

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

Climate and its relationship with the population dynamics and dispersion of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* in an altitudinal gradient in the Risaralda River basin, Caldas, Colombia

 LUIS MIGUEL CONSTANTINO CHUAIRE^{1*}  ANDRÉS JAVIER PEÑA QUIÑONES²  CAROLINA RAMÍREZ CARABALÍ¹  LUIS CARLOS IMBACHI QUINCHUA¹  PABLO BENAVIDES MACHADO¹

¹ Centro Nacional de Investigaciones de Café, [Cenicafé], Manizales, Colombia. luismiguel.constantino@cafedecolombia.com carolina.ramirez@cafedecolombia.com luis.imbachi@cafedecolombia.com pablo.benavides@cafedecolombia.com

² Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria [Agrosavia], Puerto López, Colombia. apena@agrosavia.co

* Autor de correspondencia

Centro Nacional de Investigaciones de Café, [Cenicafé]. Sede principal Pedro Uribe Mejía, km. 4 vía Chinchiná-Manizales. Manizales (Caldas) – Colombia.

Citación sugerida

Constantino Chuaire, L. M., Peña Quiñones, A. J., Ramírez Carabalí, C., Imbachi 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>

Received: 06-May-2023

Accepted: 13-Feb-2024

Published: 11-Jun-2024

Editor temático

Ricardo Pérez Álvarez, Universidad de Hannover, Hannover, Alemania.

Revista Colombiana de Entomología

ISSN (Print): 0120-0488

ISSN (On Line): 2665-4385

<https://revistacolombianaentomologia.univalle.edu.co>

Open access



BY-NC-SA 4.0
creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Publishers: Sociedad Colombiana de Entomología SOCOLEN (Bogotá, D. C., Colombia)
<https://www.socolen.org.co>
Universidad del Valle (Cali, Colombia)
<https://www.univalle.edu.co>

Resumen: Se estudió la dinámica poblacional de la Broca del Café (BC) *Hypothenemus hampei* bajo diferentes condiciones climáticas y altitudinales, en cinco parcelas de *Coffea arabica*, con una densidad de 5.000 árboles en un gradiente altitudinal, donde se instalaron estaciones meteorológicas. En cada parcela se seleccionaron 30 árboles aleatoriamente y se evaluaron los niveles de infestación, dispersión y densidad poblacional, cada mes durante 3 años. Los resultados mostraron un incremento del 23,9 %, 20,2 % y 5,9 % de infestación de BC a 1.132 m durante tres periodos: El Niño, Neutro y La Niña, respectivamente, en contraste con 5,3 %, 2,1% y 2, 5% de infestación a 1.822 m. El número promedio de individuos de broca por árbol durante un periodo El Niño fue de 1.850, en comparación a 1.376 y 629 individuos durante un periodo Neutro y La Niña. La temperatura mostró un incremento de 2,5 °C por encima del promedio histórico por efectos del fenómeno El Niño. La dispersión de broca mostró una relación positiva y negativa de tipo exponencial con la temperatura y la altitud, que significó totales acumulados de 2'815.332 individuos capturados en trampas durante el periodo El Niño, en comparación con 1'650.897 en el periodo neutro y 173.814 en La Niña. Se presentó una epizootia natural del hongo *Beauveria bassiana* que ocasionó mortalidades entre 85 % y 95 % en las poblaciones de broca. Los transectos altitudinales en una misma cuenca hidrográfica sirven para entender las interacciones entre las plagas, el clima y sus enemigos naturales, que permiten generar alertas tempranas para desarrollar estrategias de control.

Palabras clave: Alerta temprana, cambio climático, *Coffea arabica*, entomopatógenos, plagas, temperatura.

Abstract: The population dynamics of the Coffee Berry Borer (CBB), *Hypothenemus hampei* was studied under different climatic and altitudinal conditions, in five *Coffea arabica* plots, with a density of 5,000 trees in an altitudinal gradient, where meteorological stations were installed. In each plot, 30 trees were randomly selected, and the levels of infestation, dispersion and population density were evaluated every month for 3 years. The results showed an increase of 23.9 %, 20.2 % and 5.9 % of CBB infestation at 1,132 m during an El Niño, Neutral and La Niña period respectively, in contrast to 5.3 %, 2.1 % and 2.5 % infestation at 1,822 m. The average number of CBB individuals per tree during an El Niño period was 1,850, compared to 1,376 and 629 individuals during a Neutral and La Niña period. The temperature showed an increase of 2.5°C above the historical average due to the effects of the El Niño phenomenon. CBB dispersal showed a positive and negative exponential relationship with temperature and altitude, with a cumulative total of 2'815,332 individuals caught in traps during the El Niño period, compared to 1'650,897 and 173,814 in a Neutral and La Niña period, respectively. There was a natural epizootic of the *Beauveria bassiana* fungus that caused mortalities between 85 % and 95 % in the CBB populations. Altitudinal transects in the same hydrographic basin serve to understand the interactions between pests, the climate, and their natural enemies, which allow generating early warnings to develop control strategies.

Keywords: Climate change, *Coffea arabica*, early warning, entomopathogens, pests, temperature.

Introducción

La broca del café *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) es la principal plaga del cultivo del café en Colombia y el mundo (Infante et al., 2023). El daño económico causado por la broca del café se da por la caída prematura de los frutos jóvenes infestados por el insecto, causando su pérdida total; y los frutos más desarrollados infestados que permanecen en el árbol hasta la cosecha, ocasionan que estos sean de menor valor comercial, causando disminución en el peso del grano, y reduciendo la calidad en taza de café (Benavides et al., 2013). Actualmente esta plaga afecta cerca de 850.000 hectáreas de café sembradas en las tres cordilleras del país, en el rango altitudinal óptimo para el cultivo entre 1.000-2.000 m, afectando el patrimonio de más de medio millón de familias cafeteras (Bustillo, 2007, 2008, Infante et al., 2023).

La creciente globalización de los mercados, junto con el aumento de las temperaturas debido al cambio climático, han dado lugar a una situación favorable para el desplazamiento y el establecimiento de las plagas. Las pruebas evaluadas indican que el cambio climático ya ha ampliado la variedad de especies hospedadoras y la distribución geográfica de algunas plagas, y puede aumentar aún más el riesgo de introducción de plagas en nuevas zonas (CIPF-FAO, 2021). Estudios recientes, han puesto de manifiesto la vulnerabilidad de la agricultura frente a eventos climáticos de diversa índole, incluidos los efectos del clima en las cosechas como resultado del incremento de plagas y enfermedades (Contreras & Galindo, 2009). Dentro de este contexto, las variaciones del clima año tras año en el país están en gran medida determinadas por la ocurrencia de fenómenos de diversa naturaleza, capaces de generar cambios en los patrones atmosféricos a mediana y gran escala. Específicamente, el clima de la zona cafetera colombiana está ligado principalmente con la presencia de condiciones El Niño y La Niña sobre el Pacífico Ecuatorial (Gaitán et al., 2016; Ramírez et al., 2013; Góngora et al., 2023). Entre los años 2009 y 2011 los precios internacionales del café se incrementaron un 160 % debido a la dramática reducción de la producción en los países productores de Latinoamérica, particularmente en Colombia, atribuido en gran medida a una condición climática anómala, en este caso por un exceso de lluvias producto de La Niña (Jaramillo et al., 2011), dando lugar a aumentos significativos en la incidencia de enfermedades como el caso de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) que causaron un 26 % de disminución en la producción con respecto al promedio histórico (Rivillas et al., 2011).

Según la organización Internacional del café, la variación significativa en los valores de los elementos del clima a escala local es la principal responsable de las actuales oscilaciones de producción de café en el mundo, específicamente por la influencia del ENOS, El Niño Oscilación del Sur por sus siglas en español (Jaramillo et al., 2011). Los períodos en donde predomina La Niña se caracterizan por un aumento en las precipitaciones, una disminución en el número de horas de brillo solar (como consecuencia de aumentos en la nubosidad) y reducción de la temperatura del aire; y como consecuencia, afectaciones negativas en el crecimiento vegetativo y reproductivo y, por ende, la producción de la planta de café (Gaitán et al., 2016).

Por otro lado, cuando se presentan eventos como El Niño, es decir el calentamiento sostenido del océano pacífico ecuatorial entre 0,5 °C y 2,3 °C, algunas zonas del país sufren

disminución de las lluvias y el incremento en las temperaturas (Ramírez et al., 2014). Para la zona cafetera se presenta un incremento de la temperatura media del aire de entre 1 °C y 2 °C y la precipitación disminuye en un 15 % en toda la zona andina (Ruiz & Melo, 2023).

Varios estudios han demostrado que el cambio climático está modificando la distribución de las plagas y enfermedades de las plantas, principalmente con el incremento de las temperaturas del aire, que favorecerá de manera especial a los insectos que son invasores más que a los endémicos, ya que tienen mayor capacidad adaptativa a extremos de temperaturas y por tanto muestran una mayor plasticidad ecológica (Contreras & Galindo, 2009). Los cambios biológicos relacionados con el cambio climático mejor documentados son los cambios en la distribución espacial de los insectos y cambios en su fenología, movimiento de sus rangos de distribución a elevaciones y latitudes superiores (Van der Putten et al., 2010) y están determinados por la oferta ambiental, especialmente las condiciones de temperatura y humedad del aire disponibles para el crecimiento y la reproducción de las especies (Jaramillo et al., 2010). A escala global, los patrones estacionales de temperatura y precipitación constituyen los factores principales para determinar la distribución de organismos en el espacio. Generalmente se ha podido demostrar que los denominados “brotes” de insectos plaga exóticos en zonas templadas y tropicales, han sido subsecuentes a periodos de sequía por eventos climáticos extremos o combinaciones de sequía y humedad excesiva (Wallner, 1987, CIPF-FAO, 2021).

A nivel mundial estos cambios en el incremento de la temperatura pueden ocasionar cambios de adaptación en las poblaciones de los insectos entre los diferentes rangos altitudinales, tales como cambios en el comportamiento con sus hospedantes, generar alteraciones y desfases en la sincronización de periodos de actividad de insectos huésped e insectos parasitoides, así como afectar el crecimiento y abundancia, la supervivencia, las tasas de alimentación y ciclos de vida de los insectos herbívoros (Hill et al., 2011; Menéndez, 2007; Parmesan, 2006; Walther et al., 2002; Constantino, 2020). Es importante recordar que toda especie de insecto presenta una temperatura base o umbral inferior, bajo la cual no puede desarrollarse (Giraldo et al., 2018). Asimismo, se da una temperatura umbral superior sobre la cual el desarrollo se detiene. Para el caso de la broca del café se ha estimado como la temperatura base inferior 16,6 °C y en 32 °C la temperatura base superior (Jaramillo, 2009). Este rango óptimo de temperatura para la broca del café indica que la broca se puede adaptar bien en todo el rango altitudinal favorable para el cultivo de café en Colombia (Góngora et al., 2023)

Son pocos los estudios que documenten el comportamiento de la broca del café por rango altitudinal con las variables climáticas (Bacca et al., 2021; Hamilton et al., 2019; Constantino et al., 2021a; Whittaker et al., 2024) y sus enemigos naturales en condiciones de campo. La mayoría de estudios sobre el ciclo de vida del insecto se han realizado bajo condiciones controladas de temperatura y humedad en laboratorio para estudiar el ciclo de vida y realizar modelaciones de la tasa de desarrollo del insecto en función de la temperatura para su aplicación en el manejo integrado de plagas (Marco, 2001), o evaluando el efecto del microclima en la emergencia de la broca del café en cultivos a libre exposición solar o sombra (Constantino et al. 2021b; García-Méndez et al., 2024) o en función de los requerimientos térmicos o grados días acumulados para generar mapas de vulnerabilidad (Giraldo

et al., 2018, 2019; Hamilton et al., 2019; Jaramillo et al., 2009; Ramírez et al., 2015; Góngora et al., 2023).

