelos reducidos a partir de términos significativos ($p < 0.05$), y se evaluó su desempeño con métricas como el error cuadrático medio (MSE)

y el coeficiente de determinación (R^2). Los resultados de la comparación de MSE entre modelos se presentan en la Figura 1.

Las comparaciones entre modelos se realizaron con base en su capacidad predictiva sobre la variable de infestación de broca. Finalmente, se aplicó un análisis MANOVA para evaluar diferencias estadísticas entre niveles de incidencia (Q1 a Q4), y se generaron visualizaciones con los principales resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el periodo de muestreo se capturaron 1,853 individuos adultos de *H. hampei* en las trampas instaladas. Las mayores capturas se registraron entre los 1,200 msnm a 1,240 msnm, coincidiendo con las etapas fenológicas de fruto lechoso y maduro. Esta información biológica permitió sentar las bases para el análisis multivariado posterior, integrando la distribución espacial y temporal de la plaga en la región de estudio.

El empleo de modelos avanzados permitió evidenciar relaciones complejas entre las variables ambientales, topográficas y fenológicas, y la incidencia de *H. hampei*. El PCA reveló que 10 componentes eran suficientes para

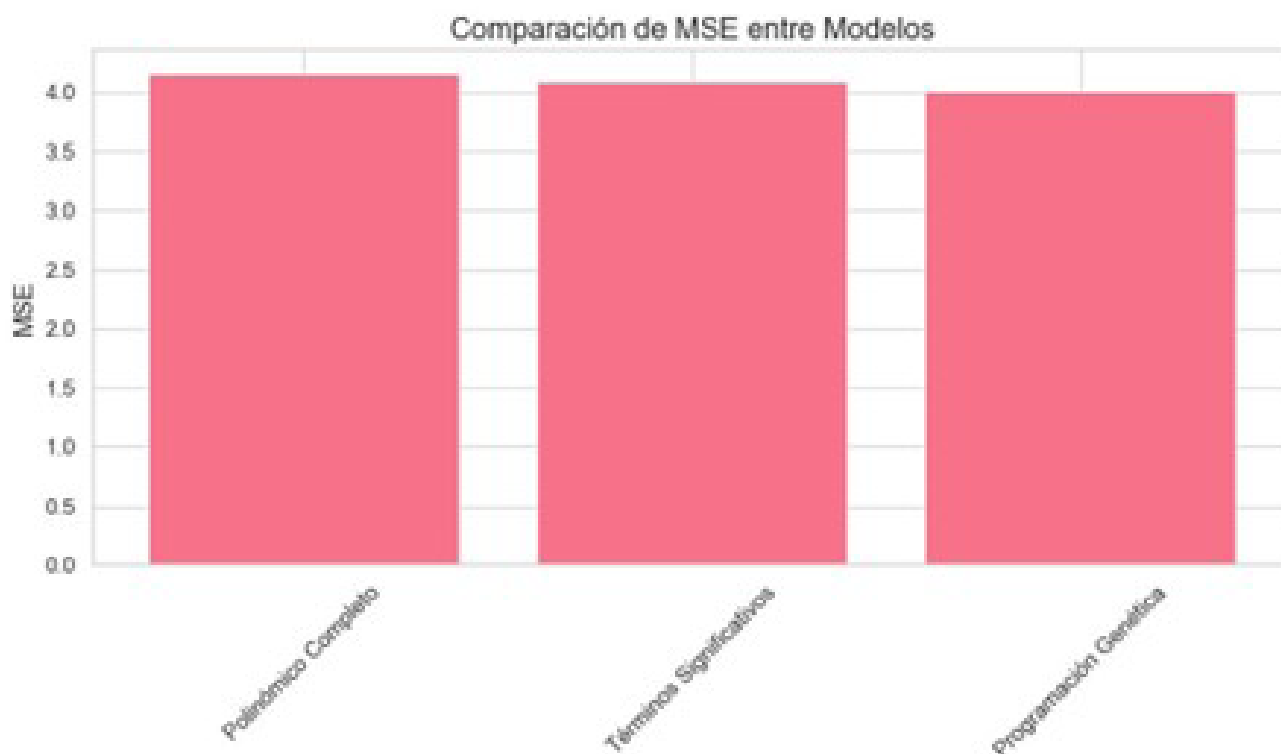


Figura 1. Comparación del error cuadrático medio (MSE) obtenido en los modelos polinómico completo, polinómico reducido a términos significativos y programación genética.