Por lo tanto, el objetivo del presente estudio fue obtener la información necesaria acerca de los efectos del clima y la altitud sobre el desarrollo y comportamiento poblacional de la broca del café, para establecer sus riesgos, los métodos y el momento oportuno de su control. Este objetivo planteó tres preguntas de investigación que se debieron resolver. ¿En qué períodos se da la mayor densidad e incidencia de la broca del café? ¿Cuál es la relación entre la densidad poblacional de la broca del café con las variables del clima en un rango altitudinal de 1.100 hasta 1.800 m s.n.m? y ¿Cuál es el nivel de lluvia, temperatura, amplitud térmica, brillo solar y humedad relativa óptima que favorecen la incidencia y dispersión de la broca del café en cada piso térmico?

Por lo tanto, el conocimiento de la variación natural del clima y de los impactos de la variabilidad climática sobre los insectos, plaga y benéficos en condiciones naturales, constituyen un tema importante tanto para la prevención de problemas fitosanitarios como para el desarrollo de estrategias de adaptación a los cambios esperados que permitan identificar zonas de mayor y menor riesgo frente a la variabilidad climática, a la vez que ayuden a la regionalización de las recomendaciones para la caficultura en Colombia ante eventos futuros de cambio climático.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El presente estudio de monitoreo poblacional de la broca del café *Hypothenemus hampei* se realizó en un gradiente altitudinal ubicado en la cuenca del río Risaralda, en la vertiente oeste de la cordillera central en el departamento de Caldas, Colombia (Tabla 1; Figura 1).

Selección de las parcelas de monitoreo de broca del café

Se seleccionaron cinco parcelas sembradas con café *Coffea arabica* var. Castillo® de primera cosecha, con una densidad de 5.000 árboles por hectárea cada una (parcelas de monitoreo). En la Tabla 1 se resumen las localidades, coordenadas y altitudes seleccionadas en un rango altitudinal entre 1.132 m hasta 1.822 m, ubicadas cada 200 metros de altitud. En cada parcela de monitoreo se instaló una estación meteorológica automática (Figura 2) con sus respectivos sensores de temperatura, humedad relativa, radiación global y precipitación. Los sensores registraban datos cada cinco minutos, y se utilizaron para calcular las variables climáticas a nivel diario.

Evaluación de los porcentajes de infestación de broca del café *Hypothenemus hampei* por rango altitudinal y escenario climático

Para determinar los porcentajes de infestación de la broca del café, cada mes, durante todo el período del estudio (tres años), se seleccionaron aleatoriamente 30 árboles de café. De cada árbol se registró el número total de ramas productivas; de ellas se tomaron dos de la parte media (con el mayor número de frutos detectado visualmente), para registrar el número de frutos presentes y el número de frutos perforados por broca. Con esta información se estimó el porcentaje de infestación promedio por árbol (variable de interés). Las diferencias en el tamaño muestral (N) entre diferentes períodos climáticos (El Niño, La Niña y Neutro) obedece a que el número de meses secos (El Niño) lluviosos (La Niña) y normales (Neutro) no fueron iguales durante el presente estudio, teniendo 19 meses con periodo El Niño, 5 meses con periodo La Niña y 17 meses con periodo Neutro.

Estimación de la densidad poblacional de la broca del café

En cada parcela, en las ramas de los 30 árboles seleccionados para la estimación de la infestación, se recogieron aleatoriamente 100 frutos perforados por broca, además se recogieron del plato de estos árboles, la totalidad de frutos perforados en el suelo. Estos frutos se abrieron con una cuchilla de bisturí bajo un estereoscopio marca Zeiss 2000-C para registrar el número de individuos de broca presentes en cada estado de desarrollo (huevos, larvas, pupas y adultos).

Con el registro del número de estados de broca en los frutos del árbol y en el suelo, se estimó a través del total poblacional, el número de brocas presentes en el lote en cada fecha de evaluación. Con esta información se obtuvo la densidad poblacional de broca por árbol (promedio de adultos y estados biológicos) y su varianza, al multiplicar el número promedio de ramas productivas, el número promedio de frutos infestados por rama y los estados biológicos de broca por fruto; para luego construir las gráficas de crecimiento poblacional por ciclo productivo.

Registro de los vuelos y dispersión de la broca del café

Para evaluar la dispersión de la broca del café a través del tiempo y conocer las épocas de vuelo en cada parcela, se instalaron 20 trampas de embudos múltiples de color rojo cebadas con metanol:etanol en una proporción de 3:1 dentro de los lotes de café dispuestas cada 20 metros de distancia entre sí,

Tabla 1. Ubicación de las parcelas experimentales con estaciones meteorológicas automatizadas en un transecto altitudinal en la cuenca del río Risaralda, Caldas, Colombia.

Estación	Municipio	Vereda	Coordenadas		Altitud (m)
Filo Bonito	Belalcázar	La Betulia	04°59'11"N	75°50'45"W	1.132
La Floresta	Belalcázar	Buenos Aires	04°58'45"N	75° 50'01"W	1.331
Las Tangas	Belalcázar	Alto Bonito	05°21'26"N	75°48'28"W	1.555
El Paraiso	San José	Buena Vista	05°05'42"N	75°47'30"W	1.749
La Elva	Anserma	Campo Alegre	05°11'27"N	75°46'23"W	1.822

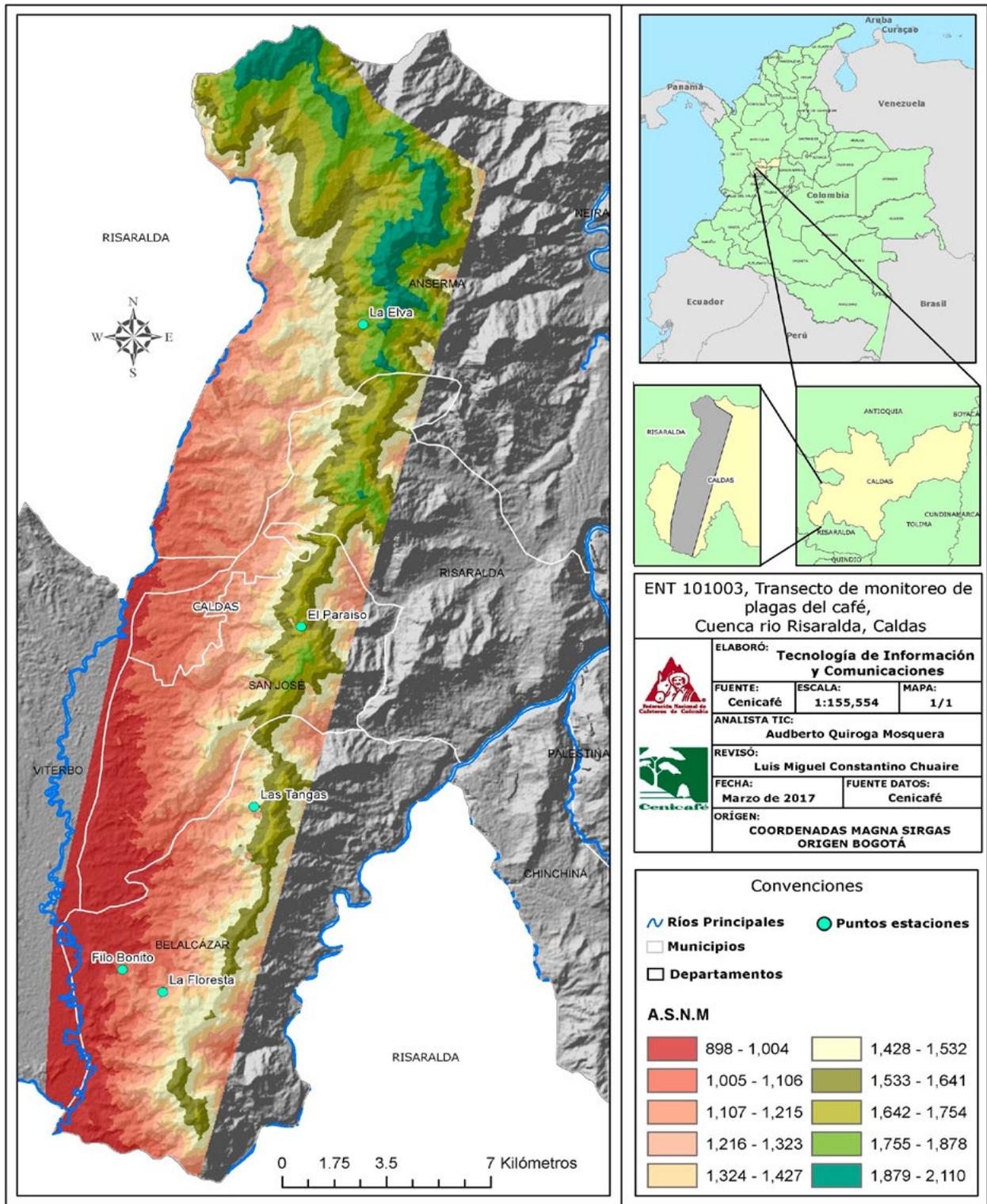


Figura 1. Mapa con la ubicación de las parcelas experimentales y las estaciones meteorológicas automáticas de Cenicafé sobre la cuenca del río Risaralda, Caldas.

colgadas de las ramas de los árboles de café a una altura de 1 metro del suelo para la captura de adultos de broca (Figura 2C). Con esta información se estableció la relación entre adultos de broca capturados en trampas de alcohol y el comportamiento de la infestación por broca en los frutos de café por rango altitudinal y su relación con las variables climáticas (periodos El Niño, La Niña, Neutro).

Registro del número de frutos de café caídos en el suelo a través del tiempo

Con el fin de cuantificar el número de frutos de café caídos al suelo, de cada uno de los 30 árboles seleccionados aleatoriamente para estimar el porcentaje de infestación, se contabilizó el número total de frutos en el suelo y el número de estos brocados con una periodicidad de conteo mensual.



Figura 2. A. Transecto altitudinal en la cuenca del río Risaralda, Caldas. B. Estación meteorológica automática, ubicada en el cafetal. C. trampa de embudo múltiple cebada con metanol:etanol para la captura de adultos de broca. D. Recolección de adultos de broca capturados. E. Separación de las muestras de cada trampa. F. Conteo de brocas con cifras récord de dos millones ochocientos mil individuos capturados con trampas de alcohol durante un periodo El Niño.

Estos frutos fueron abiertos con una cuchilla de bisturí bajo un estereoscopio y se contabilizó el número total de estados de broca presentes dentro de las almendras de café correspondiente a huevos, larvas, pupas y adultos.

Evaluación de los porcentajes de mortalidad natural de adultos de broca por el hongo *Beauveria bassiana*

En cada parcela, de los 100 frutos perforados por broca recogidos de las ramas de los árboles de café, se abrieron con un bisturí bajo un estereoscopio marca Zeiss 2000-C para contabilizar el número de adultos de broca vivos y aquellos muertos con el hongo entomopatógeno *Beauveria bassiana*, con desarrollo micelial visible sobre los individuos muertos.

Análisis estadístico

Para los análisis de infestación, densidad poblacional e incidencia de la broca del café en cada parcela de monitoreo y rango altitudinal (variable de interés), se compararon los promedios y variación con cada una de las variables de respuesta (temperatura, humedad relativa, precipitación) (variables complementarias) por medio de un análisis de varianza (ANOVA), para el modelo asociado al diseño experimental completamente aleatorio, con su respectivo intervalo y con un coeficiente de confianza del 95 %, en cada fecha de evaluación, mediante el programa estadístico SAS® v.9.0

(SAS Institute Inc., 2007). Por cada altitud se tomaron los registros de temperatura media diaria (°C), humedad relativa (% HR) y precipitación (mm) diaria, y se procedió a identificar la diferencia de estas variables climáticas entre lotes y rango altitudinal, mediante una prueba de rango múltiple al 5 % para infestación de broca por altitud. Se realizó igualmente un análisis de regresión lineal simple y múltiple, en función de la temperatura media del aire para la broca del café y se establecieron relaciones lineales o no lineales, entre cada una de las variables de respuesta en cada altitud y periodo climático (densidad, infestación y vuelos de broca del café). Por su parte, la variable porcentaje de infestación se comparó con los promedios de densidad poblacional para determinar las diferencias entre pisos térmicos y su interacción en función de la temperatura media del aire, humedad relativa y precipitación.

Resultados

Porcentajes de infestación de broca del café *Hypothenemus hampei* por rango altitudinal y escenario climático

En la Tabla 2 y Figura 3 se presentan los promedios de infestación de broca del café por cada rango altitudinal y escenario climático (periodos Neutro, El Niño, La Niña) registrados entre febrero de 2014 y junio de 2017 en la cuenca hidrográfica del río Risaralda. El análisis de varianza de prueba de rango múltiple para infestación de broca por altitud ($\alpha = 0,05$) y escenario climático mostró diferencias significativas en el promedio de frutos brocados en rama, entre los periodos climáticos y rangos de altura evaluados, específicamente entre el rango más bajo (1.000-1.300 m) y todos los demás y entre el rango más alto (1.700-1.800 m) y todos los demás. Así en la localidad ubicada a 1.132 m los niveles de infestación durante un periodo Neutro pasaron de 19,8 % a 24,3 % en el periodo El Niño; la cifra más alta de infestación registrada en los tres años del estudio como consecuencia de éste fenómeno, y el más intenso registrado en los últimos 100 años ($N=19$, $F = 5,04$, $df = 4$, $p = 0,0010$) (Tabla 2; Figuras 3 y 4).

En la localidad ubicada a 1.331 m los niveles de infestación durante un periodo neutro pasaron de 11,75 % hasta 13,07 % durante el periodo El Niño ($N = 19$, $F = 5,04$, $df = 4$, $p = 0,0010$), como consecuencia de los vuelos masivos de broca que se presentaron en la región. La localidad ubicada a 1.555 m mostró también diferencias significativas en el promedio de frutos brocados con niveles de infestación de 4,22 % durante un periodo Neutro comparado con 13,49 % durante el periodo El Niño ($N = 19$, $F = 5,04$, $df = 4$, $p = 0,0010$), seguido de la localidad ubicada a 1.749 m con niveles de infestación de 2,92 % durante un periodo neutro y de 6,86 % en el periodo El Niño ($N = 19$, $F = 5,04$, $df = 4$, $p = 0,0010$), en contraste con la localidad a 1.822 m donde los porcentajes de infestación nunca superaron el 2 % en ambos periodos climáticos. Los demás niveles de infestación por rango altitudinal se pueden apreciar en la Tabla 2 y la Figura 4. Los resultados del presente estudio obtenidos en el gradiente altitudinal nos muestran que durante periodos climáticos El Niño, las zonas comprendidas entre 1.100 y 1.555 m de altitud son las más vulnerables para el incremento de la broca del café; es decir, localidades con temperaturas superiores a 21 °C durante eventos Neutro que se incrementan hasta 22 °C y 23 °C durante eventos El Niño.

Tabla 2. Porcentajes de infestación de la broca del café *Hypothenemus hampei* por rango altitudinal y periodo climático (El Niño, La Niña, Neutro) en la cuenca del río Risaralda, Caldas durante los años 2014 y 2017.

ENSO	Altitud	N	Infestación observada (%)	Error estándar	EE Predicho	
El Niño	1.132	19	24,39	A	5,68	5,49
	1.331	19	13,07	CB	1,12	3,55
	1.555	19	13,49	B	3,26	2,18
	1.749	19	6,86	CB	0,67	1,42
	1.822	19	2,19	C	0,38	1,21
La Niña	1.132	5	5,71	A	2,94	2,65
	1.331	5	4,30	A	2,02	2,06
	1.555	5	5,17	A	1,13	1,21
	1.749	5	2,54	A	0,62	1,22
	1.822	5	1,33	A	0,27	1,10
Neutro	1.132	17	19,89	A	5,99	4,92
	1.331	17	11,75	BA	2,64	2,54
	1.555	17	4,22	B	0,70	1,21
	1.749	17	2,92	B	0,50	0,63
	1.822	17	1,07	B	0,28	0,50

*Promedios seguidos con las mismas letras no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de rango múltiple REGWQ para infestación de broca por altitud ($\alpha = 0,05$).

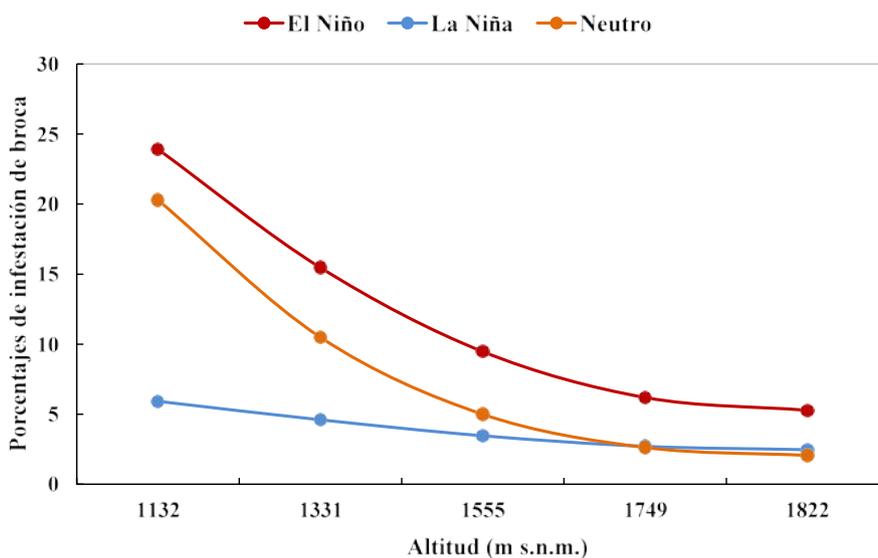
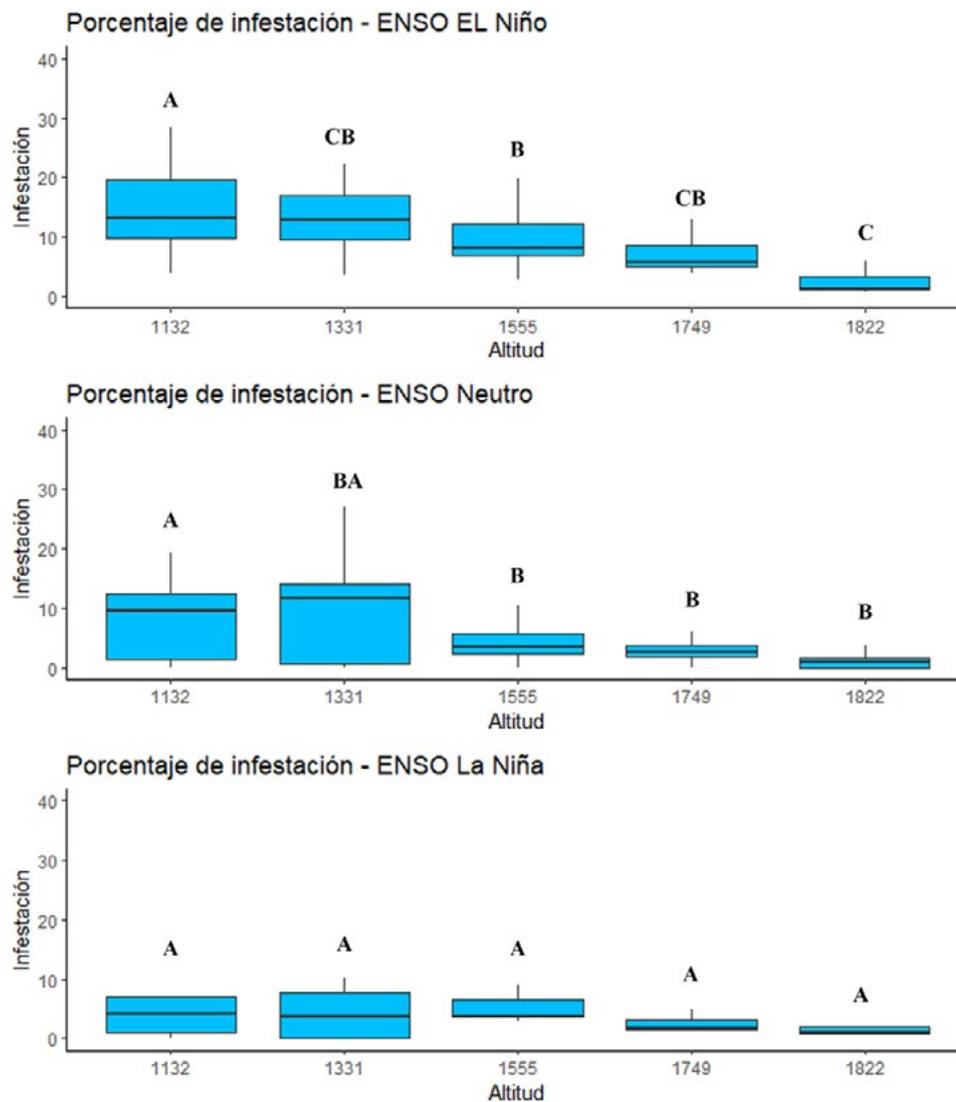


Figura 3. Porcentajes de infestación de *Hypothenemus hampei* por rango altitudinal y periodo climático (El Niño, La Niña, Neutro) en la cuenca del río Risaralda, Caldas durante los años 2014 y 2017.