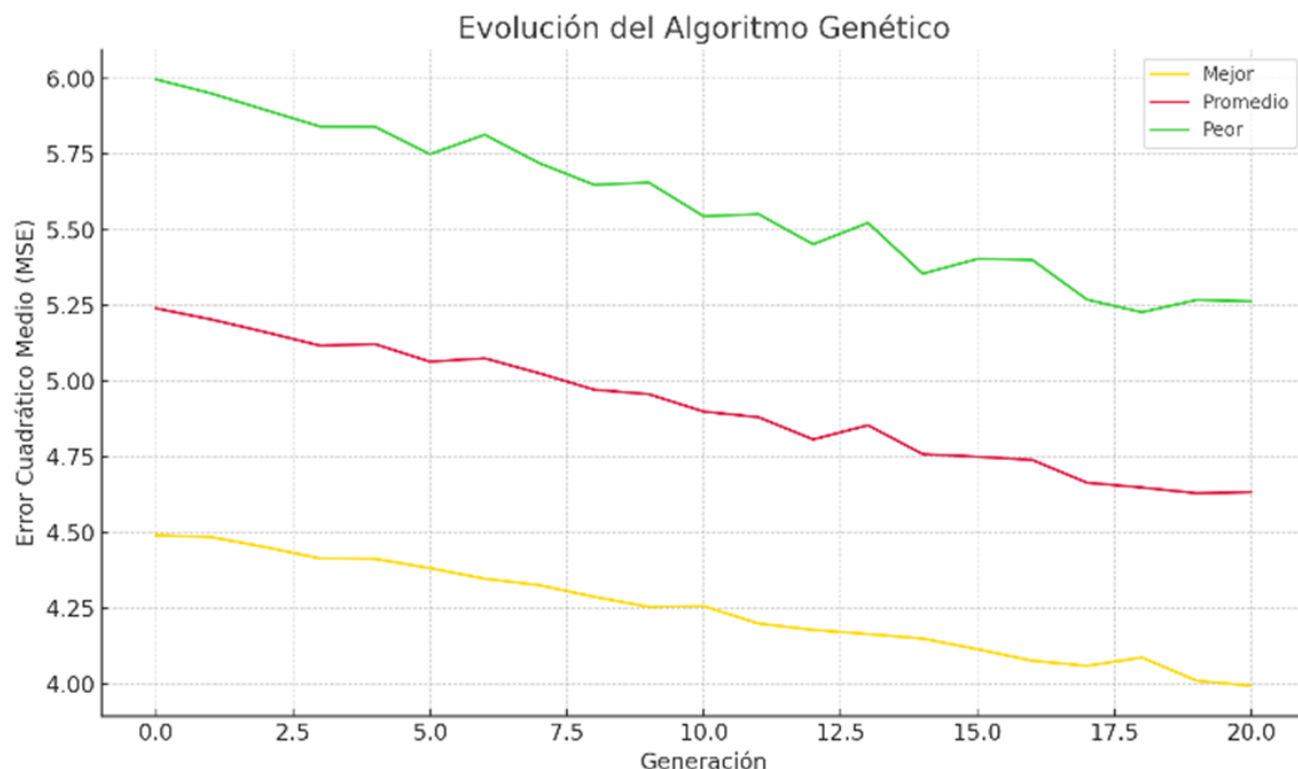


Figura 2. Evolución del error cuadrático medio (mse) durante el entrenamiento del modelo mediante programación genética.

explicar el 95.37 % de la varianza, permitiendo sintetizar una alta dimensión de variables sin pérdida significativa de información. Los primeros componentes agruparon principalmente variables de humedad (específica de humedad y humedad relativa), temperatura y altitud, así como etapas fenológicas del cultivo.