* Para cada evento ENSO, promedios con las mismas letras no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de rango múltiple REGWQ para infestación de broca por altitud ($\alpha = 0,05$).

Figura 4. Porcentajes de infestación promedio de broca del café *Hypothenemus hampei* por rango altitudinal y periodo climático (El Niño, La Niña, Neutro) en la cuenca del río Risaralda, Caldas durante los años 2014 y 2017.

Estimación de la densidad poblacional de la broca del café. En la Tabla 3 y en las Figuras 5 y 6 se presentan los datos promedios de densidad poblacional de la broca del café por árbol en cada altitud a lo largo de un gradiente altitudinal en la cuenca del río Risaralda, Caldas, a través del tiempo, abarcando tres periodos climáticos diferentes (El Niño, La Niña y Neutro). El número promedio de brocas por árbol mostró una relación significativa con la temperatura e inversa con la altitud, donde se observa una tendencia a la disminución en la densidad de poblaciones del insecto (Figura 5) en la medida en que se incrementa la altitud y se disminuye la temperatura media (Tabla 5). En la localidad a 1.132 m los valores más altos de población de broca por árbol se obtuvieron durante el periodo El Niño del año 2015, con un promedio de 1.824,7 individuos y un máximo de 6.912 en comparación con un promedio de 1.372 y 652 individuos durante los periodos Neutro y La Niña, respectivamente ($F = 11,88$, $df = 4$, $P < 0,0001$). En la localidad a 1.331 m durante un periodo Neutro la densidad promedio de broca fue de 636,8 individuos y se duplican durante el periodo El Niño con 1.226 individuos ($F = 11,88$,

$df = 4$, $P < 0,0001$). A 1.555 m la población de broca estuvo en promedio de 249 individuos por árbol y se incrementó hasta 704 individuos durante el fenómeno El Niño ($F = 11,88$, $df = 4$, $P < 0,0001$). En la localidad a 1.749 m la población de broca presentó valores de 125,4 durante el periodo Neutro en comparación con 588,6 durante el periodo El Niño ($F = 11,88$, $df = 4$, $P < 0,0001$). En la localidad más alta a 1.822 m los valores de población de broca fueron de 59,5 y 200,5 individuos durante el periodo Neutro y El Niño, respectivamente ($F = 11,88$, $df = 4$, $P < 0,0001$). Durante el fenómeno La Niña los valores disminuyen considerablemente en comparación a un periodo El Niño y Neutro (Tabla 3).

Como consecuencia del fenómeno El Niño que se presentó en la zona con cuatro meses consecutivos de déficit hídrico durante los meses de octubre de 2015, hasta enero de 2016 favorecieron el desarrollo y crecimiento poblacional de la broca del café en los frutos remanentes en el árbol y en el suelo que quedaron después de la cosecha de mitaca que finalizó en el mes de junio de 2015 (Figura 5).

Tabla 3. Densidad promedio de *Hypothenemus hampei* por árbol por rango altitudinal y periodo climático (El Niño, La Niña, Neutro) en la cuenca del río Risaralda, Caldas durante los años 2014 y 2017.

ENSO	Altitud	N	Densidad observada		Error estándar	EE Predicho
El Niño	1.132	19	1.824,7	A	354,6	425,3
	1.331	19	1.225,7	BA	158,3	270,5
	1.555	19	703,7	BC	81,8	162,4
	1.749	19	588,6	BC	87,1	104,2
	1.822	19	200,5	C	49,1	88,3
La Niña	1.132	5	652,1	A	437,2	282,4
	1.331	5	357,6	A	134,7	182,5
	1.555	5	243,9	A	70,5	111,6
	1.749	5	210,3	A	50,7	72,9
	1.822	5	136,1	A	54,2	62,1
Neutro	1.132	17	1.372,4	A	368,1	334,1
	1.331	17	636,8	B	146,8	151,2
	1.555	17	249,2	B	56,4	61,8
	1.749	17	125,4	B	31,1	28,5
	1.822	17	59,5	B	21,2	21,3

*Promedios seguidos con las mismas letras no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de rango múltiple REGWQ para infestación de broca por altitud ($\alpha = 0,05$).

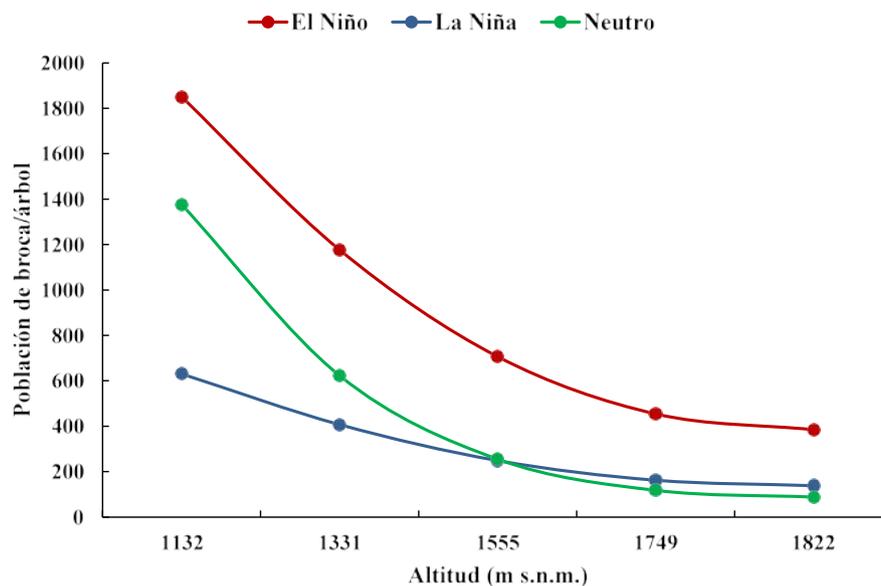
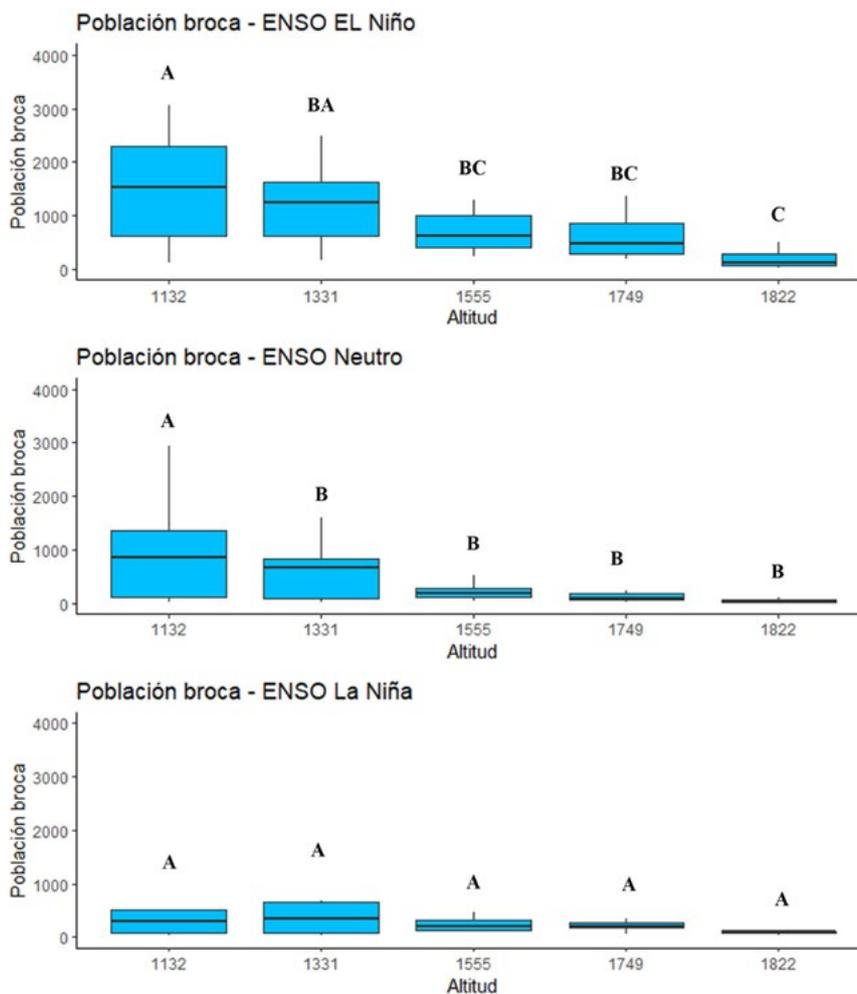


Figura 5. Densidad promedio de broca del café *Hypothenemus hampei* por árbol en tres periodos climáticos (El Niño, La Niña, Neutro) en un gradiente altitudinal, cuenca río Risaralda, Caldas durante los años 2014 y 2017.



* Para cada evento ENSO, promedios con las mismas letras no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de rango múltiple REGWQ para población de broca por altitud ($\alpha = 0,05$).

Figura 6. Población promedio de broca del café *Hypothenemus hampei* por árbol durante tres eventos climáticos (El Niño, La Niña, Neutro) en la cuenca del río Risaralda, Caldas durante los años 2014 y 2017.

Estos resultados nos muestran que la densidad poblacional de esta plaga se vio afectada por las temperaturas y el déficit hídrico producto del evento climático El Niño intenso que se presentó durante el segundo semestre del año 2015 y el primer semestre del 2016. Las temperaturas en el océano pacífico superaron en 2,3 grados centígrados, los promedios históricos para la época según el Índice Niño Oceánico (ONI en inglés) que es una medida de la condición de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y sus fases cálidas (El Niño) y fría (La Niña) en el Pacífico ecuatorial central que publica el Centro de Predicción Climatológica (NOAA, 2023). Es así como en la zona de estudio, los registros de temperatura de las estaciones meteorológicas marcaron un incremento en la temperatura media de 2 °C por encima del promedio histórico, con una disminución en las precipitaciones entre octubre de 2015 hasta enero de 2016 con registros promedios mensuales de lluvia inferiores a 15 mm durante los meses más intensos de la sequía (Tabla 5).

Registro de los vuelos y dispersión de la broca del café

Los vuelos de broca mostraron una relación positiva y negativa de tipo exponencial ($r = 0,95$ y $R = -0,92$) con la temperatura y la altitud, respectivamente, con un total acumulado

de 2.815.332 individuos capturados con trampas de alcohol durante 19 meses en un periodo intenso de El Niño, en comparación con 1.650.897 y 173.814 en los periodos Neutro y La Niña, respectivamente ($N = 19$, $df = 2$, $R = 0,9943$, $P = 0,1397$) (Tabla 4). Estos registros de capturas son los más altos reportados hasta la fecha con trampas de alcohol, como consecuencia del fenómeno El Niño intenso registrado durante el segundo semestre del año 2015. Como consecuencia de un periodo de sequía prolongado, la broca continuó reproduciéndose en los frutos del árbol y del suelo y con la llegada de las lluvias en el mes de septiembre de 2015 se favorecieron los vuelos masivos de este insecto, llegando a registros históricos de capturas de hasta 529.000 adultos en 20 trampas en la localidad a 1.132 m. Vuelos masivos de broca también se presentaron en el mismo mes en la localidad a 1.331 m con 337.500 brocas adultas capturadas. Los valores de captura en el mismo mes disminuyeron a medida que se incrementó la altitud, con valores de 27.640, 12.903 y 5.579 adultos en las localidades a 1.555 m, 1.749 m y 1.822 m, respectivamente (Figura 7). Esta diferencia en números estuvo relacionada con la temperatura ($>$ de 23 °C) en la localidad más baja (1.132 m), es decir que, por cada 200 m de altitud, hubo una diferencia de 1 °C de temperatura.

Niño, La Niña, Neutro) en un rango altitudinal entre 1.132-1.822 m s.n.m. en la cuenca del río Risaralda, Caldas durante los años 2014 y 2017.

ENSO	Altitud	N	Vuelos		Error estándar	EE Predicho
El Niño	1.132	19	4.779,16	A	161,4	1087,5
	1.331	19	1.806,36	B	868,6	465,7
	1.555	19	1.051,25	B	297,1	179,3
	1.749	19	456,39	B	154,1	78,5
	1.822	19	104,64	B	36,9	57,5
La Niña	1.132	5	864,45	A	610,5	406,5
	1.331	5	593,08	A	462,8	211,3
	1.555	5	206,49	A	175,7	101,2
	1.749	5	50,62	A	26,4	53,4
	1.822	5	23,52	A	14,1	42,1
Neutro	1.132	17	1.187,01	A	367,8	288,8
	1.331	17	482,15	BA	116,1	113,3
	1.555	17	140,04	B	26,1	39,5
	1.749	17	85,67	B	19,8	15,8
	1.822	17	26,21	B	5,2	11,3

*Promedios seguidos con las mismas letras no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de rango múltiple REGWQ para densidad poblacional de broca por altitud ($\alpha = 0,05$).

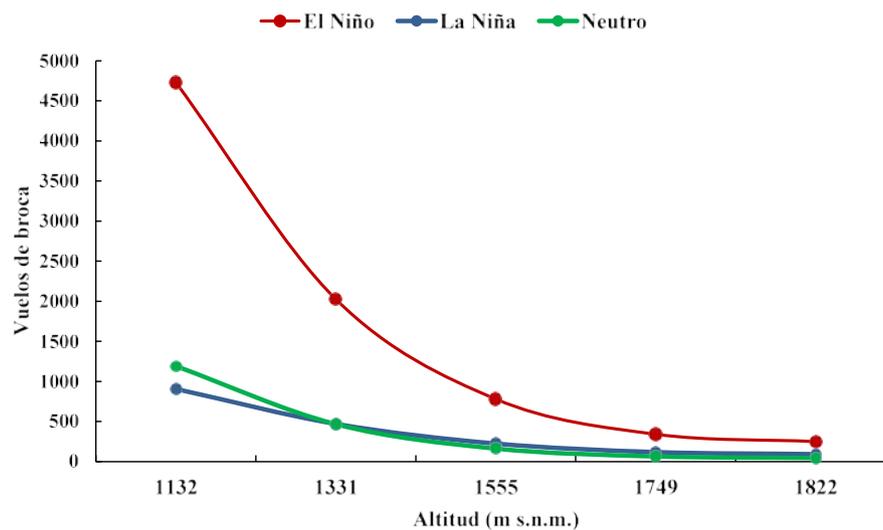


Figura 7. Número promedio de brocas del café *Hypothenemus hampei* capturadas con trampas de alcohol en un gradiente altitudinal durante tres eventos climáticos (El Niño, La Niña, Neutro) a través del tiempo en la cuenca del río Risaralda, Caldas durante los años 2014 y 2017.

Tabla 4. Número promedio de brocas del café *Hypothenemus hampei* capturadas con trampas de alcohol durante tres eventos climáticos (El

A mayor temperatura durante un periodo El Niño, el desarrollo del insecto fue mayor y más rápido, generando incremento en el número de progenies (N = 19, df = 2, P = 0,1397, R = 0,9943), en contraste con la localidad más alta ubicada a 1.822 m con temperaturas < de 18 °C donde el desarrollo de la broca es menor y lento. En contraste con la llegada de las lluvias en el mes de abril de 2015 y con el inicio de un periodo Neutro, las poblaciones de broca disminuyeron a menos de 10 individuos por árbol en el mes de mayo hasta noviembre de 2016 como consecuencia de una epizootia natural del hongo *Beauveria bassiana* que controló naturalmente las poblaciones de broca (N = 17, df = 2, P = 0,0218, R = 0,9992) (Figuras 9 y 10).

Registro del número de frutos de café caídos en el suelo a través del tiempo

La mayor cantidad de frutos de café caídos al suelo se presentaron en los meses de septiembre y octubre que coinciden con los picos máximos de la cosecha principal, siendo mayor en la localidad de Filo Bonito a 1.132 m, con un promedio de 52,8 frutos en el suelo por árbol, con un máximo de 59 y un mínimo de 37, en contraste con la localidad a 1.822 donde el promedio de frutos brocados no superó la cifra de 2,7 (Figura 8). Teniendo en cuenta que la cosecha de travesía termina en el mes de junio, se debió haber hecho repase de los frutos dejados en el árbol y en el suelo para proteger la cosecha principal la cual presenta los mayores picos de producción en septiembre, octubre y noviembre con un 65 % de distribución de la cosecha en el segundo semestre del año.

Tabla 5. Promedios de humedad, precipitación y temperatura media por rango altitudinal durante tres periodos climáticos (El Niño, La Niña, Neutro) en la cuenca del río Risaralda durante los años 2014 y 2017.

ENSO	Altitud	N	(% HR)		Lluvia (mm)		Temp. media (°C)				
			Media	Error estándar	Media	Error estándar	Media	Error estándar			
El Niño	1.132	19	70,92	B	0,98	3,72	A	0,65	24,28	A	0,17
	1.331	19	69,68	B	0,95	3,95	A	0,45	23,17	B	0,21
	1.555	19	77,97	A	0,97	4,81	A	0,55	21,68	C	0,17
	1.749	19	80,82	A	1,03	4,78	A	0,60	19,89	D	0,18
La Niña	1.132	5	73,10	B	2,47	6,11	A	0,92	23,89	A	0,45
	1.331	5	74,74	B	2,67	5,01	A	0,49	22,01	B	0,43
	1.555	5	80,06	BA	1,86	5,58	A	1,20	20,57	B	0,41
	1.749	5	85,29	A	2,48	5,48	A	1,56	18,94	C	0,40
Neutro	1.132	17	67,99	D	1,62	2,68	B	0,94	25,69	A	0,41
	1.331	17	73,79	C	1,08	6,32	A	0,99	22,38	B	0,16
	1.555	17	78,95	B	1,01	6,25	A	0,92	21,04	C	0,15
	1.749	17	83,32	A	1,23	7,09	A	0,67	19,33	D	0,13

*Promedios seguidos con las mismas letras no presentan diferencias significativas de acuerdo con la prueba de rango múltiple para infestación de broca por altitud (α = 0,05).

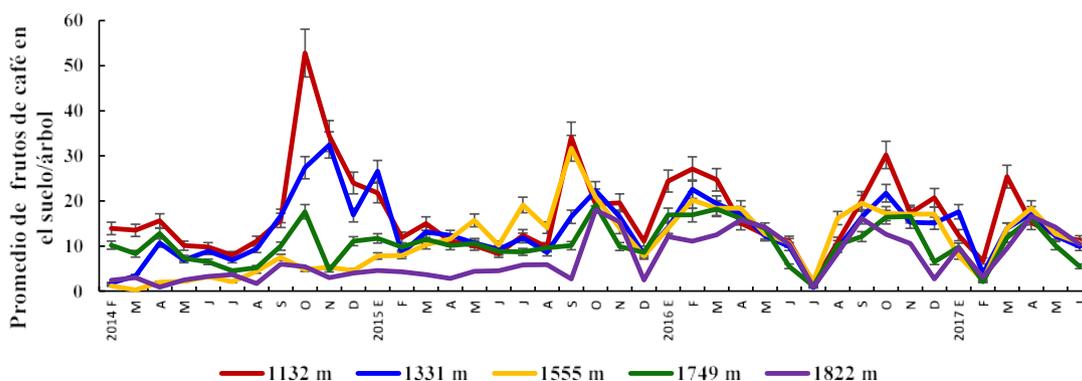


Figura 8. Número promedio mensual de frutos de café caídos al suelo en cada localidad a través del tiempo.

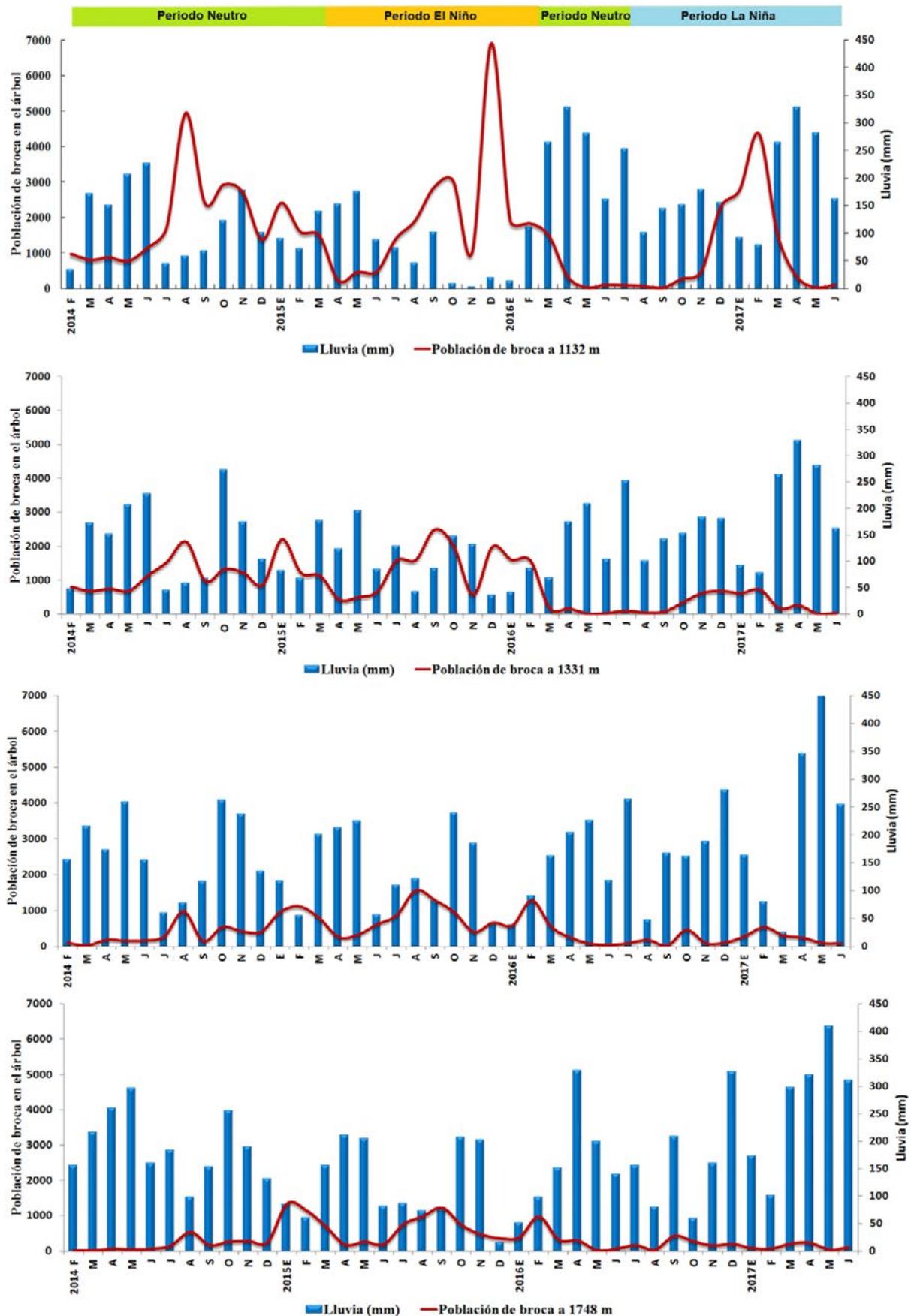


Figura 9. Población promedio de broca del café *Hypothenemus hampei* por árbol durante tres eventos climáticos (El Niño, La Niña, Neutro) y la precipitación en la cuenca del río Risaralda, Caldas durante los años 2014 y 2017. Las poblaciones se incrementan cuando hay déficit de lluvias durante periodos secos.