El modelo de regresión exponencial multivariable mostró un desempeño limitado ($MSE: 3.6950$, $R^2: 0.1833$), lo cual indica que, a pesar de la reducción de dimensionalidad, no logró capturar adecuadamente la variabilidad observada. En contraste, la red neuronal profunda optimizada mediante programación genética obtuvo mejores resultados ($MSE: 4.0332$, $R^2: 0.1096$), superando ligeramente a los modelos polinómicos ajustados. La Figura 2 muestra la evolución del error a lo largo de las generaciones durante el proceso de optimización genética. Se observa una tendencia descendente en el error del mejor individuo, indicando que el algoritmo fue capaz de encontrar configuraciones progresivamente más eficientes.

Los resultados del MANOVA mostraron diferencias multivariadas altamente significativas entre los niveles de infestación de broca agrupados por cuartiles (Wilks, $\Lambda = 0.4006$, $p < 0.0001$), confirmando que las variables seleccionadas permiten discriminar ade-

cuadamente entre distintas intensidades del ataque. Variables como precipitación total corregida, fruto maduro y fruto lechoso fueron las más influyentes en la diferenciación entre grupos. Como se observa en la Figura 3, variables como precipitación total, frutos maduros y frutos en estado lechoso presentaron patrones diferenciados entre los grupos de incidencia de broca. Lo que respalda su inclusión en los modelos predictivos.

Estas evidencias refuerzan la utilidad del uso combinado de PCA, pruebas estadísticas y algoritmos de inteligencia artificial en estudios fitosanitarios complejos. El enfoque empleado permitió identificar patrones ocultos y generar un modelo con capacidad predictiva razonable, aunque se reconoce que el desempeño aún puede mejorar con la incorporación de nuevas variables o el ajuste de arquitecturas más robustas.

En cuanto a la interpretación agroecológica de los resultados, el análisis multivariado permitió identificar varios factores que influyen en la presencia y severidad de la broca del café en el sur del Estado de México. Las condiciones que favorecen la infestación se relacionan principalmente con altos niveles de humedad relativa y específica; temperaturas moderadas (alrededor del punto del rocío), y la presencia de frutos en estados

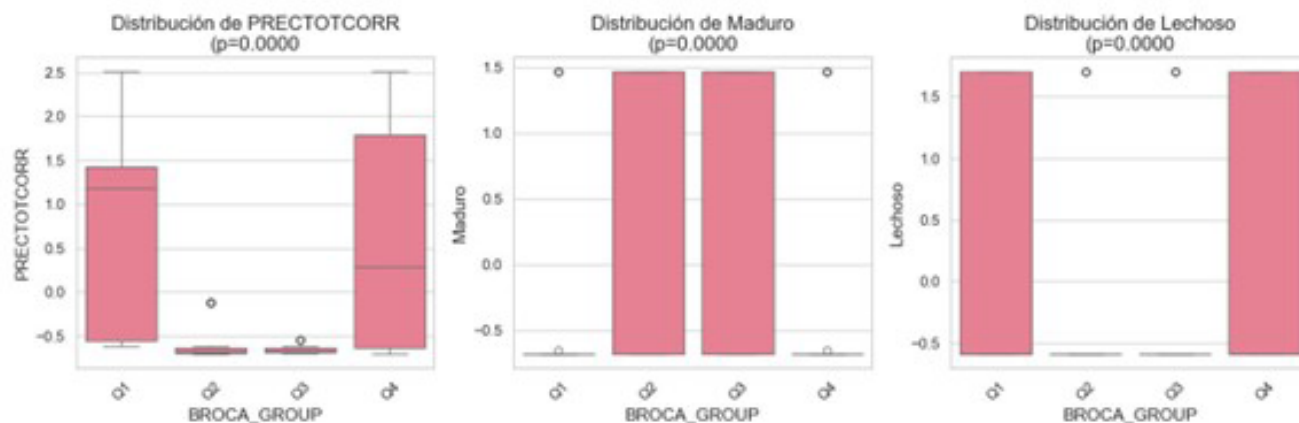


Figura 3. Distribución de las variables significativas PRECTOTCORR, maduro y lechoso en función de los grupos de incidencia de broca (Q1-Q4).

lechoso, consistente y maduro. Estas condiciones, cuando coinciden en el tiempo, crean un ambiente propicio para el desarrollo y reproducción de *H. hampei*.

Entre las variables que mostraron mayor contribución a los componentes principales estuvieron QV2M, RH2M, T2MDEW, lo que sugiere que la disponibilidad de humedad en el ambiente es un factor determinante. Asimismo, la precipitación acumulada (PRECTOTCORR) y la pendiente del terreno fueron significativas, lo cual puede estar asociado con la retención de humedad o la modificación de microclimas locales. El análisis también indica que la presencia de frutos maduros, lechosos o en transición coinciden con mayores niveles de infestación, lo cual refuerza el papel de fenología como variable clave en el momento de aparición de la plaga. Esto sugiere que los periodos críticos de monitoreo deben coincidir con estas etapas del cultivo.

En cuanto al riesgo de explosión poblacional, los modelos sugieren que cuando coinciden condiciones favorables de humedad y fenología por, al menos, dos o tres semanas consecutivas se incrementa la probabilidad de infestaciones elevadas. Aunque el modelo de red neuronal optimizada mostró un poder explicativo limitado (R^2 : 0.1086), logró detectar estos patrones complejos, lo cual representa una base útil para el desarrollo del sistema de alerta temprana.

Asimismo, la programación genética empleada permitió optimizar estructuras de predicción que, aunque modestas en su ajuste, abren la posibilidad de construir un modelo poblacional de predicción dinámica que proyecte escenarios de riesgo y ayude a responder la pregunta clave: ¿en qué condiciones y en cuánto tiempo podría detonarse una explosión poblacional de broca? Este enfoque no solo tiene valor

para planificar las acciones de control, sino también para entender la resiliencia o vulnerabilidad del agroecosistema frente al cambio climático. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de ajustar los programas de manejo con base en variables ambientales y fenológicas específicas de la región, en lugar de seguir calendarios generales.

La presencia de *H. hampei* en los cafetales del sur del Estado de México representa una amenaza directa a la economía local y a la calidad del grano, factores cruciales para su inserción en mercados de especialidad. Aunque no se han documentado pérdidas cuantitativas tan severas como en entidades con mayor tradición cafetalera, estudios realizados en zonas similares reportan mermas que oscilan entre el 20 % y 40 % en producción, así como una disminución significativa en el puntaje sensorial del café (Aristizábal et al., 2016; Jaramillo et al., 2009). Esto implica un riesgo latente para los productores mexiquenses, quienes podrían enfrentar mayores costos por monitoreo, control y pérdidas indirectas por rechazo en proceso de comercialización. Por tanto, anticipar los momentos y lugares de mayor vulnerabilidad resulta estratégico para preservar el valor agregado del café regional.

Aunque el presente estudio no tuvo como objetivo principal generar un mapa dinámico de la expansión de la broca. Los patrones identificados sugieren una posible tendencia de colonización hacia zonas medias y alta del gradiente altitudinal evaluado (1200-1500 msnm), donde las condiciones de humedad, pendiente y maduración del fruto coinciden con niveles altos de infestación. Este comportamiento sugiere un avance progresivo hacia áreas previamente consideradas de bajo riesgo. Además, los registros fenológicos aso-

ciados al incremento de capturas indican que, bajo ciertas combinaciones de clima y estado del cultivo, la población de *H. hampei* puede incrementarse en cuestión de semanas, configurando escenarios propicios para brotes localizados. Estos indicios refuerzan la necesidad de implementar monitoreos escalonados en altitud y tiempo para detectar oportunamente dichas transiciones.