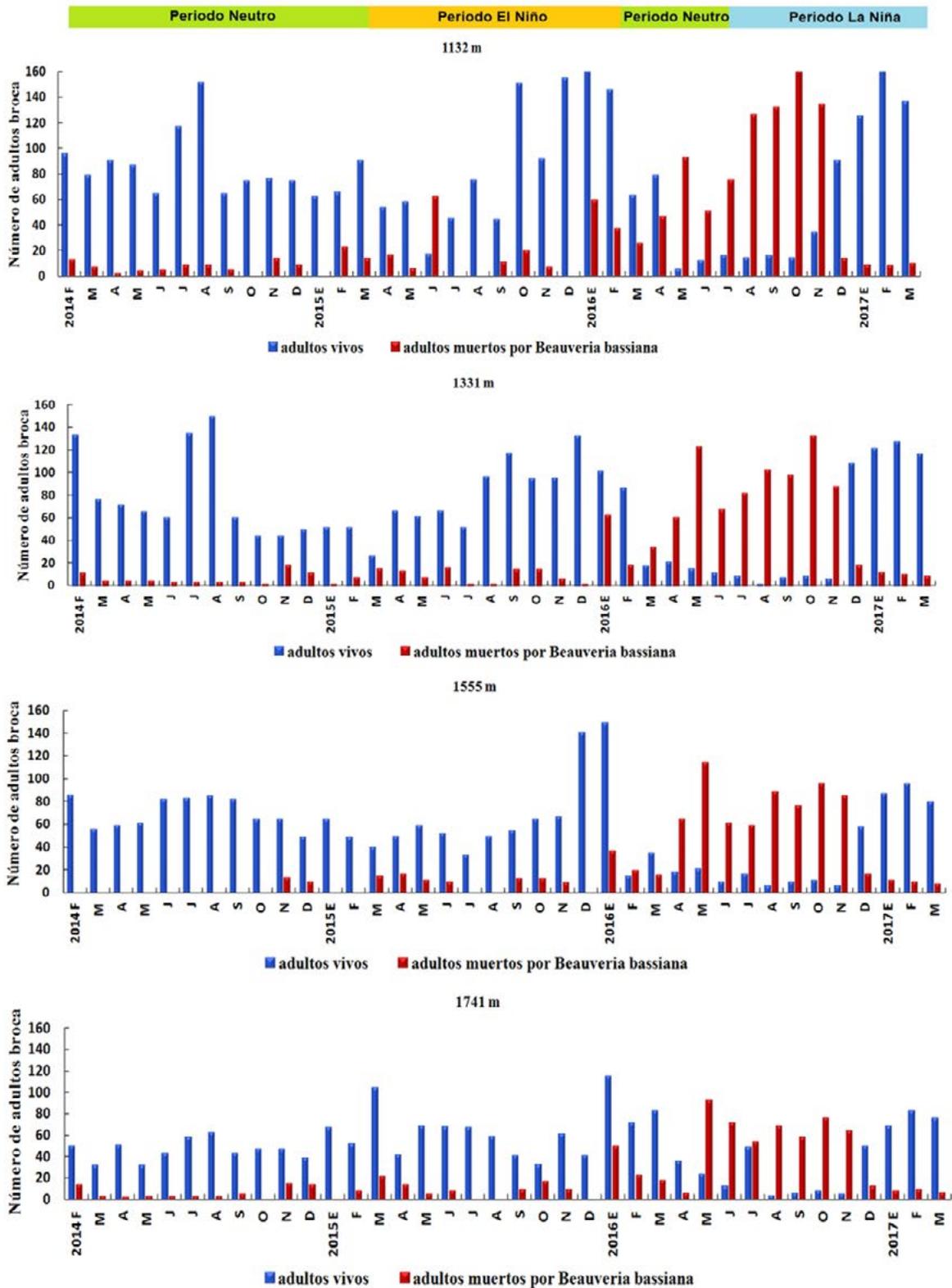


Figura 10. Número de brocas muertas por una epizootia natural del hongo *Beauveria bassiana* en cuatro altitudes a través del tiempo durante los años 2014 y 2017.

Evaluación de los porcentajes de mortalidad natural de adultos de broca por el hongo *Beauveria bassiana*

Se registró y cuantificó una epizootia natural causada por el hongo entomopatógeno *Beauveria bassiana* sobre las poblaciones de la broca del café en todas las localidades del estudio ubicadas en el gradiente altitudinal. Las evaluaciones de mortalidad de broca registradas a partir de la disección de frutos brocados, mostraron niveles de mortalidad superiores al 95 % a partir del mes de abril de 2016 hasta agosto del mismo año con la llegada de las lluvias y la culminación del fenómeno El Niño en el mes de marzo (Figura 10). Esto se debió en gran medida a la cantidad de inóculo del hongo generado a partir de los altos niveles poblacionales de broca parasitados con el hongo, con infestaciones en fruto por encima del 20 %, temperaturas entre 18 °C y 23 °C, precipitaciones mensuales acumuladas superiores a 165 mm, con humedad relativa superior al 75 %, favorecidas por la llegada de las lluvias en el mes de abril (Figuras 10 y 11). Una epizootia de esta magnitud no se había reportado con anterioridad. Es importante documentar estos eventos naturales que regulan las poblaciones de insectos plaga y mirar las cepas de *B. bassiana* virulentas hacia la broca del café que están ocasionando estas epizootias naturales, las cuales ya se encuentran adaptadas al medio natural y podrían servir para establecer aislamientos en laboratorio con el fin de propagarlas. Es importante mencionar que en ninguno de los lotes evaluados se aplicó hongo, lo que confirma que fue un evento de epizootia natural que contribuyó a regular naturalmente las poblaciones de la broca del café (Figura 10).

Discusión

En el presente estudio el incremento poblacional de la broca del café por rango altitudinal estuvo relacionado con el déficit hídrico y el aumento de la temperatura media (> 2,5 °C) por encima del promedio histórico mensual durante el periodo El Niño intenso del año 2015 en los lotes de café evaluados a través del tiempo. Precipitaciones mensuales menores a 100 mm durante mínimo dos meses continuos incrementaron las poblaciones de broca, principalmente en las localidades

ubicadas por debajo de 1.400 m s.n.m. Por el contrario, cuando las precipitaciones mensuales se mantuvieron por encima de 200 mm las poblaciones de broca se mantuvieron bajas por efecto del exceso de humedad en el suelo que causó la descomposición rápida de los frutos brocados caídos en el suelo y que afectaron la emergencia de las hembras adultas de esos frutos infestados. Igualmente, el incremento de los niveles de infestación del insecto en el árbol obedece a que en periodos secos el desarrollo de la broca es mayor, debido al aumento de la temperatura media en 1 °C -2 °C grados por encima del promedio histórico mensual, que acelera el ciclo de vida de la broca y genera mayor descendencia de individuos de la hembra fundadora. Estudios similares sobre el efecto de la altitud concluyen que el número de generaciones y el tamaño poblacional de la broca del café, se ven influenciados drásticamente por condiciones ambientales como la elevación y el sombrío del cultivo de café (Bacca et al., 2021).

Estudios de laboratorio muestran que la capacidad reproductiva de la broca del café está influenciada con la temperatura, así a 18 °C, 20 °C, 22 °C, 25 °C una sola hembra puede generar una descendencia de 40, 78, 85, 128 individuos respectivamente (Giraldo et al., 2018). Igualmente, la temperatura influye en el desarrollo del ciclo de vida de la broca del café siendo el tiempo generacional en días más rápido a temperaturas altas y más lento a temperaturas bajas, así a 18 °C, 20 °C, 22 °C, 25 °C el tiempo de desarrollo desde huevo hasta adulto tarda 72, 55, 38 y 22 días, respectivamente (Giraldo et al., 2018). Estudios realizados por diferentes autores bajo condiciones controladas de temperatura y humedad muestran resultados diferentes en el ciclo de desarrollo de la broca del café, que puede tardar entre 4-9 días más en condiciones de laboratorio (Giraldo et al., 2018; Jaramillo et al., 2010) en comparación a los ciclos de vida en campo (Hamilton et al., 2019). Estas variaciones en el tiempo del ciclo de vida en condiciones de laboratorio se dan por el tipo de dieta y los porcentajes de humedad del grano pergamino de café, que pueden afectar el tiempo de desarrollo del insecto (Bustillo et al., 1998; Constantino et al., 2011; Romero & Cortina, 2004). Por el contrario, bajo condiciones naturales en campo se conjugan muchos factores agroecológicos, biológicos, altitudinales y ambientales tales como las temperaturas máximas

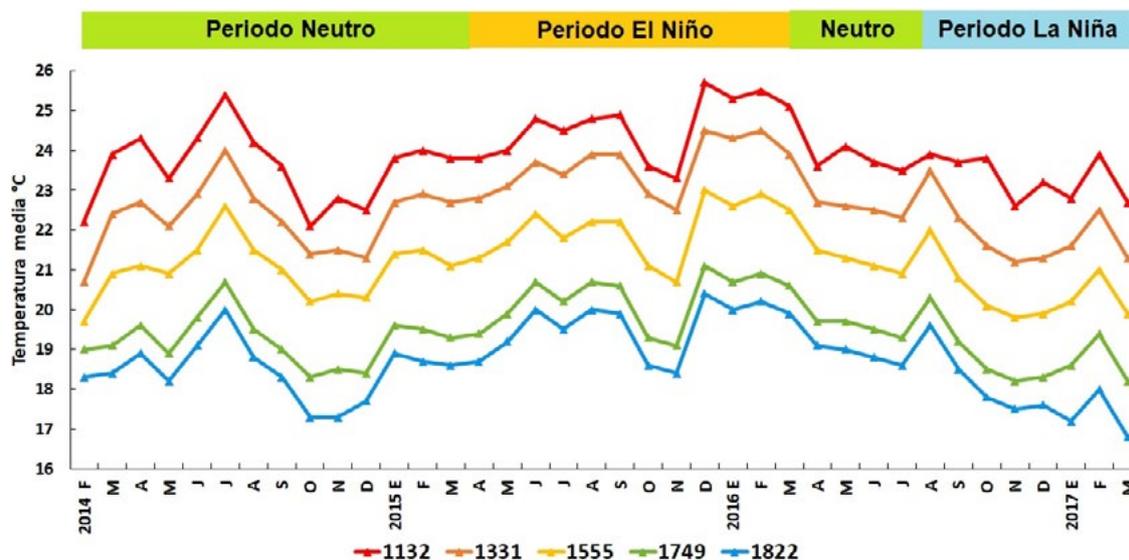


Figura 11. Temperatura media del aire registrada a través del tiempo, en un rango altitudinal entre 1.132 m-1.822 m durante tres eventos climáticos (El Niño, La Niña, Neutro) en la cuenca del río Risaralda, Caldas, Colombia.

y mínimas que varían en el día y la noche, siendo esto una de las limitaciones en estudios de campo, ya que restringe la posibilidad de hacer inferencias sólidas sobre las tendencias en temperatura y humedad relativa, a diferencia de los estudios en laboratorio donde las condiciones de temperatura y humedad son constantes.