Paralelamente a la identificación de factores favorables, se reconocieron variables que podrían actuar como limitantes del establecimiento o proliferación de la broca. Entre ellas se destacan fases fenológicas tempranas como la brotación, así como condiciones de baja precipitación y pendientes suaves que se asociaron a bajos niveles de infestación. Asimismo, la orientación del terreno y las temperaturas mínimas extremas, aunque no se mantuvieron como variables predictoras en los modelos finales, mostraron poca correlación con altos niveles de captura. Estos elementos podrían servir como indicadores indirectos de refugios o zonas de menor riesgo, útiles para planificar estrategias dentro de las parcelas.

En este contexto, diversos estudios han abordado la necesidad de modelos predictivos para el manejo de *H. hampei* en contextos agroecológicos complejos. Por ejemplo, De Alves et al. (2011) utilizaron análisis geoestadísticos, incluyendo krigeado ordinario, para mapear la variación espacial de la infestación por broca y el minador de hojas en cafetales, identificando focos distribuidos y patrones agregados de infestación. Estos estudios indican que variables como altitud y cobertura del dosel pueden modular correctamente las zonas de riesgo. No obstante, la precisión predictiva de estos modelos podría fortalecerse al integrarse con variables fenológicas, lo que permitiría anticipar dinámicas temporales de la población de la broca dentro de las zonas definidas.

Además, estudios como los de Jaramillo et al. (2010) han demostrado que el desarrollo, fecundidad y oviposición de la broca alcanza niveles óptimos cuando la temperatura ambiental se sitúa alrededor de 24 °C, y que los valores elevados de humedad relativa favorecen la capacidad reproductiva de la broca; de manera complementaria, también estudios oficiales del Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (2018) han demostrado que el ciclo biológico de la broca del café se extiende significati-

vamente con temperaturas más bajas, por ejemplo, de 42 días a 24 °C frente a 48 días a 23 °C. Estudios de laboratorio muestran que la emergencia de *H. hampei* aumenta significativamente cuando la humedad relativa está por encima del 90 % y la temperatura es cercana a los 20 °C. Por el contrario, con humedades bajas (< 60 %) o temperaturas extremas (> 27-30 °C), la supervivencia y oviposición disminuyen (Baker et al., 1992; Giraldo, 2018).

Estos antecedentes coinciden con los resultados obtenidos en la presente investigación, donde las variables de humedad y fenología se correlacionaron fuertemente con los niveles de infestación.

Las mayores capturas de *H. hampei* se registraron bajo temperaturas promedios de 19 °C a 23 °C y humedades relativas superiores al 80 %, condiciones predominantes en las parcelas evaluadas del sur del Estado de México. Dichas condiciones favorecieron la actividad y dispersión de la plaga, lo que concuerda con los patrones descritos en estudios previos (Giraldo, 2018; Jaramillo et al., 2009). Estos datos respaldan lo encontrado en este estudio, en donde variables como QV2M, RH2M Y T2MDEW fueron clave en los componentes principales y se correlacionaron con niveles altos de broca (Giraldo, 2018; Jaramillo et al., 2009; Jaramillo et al., 2010).

Investigaciones como la de Asfaw et al. (2019) muestran que la altitud y los sistemas de cultivo afectan significativamente la infestación y el daño del grano por la broca. De manera que los cafetales ubicados a menor altitud y en sistemas con sombra reducida tienden a presentar mayores niveles de infestación, mientras que las plantaciones establecidas en zonas más altas o con mayor cobertura arbórea registran menores densidades poblacionales de *H. hampei*. Este efecto también podría deberse a que la pendiente modifica la retención de humedad local y la exposición solar del terreno, alterando el microclima de una parcela, y afectando directamente la incidencia de las plagas y enfermedades. Por ejemplo, Bernaschini et al. (2019) demostraron que los bordes de fragmentos forestales orientados al sur reciben más radiación solar, lo que eleva la temperatura y reduce la humedad relativa, alterando la abundancia de insectos y sus enemigos naturales. Asimismo, Mosedale et al. (2024) destacan, en una revisión de modelos de microclima mecánico, cómo la topografía, incluyendo pendiente

y orientación, determina condiciones térmicas locales que pueden favorecer o inhibir las poblaciones de plagas. En nuestro estudio, detectamos que la precipitación acumulada y la pendiente del terreno explican variaciones en los niveles de infestación, lo que respalda dichas afirmaciones.

Las etapas fenológicas de los frutos, especialmente el estado lechoso y maduro, se correlacionaron con los niveles más altos de captura de broca. Estudios anteriores han reportado que la broca prefiere ovipositar en frutos maduros o en desarrollo, lo que coincide con lo obtenido en campo (Constantino Chuaire et al., 2024).

Un tema preocupante para la región cafetalera mexiquense, que ha tomado relevancia por su calidad en taza, es la expansión geográfica de la plaga. La literatura destaca la expansión de la broca a elevadas altitudes, impulsada por el calentamiento global. En Guatemala, México y especialmente en Etiopía, se ha observado que la plaga coloniza zonas mayores de 1,700 msnm durante eventos del niño o temperaturas elevadas (Godfrey et al., 2018) como lo ocurrido en años recientes, estos fenómenos meteorológicos coinciden con el primer reporte de broca en esta entidad en 2019 (Pérez Constantino et al., 2023). Los resultados obtenidos en este estudio, indican una posible colonización de áreas medias y altas del gradiente altitudinal evaluado (1,200-1,500 msnm), donde la broca puede explosionar poblacionalmente en cuestión de semanas durante condiciones climáticas favorables. En este sentido, casos como el del escarabajo del pino (*Dendroctonus ponderosae* Hopkins), en Canadá, o el incremento de poblaciones de trips, en zonas áridas de África, han sido utilizados como ejemplos del impacto del cambio climático sobre la dinámica de plagas. Estos patrones refuerzan la noción de que el cambio climático genera nuevas oportunidades ecológicas para plagas agrícolas. En este contexto, Jo et al. (2017) modelaron estos fenómenos mediante redes neuronales y concluyeron que las zonas de transición climática serán las más vulnerables.

En términos metodológicos, estudios han explorado el uso combinado de PCA y redes neuronales artificiales para modelar la incidencia de plagas en sistemas agrícolas complejos. Por ejemplo, Campos et al. (2022) desarrollaron un marco inteligente de decisión que integra PCA y redes neuronales para predecir la incidencia de trips en cultivos de plátano orgánico,

en la región norte del Perú, demostrando que la reducción de dimensionalidad mejora la interpretación del sistema sin comprometer su capacidad predictiva. De manera complementaria, Almeyda et al. (2020) también aplicaron esta estrategia en sistemas de plátano, destacando el potencial de estas técnicas para optimizar la precisión de modelos predictivos. El presente enfoque se alinea con dicha estrategia, ya que el PCA permitió identificar las variables más relevantes, eliminar redundancias y optimizar, así, el desempeño del modelo neuronal.

Finalmente, investigaciones recientes han demostrado que los algoritmos evolutivos como la programación genética o variantes avanzadas de algoritmos genéticos pueden calibrar de manera eficiente modelos no lineales complejos, especialmente en escenarios donde las relaciones entre variables no responden a patrones clásicos. Por ejemplo, Virgolin (2020) desarrolló e implementó un algoritmo evolutivo de mezcla óptima de *pool* génicos que ajusta modelos predictivos complejos sin sobreajuste y que mantiene interpretabilidad. De igual manera, Shi et al. (2024) presentaron un sistema de programación genética basado en árboles que optimiza estructuras y parámetros simultáneamente, resaltando su aplicación en múltiples dominios. En este caso, la combinación de análisis estadístico, reducción de dimensionalidad y algoritmos evolutivos ofreció una visión integral del fenómeno y permitió construir una herramienta con potencial de alerta temprana en sistemas agrícolas complejos.