Por otra parte, el control natural de los enemigos naturales que influyen en el crecimiento o disminución de las poblaciones de la broca del café, pudo ser demostrado en este estudio con porcentajes de mortalidad superiores a 95 % causada por una epizootia natural del hongo entomopatógeno *Beauveria bassiana*. El hongo *B. bassiana* es el principal entomopatógeno utilizado hoy en día para el control de la broca del café y muchas clases de insectos plaga en el mundo (Góngora & Laiton, 2020). Este hongo patógeno de insectos penetra la cutícula, invade y se multiplica dentro de los insectos, causando su muerte. Estas cepas naturales de *B. bassiana* virulentas hacia la broca del café que están ocasionando estas epizootias naturales, y que ya se encuentran adaptadas al medio natural podrían servir para establecer aislamientos en laboratorio con el fin de propagarlas. Existen igualmente otros enemigos naturales como los parasitoides de origen africano *Prorops nasuta*, *Cephalonomia stephanoderis* y *Phymastichus coffea* que parasitan la broca del café, y depredadores como *Ahasverus advena*, *Cathartus quadricollis* y las hormigas *Crematogaster crinosa* y *Solenopsis picea* que depredan estados biológicos dentro de los frutos brocados (Constantino et al., 2022; Góngora & Laiton, 2020; Laiton et al., 2018) pero para este estudio no se evaluaron estas especies porque sus poblaciones estuvieron bajas o ausentes.

El incremento poblacional de la broca del café por rango altitudinal registrado en este estudio estuvo relacionado con el déficit hídrico y el incremento de la temperatura media ($> 2,5$ °C) por encima del promedio histórico mensual en los lotes de café evaluados a través del tiempo (Figura 5; Tabla 5). Precipitaciones mensuales menores a 100 mm durante mínimo dos meses continuos incrementaron las poblaciones de broca, principalmente en las localidades ubicadas por debajo de 1.350 m s.n.m. Igualmente, tuvo efecto en el incremento de los niveles de infestación del insecto en el árbol. Esto obedece a que en periodos secos el desarrollo de la broca es mayor, debido al incremento de la temperatura media en 1 °C -2 °C por encima del promedio histórico mensual, el ciclo de vida de la broca se aceleró y se generó mayor descendencia de individuos. Con las primeras lluvias después de un periodo seco de dos meses, y cuando las condiciones ambientales fueron favorables, volaron gran cantidad de adultos, que infestaron de nuevo los frutos en formación del árbol como se pudo evidenciar en este estudio. La llegada de las lluvias después de un periodo seco de dos meses es el factor detonante que estimula la emergencia y los vuelos masivos de la broca del café, resultados que concuerdan con los obtenidos por (García-Méndez et al., 2024) en México.

Los vuelos de broca mostraron una relación positiva y negativa de tipo exponencial ($R = 0,95$ y $R = -0,92$) con la temperatura media del aire y la altitud, respectivamente, con un total acumulado de 2.815.332 individuos capturados durante el periodo El Niño, en comparación con 1.650.897 y 173.814 en un periodo Neutro y La Niña, respectivamente. Estos volúmenes de broca obtenidos en este estudio son los más altos hasta ahora registrados con trampas de alcohol en comparación con otros estudios de monitoreo de broca en campo utilizando las mismas trampas y atrayente.

Aristizábal et al. (2002) reportaron en Colombia capturas de hasta 300 hembras de broca por trampa por semana. Barrera et al. (2008) realizaron un estudio durante el vuelo de colonización en un año de trampeo con capturas de hasta 109.861 brocas en 15 trampas, con un promedio de 139 (± 36) individuos por trampa para todo el periodo de estudio. Bustillo (2008) indica que en las localidades donde se cosecha el café en el segundo semestre, se observa como la frecuencia de los vuelos es mayor entre enero y abril que en el resto del año, tal como sucedió en este estudio.

Los vuelos masivos que provocan que la broca se disperse en los lotes de café están relacionados con los factores climáticos (temperatura y precipitación) y las prácticas agronómicas que se pueden dar en una región como es el zoqueo o corte de los árboles cuando finaliza su ciclo productivo después de 5 años. Estudios realizados por Castaño et al. (2005) en un lote zoqueado donde no se hizo la cosecha sanitaria de los frutos y estos se dejaron en el suelo encontraron que la cantidad de broca que voló, dependió de los eventos climáticos, donde volaron alrededor de 1,7 millones de insectos por hectárea en un periodo La Niña, hasta 3,0 millones en un periodo Neutro y hasta 4,5 millones en un periodo El Niño.

Igualmente, los frutos de café infestados por broca que se caen al suelo, sirven de reservorio y refugio al insecto para infestaciones posteriores en el árbol, ya que la broca continúa su desarrollo durante 140 días produciendo focos permanentes de nuevas generaciones de brocas hasta que la condiciones ambientales sean óptimas para emerger de esos frutos, dispersarse y colonizar nuevos frutos (Castaño et al., 2005; Constantino et al., 2021). Los frutos brocados caídos en el suelo y los que se quedan en las ramas después de las cosechas son los que generan mayor impacto en la infestación en el árbol y son por consiguiente el principal problema en el manejo de la broca del café (Constantino et al., 2021).

En el presente estudio la mayor cantidad de frutos caídos en el suelo ocurrió durante las cosechas de travesía y principal con un promedio de 53 frutos en el suelo por árbol, con un máximo de 59 y un mínimo de 37, en la localidad con altitud de 1132 m en contraste con la localidad a 1.822 donde el promedio de frutos caídos fue de 3 (Figura 8) con niveles de infestación que oscilaron entre 20 % y 65 %. Los frutos brocados dejados en el suelo y en el árbol representan el mayor riesgo de infestación en la cosecha siguiente (Benavides et al., 2013). El impacto de los frutos brocados remanentes en el suelo sobre la infestación en el árbol fue evaluado por Constantino et al. (2021), en árboles de café cubiertos con jaula entomológica a los que se les colocaron frutos brocados en el suelo y se encontró que un solo fruto brocado en el suelo pudo infestar en promedio 590 ± 142 frutos cereza en el árbol durante un periodo Neutro, $959 \pm 89,6$ durante un periodo El Niño y $151,5 \pm 29,1$ durante un periodo La Niña en la localidad a 1.218 m. De ahí de la importancia de realizar un buen repase en la zona central cafetera en los meses de noviembre-diciembre después de culminada la cosecha principal para proteger los frutos en formación de la cosecha de travesía y otro repase en mayo-junio después de culminada la cosecha de travesía para proteger los frutos en formación de la cosecha principal (Benavides et al., 2013). Esta práctica de control cultural es eficaz para reducir los niveles de infestación de broca hasta en un 71,2 % en la cosecha siguiente (Constantino et al., 2017).

Por lo tanto, el conocimiento de la variación natural del clima y de los impactos de la variabilidad climática sobre los

insectos-plaga y benéficos en condiciones naturales, constituyen un tema importante tanto para la prevención de problemas fitosanitarios como para el desarrollo de estrategias de adaptación a los cambios esperados que permitan identificar zonas de mayor y menor riesgo frente a la variabilidad climática, a la vez que ayuden a la regionalización de las recomendaciones para la caficultura en Colombia ante eventos futuros de cambio climático.

Agradecimientos

Los autores agradecen la valiosa colaboración de los auxiliares de la disciplina de Entomología Carlos A. Quintero, Mauricio Jiménez y Faber de los Ríos en la toma de datos de campo. A los caficultores Ariel Villada, Euclides Valencia†, Edgar Collazos, Augusto Montes y Eduardo Valencia, por haber facilitado sus predios para realizar el presente estudio. Esta investigación fue realizada con recursos de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia bajo el proyecto ENT101003.