CONCLUSIONES

La incidencia de *Hypothenemus hampei* en el sur del Estado de México estuvo principalmente asociada con la humedad relativa, humedad específica, precipitación acumulada, pendiente del terreno y las etapas fenológicas del fruto, especialmente el estado lechoso y maduro. El análisis de componentes principales permitió identificar las variables con mayor contribución a la variación observada en los niveles de infestación, reduciendo de manera efectiva la dimensionalidad del conjunto de datos. Los modelos predictivos desarrollados mostraron capacidad para estimar patrones de infestación bajo las condiciones agroecológicas evaluadas. La integración de variables agroclimáticas, topográficas y fenológicas constituye una herramienta

útil para anticipar escenarios de riesgo y fortalece la toma de decisiones en el manejo preventivo de la broca del café en la región. Asimismo, los modelos sugieren un posible incremento en la incidencia de la broca cuando coinciden periodos de alta humedad, presencia de frutos maduros y temperaturas intermedias; aunque esta relación requiere validación con series temporales más detalladas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por su apoyo económico a través del Programa Investigadoras e Investigadores COMECYT para el proyecto, folio: CAT2024-0040, que permitió la realización de esta investigación en pro del campo mexiquense. A los cafecultores de Amatepec, Tlatlaya y Sultepec por permitir el acceso a sus parcelas y apoyar durante las actividades. Al personal del Comité Estatal de Sanidad Vegetal del Estado de México por su colaboración en campo y respaldo técnico.

LITERATURA CITADA

- Almeyda, E., Paiva, J., & Ipanaqué, W. (2020). Pest incidence prediction in organic banana crops with machine learning techniques. *Proceedings of the 2020 IEEE Engineering International Research Conference*. <https://doi.org/10.1109/EIRCON51178.2020.9254034>
- Aristizábal, L. F., Bustillo, A. E., & Arthurs, S. P. (2016). Integrated pest management of coffee berry borer: Strategies from Latin America that could be useful for coffee farmers in Hawaii. *Insects*, 7(1), 6. <https://doi.org/10.3390/insects7010006>
- Asfaw, E., Mendesil, E., & Mohammed, A. (2019). Altitude and coffee production systems influence extent of infestation and bean damage by the coffee berry borer. *Archives of Phytopathology and Plant Protection*, 52(1-2), 170-183. <https://doi.org/10.1080/03235408.2019.1594541>
- Baker, P. S., Barrera, J. F., & Rivas, A. (1992). Life-history studies of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*, Scolytidae) on coffee trees in southern Mexico. *Journal of Applied Ecology*, 29(3), 656-662. <https://doi.org/10.2307/2404473>
- Barrera, J. F., Villacorta, A., & Herrera, J. (2004). Fluctuación estacional de las capturas de la broca del café (*Hypothenemus hampei*) con trampas de etanol-metanol e implicaciones sobre el número de trampas. *Entomología Mexicana*, 3, 540-544.
- Bernaschini, M. L., Trumper, E., Valladares, G., & Salvo, A. (2019). Are all edges equal? Microclimatic conditions, geographical orientation and biological implications in a fragmented forest. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 280, 142-151. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.04.035>
- Campos, J. C., Manrique-Silupú, J., Dorneanu, B., Ipanaqué, W., & Arellano-García, H. A. (2022). A smart decision framework for the prediction of thrips incidence in organic banana crops. *Ecological Modelling*, 473, 110147. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110147>
- Constantino Chuaire, L. M., Peña Quiñones, A. J., Ramírez Carabalí, C., Imbach Quinchua, L. C., & Benavides Machado, P. (2024). El clima y su relación con la dinámica poblacional y dispersión de la broca del café *Hypothenemus hampei* en un gradiente altitudinal en la cuenca del río Risaralda, Caldas, Colombia. *Revista Colombiana de Entomología*, 50(1), e12946. <https://doi.org/10.25100/socolen.v50i1.12946>
- Damos, P. (2015). Modular structure of web-based decision support systems for integrated pest management: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 1347-1372. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0319-9>
- De Alves, M. C., Da Silva, F. M., Moraes, J. C., Pozza, E. A., de Oliveira, M. S., Souza, J. C. S., & Alves, L. S. (2011). Geostatistical analysis of the spatial variation of the berry borer and leaf miner in a coffee agroecosystem. *Precision Agriculture*, 12, 18-31. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9151-z>
- Donatelli, M., Magarey, R. D., Bregaglio, S., Willocquet, L., Whish, J. P. M., & Savary, S. (2017). Modelling the impacts of pests and diseases on agricultural systems. *Agricultural Systems*, 155, 213-224. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.019>
- Giraldo, J. (2018). Efecto de la humedad relativa sobre la duración y sobrevivencia de *Hypothenemus hampei* en dieta artificial Cenibroca. *Cenicafé*, 69(1), 32-39.
- Godfrey, K. H., Kucel, P., Kobusinge, J., Nicholas, O. D., Lilian, N., & William, W. W. (2018). Predicting the response of insect pests and diseases of Arabica coffee to climate change along an altitudinal gradient in Mt. Elgon Region, Uganda. *Journal of Agriculture and Environmental Sciences*, 7(1), 134-140. <https://doi.org/10.15640/jaes.v7n1a14>

- James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R*. Springer.
- Jaramillo, J., Chabi-Olaye, A., Kamonjo, C., Jaramillo, A., Vega, F. E., Poehling, H.-M., & Borgemeister, C. (2009). Thermal tolerance of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*: Predictions of climate change impact on a tropical insect pest. *PLoS ONE*, 4(8), e6487. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006487>
- Jaramillo, J., Chabi-Olaye, A., & Borgemeister, C. (2010). Temperature-dependent development and emergence pattern of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) from coffee berries. *Journal of Economic Entomology*, 103(4), 1159-1165. <https://doi.org/10.1603/EC09408>
- Jo, W. S., Kim, H.-Y., & Kim, B.-J. (2017). Climate change alters diffusion of forest pest: A model study. *Journal of the Korean Physical Society*, 70, 108-115. <https://doi.org/10.3938/jkps.70.108>
- Mosedale, J. R., Eyre, D., Korycinska, A., Everatt, M., Grant, S., Trew, B., Kaye, N., Hemming, D., & Maclean, I. M. D. (2024). Mechanistic microclimate models and plant pest risk modelling. *Journal of Pest Science*, 97(4), 1749-1766. <https://doi.org/10.1007/s10340-024-01777-y>
- NASA Power. (S. f.). *Data Access Viewer* (Versión v2.5.37) [Aplicación web]. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Pérez Constantino, A., Ramírez Dávila, J. F., & Figueroa Figueroa, D. K. (2023). Infestación de broca del café, *Hypotenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) en zonas cafetaleras del Estado de México, México. *Revista Colombiana de Entomología*, 49(1), e12097. <https://doi.org/10.25100/socolen.v49i1.12097>
- Pérez-Constantino, A., Ramírez-Dávila, J. F., Gutiérrez-Rodríguez, F., & de Jesús Pérez-López, D. (2024). Comportamiento espacial de roya del cafeto en Sultepec, Estado de México, México. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 10(1), e0101004. <https://doi.org/10.30973/aap/2024.10.0101004>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2018). *Ficha técnica: Broca del café (Hypothenemus hampei)*. SENASICA. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/419422/FT_BrocaCafe.pdf
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Anuario estadístico de la producción agrícola*. SIAP. <https://www.gob.mx/siap>
- Shi, X., Minku, L. L., & Yao, X. (2024). Tree-based genetic programming for evolutionary analog circuit with approximate shapley value. En M. Bramer & F. Stahl. (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science*, 15446, 253-267. https://doi.org/10.1007/978-3-031-77915-2_18
- Virgolin, M. (2020). *Design and application of gene-pool optimal mixing evolutionary algorithms for genetic programming* [Tesis doctoral]. Delft University of Technology. <https://doi.org/10.4233/uuid:03641b5f-f8f6-4ff9-be7f-11948f6d3cc7>