Referencias

- Aristizábal, L. F., Salazar, H., & Mejía, C. G. (2002). Cambios en la adopción de los componentes de manejo integrado de la broca del café, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) a través de metodologías participativas. *Revista Colombiana de Entomología*, 28, 153-160. <https://doi.org/10.25100/socolen.v28i2.9641>
- Bacca, T., Delgado, W. L., Lagos, T. C., & Gutiérrez, Y. (2021). Efecto de la altitud y del sombrero del café sobre la infestación por *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) en Nariño, Colombia. *Boletín Científico Museo de Historia Natural*, 25(2), 43-58. <https://doi.org/10.17151/bccm.2021.25.2.3>
- Barrera, J. F., Herrera, J. M., Chiu, J., Gómez, J., & Vallemora, J. (2008). La trampa de una ventana (ECOIPAR) captura más broca del café *Hypothenemus hampei* que la trampa de tres ventanas (ETOTRAP). *Entomología Mexicana*, 7, 619-624.
- Benavides, P., Gil, Z. N., Constantino, L.M., Villegas, C., & Giraldo, M. (2013). Plagas del café. Broca, minador, cochinillas harinosas y monalónion. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (Ed.), *Manual del cafetero colombiano: investigación y tecnología para la sostenibilidad de la caficultura* (Vol. 2, pp. 215-260). Cenicafe. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/4340>
- Bustillo, A. E., Cárdenas M. R., Villalba, G.D., Benavides, P., Orozco, H. J., & Posada, F. J. (1998). *Manejo integrado de la broca del café Hypothenemus hampei en Colombia*. Chinchiná, Cenicafe. 134 p. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/848>
- Bustillo, A. E. (2007). *El manejo de cafetales y su relación con el control de la broca del café en Colombia*. Boletín Técnico No. 24. segunda edición. Chinchiná, Cenicafe. 40 p. <https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/579/1/024.pdf>
- Bustillo, A. E. (2008). Aspectos sobre la broca del café *Hypothenemus hampei* en Colombia. En A.E. Bustillo (Ed.), *Los insectos y su manejo en la caficultura colombiana* (Capítulo 33, pp. 389-418). FNC – Cenicafe, Chinchiná. Editorial Blancocolor Ltda.
- Castaño, A., Benavides, P., & Baker, P. S. (2005). Dispersión de *Hypothenemus hampei* en cafetales zoqueados. *Revista Cenicafe*, 56, 142-150. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/147>
- CIPF- FAO. (2021). Revisión científica del impacto del cambio climático en las plagas de las plantas. Un desafío mundial en la prevención y la mitigación de los riesgos de plagas en la agricultura, la silvicultura y los ecosistemas. Roma. FAO en nombre de la Secretaría de la CIPF. <https://doi.org/10.4060/cb4769es>
- Constantino, L. M., Navarro, L., Berrio, A., Acevedo, F. E., Rubio, J. D., & Benavides, P. (2011). Aspectos biológicos, morfológicos y genéticos de *Hypothenemus obscurus* e *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Revista Colombiana de Entomología*, 37(2), 173-182. <https://doi.org/10.25100/socolen.v37i2.9071>
- Constantino, L. M., Oliveros, C., Benavides, P., Serna, C., Ramírez, C. A., Medina, R., & Arcila, A. (2017). Dispositivo recolector de frutos de café del suelo para el manejo integrado de la broca. *Revista Cenicafe*, 68(1), 22-37. <http://hdl.handle.net/10778/813>
- Constantino, L. M. (2020). Control natural factores bióticos. En P. Benavides & C.E. Góngora (Eds.), *El Control Natural de Insectos en el Ecosistema Cafetero Colombiano* (pp. 36-67). Cenicafe. https://doi.org/10.38141/10791/0001_3
- Constantino, L. M., Gil, Z. N., Montoya, E. C., & Benavides, P. (2021a). Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) emergence from ground fruits across varying altitudes and climate cycles, and the effect on coffee tree infestation. *Neotropical Entomology*, 50, 374-387. <https://doi.org/10.1007/s13744-021-00863-5>
- Constantino, L. M., Rendón, J. R., Cuesta, G., Medina-Rivera, R., & Benavides Machado, P. (2021b). Dinámica poblacional, dispersión y colonización de la broca del café *Hypothenemus hampei* en Colombia. *Revista Cenicafe*, 72(1), e72102. <https://doi.org/10.38141/10778/72102>
- Constantino, L. M., Benavides, P., Escobar-Ramírez, S., Montoya-Lerma, J., & Armbrecht, I. (2022). Capacidad depredadora de las hormigas *Solenopsis picea* y *Crematogaster crinosa* sobre la broca del café *Hypothenemus hampei* en campo con una solución atrayente. *Revista Colombiana de Entomología*, 48(2), e11353. <https://doi.org/10.25100/socolen.v48i2.11353>
- Contreras, C., & Galindo, M. G. (2009). Implicaciones y consecuencias del cambio climático. *Universitarios Potosinos*, 5(6), 4-9.
- Gaitán, A., Flórez, C. P., García, J. C., Benavides, P., Gil, Z.N., Sadeghian, S., Lince, L. A., Salazar, L. F., Oliveros, C. E., Sanz, J. R., Ramírez, C. A., Rodríguez, N., Quintero, L., & López, J. C. (2016). Evento de La Niña en Colombia. Recomendaciones para la caficultura. *Avances Técnicos Cenicafe*, 467, 1-12. <http://hdl.handle.net/10778/705>
- García-Méndez, V., González-Gómez, R., Toledo, J., Valle-Mora, J.F., Barrera, J.F. (2024). Effect of microclimate on the mass emergence of *Hypothenemus hampei* in coffeegrown under shade of trees and in full sun exposure. *Insects* 2024, 15, 124. <https://doi.org/10.3390/insects15020124>
- Giraldo, J. M., García, G. A., & Parra, J. R. (2018). Biology, thermal requirements, and estimation of the number of generations of *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Curculionidae) in the State of São Paulo, Brazil. *Journal of Economic Entomology*, 111(5), 2192-2200. <https://doi.org/10.1093/jee/toy162>
- Giraldo, J. M., Montoya, E. C., Sarmiento, H. N., Quiroga, M. A., Espinosa, J. C., García, L., Duque, O. H., & Benavides, P. (2019). Vulnerabilidad de la caficultura de Caldas a la broca del café en diferentes eventos climáticos. *Avances Técnicos Cenicafe*, 505, 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0505>
- Góngora, C. E., & Laiton-Jiménez, L. A. (2020). Control biológico en las plagas de café de Colombia. En P. Benavides & C. E. Góngora (Eds.), *El Control Natural de Insectos en el Ecosistema Cafetero Colombiano* (pp. 68-105). Cenicafe. https://doi.org/10.38141/10791/0001_4
- Góngora, C. E., Gil, Z. N., Constantino, L. M., & Benavides, P. (2023). Sustainable Strategies for the Control of Pests in Coffee Crops. *Agronomy*, 13, 2940. <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/12/2940>
- Hamilton, L. J., Hollingsworth, R. G., Sabado-Halpern, M., Manoukis, N. C., Follett, P. A., & Johnson, M. A. (2019). Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) (Coleoptera: Curculionidae) development across an elevational gradient on Hawai'i Island: Applying laboratory degree-day predictions to natural field populations. *PLoS One*, 14(7), e0218321. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218321>
- Hill, J., Griffiths, H., & Thomas, C. (2011). Climate change and evolutionary adaptations at species range margins. *Annual*

- Review of Entomology*, 56, 143-149. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-120709-144746>
- Infante, F., Armbrrecht, I., Constantino, L. M., & Benavides, P. (2023). Coffee pests. In *Forest Microbiology*, Vol. 3 (pp. 213-225). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18694-3.00015-8>
- Jaramillo, J., Chabi-Olaye, A., Kamonjo, C., Jaramillo, A., Vega, F., Poehling, H., & Borgemeister, C. (2009). Thermal tolerance of the Coffee Berry Borer *Hypothenemus hampei*: Predictions of climate change impact on a tropical insect pest. *PlosOne*, 8, 1-11. <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>
- Jaramillo, J., Muchugu, E., Vega, F., Davis, A., Borgemeister, C., & Chabi-Olaye, A. (2011). Some like it hot: The influence and implications of climate change on Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) and coffee production in East Africa. *PLoS One*, 6(9), e24528. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024528>
- Laiton, L. A., Constantino, L. M., & Benavides, P. (2018). Capacidad depredadora de *Cathartus quadricollis* y *Ahasverus advena* (Coleoptera: Silvanidae) sobre *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae) en laboratorio. *Revista Colombiana de Entomología*, 44(2), 200-205. <https://doi.org/10.25100/socolen.v44i2.7319>
- Marco, V. (2001). Modelación de la tasa de desarrollo de insectos en función de la temperatura. Aplicación al Manejo integrado de Plagas mediante el método de grados-días. *Aracnet*, 7(28), 147-150. http://sea-entomologia.org/PDF/BOLETIN_28/B28-038-147.pdf
- Menéndez, R. (2007). How are insects responding to global warming? *Tijdschrift Voor Entomologie*, 150(2), 355-365. [https://www.research.lancs.ac.uk/portal/en/publications/how-are-insects-responding-to-global-warming\(9853540a-4a26-4195-8b36-b4eab9cc19f1\).html](https://www.research.lancs.ac.uk/portal/en/publications/how-are-insects-responding-to-global-warming(9853540a-4a26-4195-8b36-b4eab9cc19f1).html)
- NOAA/National Weather Service. National Centers for Environmental Prediction. Climate Prediction Center. (2023). El Niño/ Oscilación del Sur. https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/enso_advisory/ensodisc_Sp.shtml
- Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 37, 637-669. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.37.091305.110100>
- Ramírez, V. H., Jaramillo, A., & Arcila, J. (2013). Factores climáticos que intervienen en la producción del café en Colombia. En Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (Ed.) *Manual del Cafetero Colombiano*. Tomo I (pp. 206-238). Cenicafe.
- Ramírez, V. H., Gaitán, A. L., Constantino, L. M., Gil, Z. N., Sadehian, S., & González, H. (2014). Recomendaciones para la reducción del riesgo en la caficultura de Colombia ante un evento climático de El Niño. *Avances Técnicos Cenicafe*, 445, 1-12. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0445.pdf>
- Ramírez, C., Daza, J., & Peña, A. J. (2015). Tendencia anual de los grados día cafeto y los grados día broca en la región andina ecuatorial de Colombia. *Revista Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16(1), 51-63. https://doi.org/10.21930/rcta.vol16_num1_art:379
- Rivillas, C., Serna, C., Cristancho, M., & Gaitán, A. (2011). La roya del cafeto en Colombia. Impacto, manejo y costos del control. Boletín Técnico Cenicafe No. 36. Chinchiná. 52 p. <https://www.cenicafe.org/es/publications/bot036.pdf>
- Romero, J. V., & Cortina, H. (2004). Fecundidad y ciclo de vida de *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) en introducciones silvestres de café. *Revista Cenicafe*, 53(3), 221-231. [https://www.cenicafe.org/es/publications/arc055\(03\)221-231.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/arc055(03)221-231.pdf)
- Ruiz, J. F. & Melo, J. Y. (2023). Informe de Predicción Climática a corto, mediano y largo plazo en Colombia. Grupo de Modelamiento de Tiempo y Clima, Subdirección de Meteorología– IDEAM. http://bart.ideam.gov.co/wrfideam/new_modelo/CPT/informe/Informe.pdf
- SAS INSTITUTE. (2007). SAS User's Guide. Statistics. Version 9.1. Cary: SAS Institute.
- Van der Putten, W., Macel, M., & Visser, M. E. (2010). Predicting species distribution and abundance responses to climate change: why it is essential to include biotic interactions across trophic levels. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 365(549), 2025-2034. <https://www.jstor.org/stable/25699221>
- Wallner, W. E. (1987). Factors affecting insect population dynamics: Differences between outbreak and non-outbreak species. *Annual Review of Entomology*, 32, 317-340. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.32.010187.001533>
- Walther, G.R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T., Guldert, O., & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389-395. <https://www.nature.com/articles/416389a>
- Whittaker, L., González-Moreno, P., Lowry, A., Jaramillo-Vélez, L., Aristizábal, V., Pineada- Aristizábal, L.F., Edgington, S., Murphy, S.T. (2024). The effect of an altitudinal gradient on the abundance and phenology of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) (Ferreri) (Coleoptera:Scolytidae) in the Colombian Andes. *International Journal of Pest Management*. 1-12. <https://doi.org/10.1080/09670874.2024.2325346>

Origen y Financiación

Esta investigación se desarrolló con recursos propios. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-FNC y Cenicafe. Proyecto Número ENT101003.

Contribución de los autores

LMC: Investigación, redacción de propuesta, escritura del manuscrito, montaje de parcelas, evaluación y análisis de datos; **AJP:** Conceptualización metodológica de la propuesta; **CRC:** Montaje de estaciones meteorológicas, análisis de datos climáticos. **LCI:** análisis estadísticos de los datos. **PBM:** Conceptualización y coordinación. Realizó ajustes a la metodología, seguimiento al registro de la información y revisión del manuscrito. Todos los autores revisaron el manuscrito, han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.