

Análisis de riesgo de *Stenoma catenifer* en la producción de aguacate en Caldas utilizando tecnología geoespacial: Aguadas, Pácora y Aranzazu

Eliana Vanesa Castaño Domínguez

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2024

RESUMEN

El barrenador del aguacate, *Stenoma catenifer*, representa una amenaza significativa para la producción de aguacate en los municipios de Aguadas, Pácora y Aranzazu, en el departamento de Caldas. En este estudio, se adapta parte de la metodología utilizada por Olvera *et al.* (2020) en su investigación sobre el análisis del riesgo potencial del Huanglongbing en Colombia mediante tecnología geoespacial, centrándose esta vez en *Stenoma catenifer* y su impacto en la producción de aguacate, utilizando tecnología geoespacial. Esta metodología se basa en el uso de sistemas de información geográfica (SIG) que permiten identificar la distribución de las plantas hospederas, calcular los grados días de desarrollo del insecto y analizar variables bioclimáticas relevantes. Los resultados obtenidos revelan que las áreas de producción de aguacate en los municipios estudiados, están en alto riesgo de infestación por *Stenoma catenifer*. Además, se observó una correlación significativa entre las variables ambientales y la presencia del barrenador, destacando la importancia de considerar factores climáticos en la gestión de esta plaga.

Palabras claves: *Stenoma catenifer*, Aguacate, Análisis de riesgo, Tecnología geoespacial, Manejo fitosanitario.

ABSTRACT

The avocado borer, *Stenoma catenifer*, poses a significant threat to avocado production in the municipalities of Aguadas, Pácora, and Aranzazu, in the department of Caldas. In this study, part of the methodology used by Olvera *et al.* (2020) in their research on the analysis of the potential risk of Huanglongbing in Colombia through geospatial technology is adapted, this time focusing on *Stenoma catenifer* and its impact on avocado production, using geospatial technology. This methodology is based on the use of geographic information systems (GIS) that allow for the identification of host plant distribution, calculation of insect development degree-days, and analysis of relevant bioclimatic variables. The results obtained reveal that avocado production areas in the studied municipalities are at high risk of infestation by *Stenoma catenifer*. Additionally, a significant correlation between environmental variables and borer presence was observed, highlighting the importance of considering climatic factors in managing this pest.

Keywords: *Stenoma catenifer*, Avocado, Risk analysis, Geospatial technology, Phytosanitary management.

Tabla de contenido

1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.....	8
1.1	Descripción del área problemática.....	9
1.2	Formulación del problema.....	10
1.3	Justificación.....	11
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	Objetivo general.....	13
2.2	Objetivos específicos.....	13
3	ANTECEDENTES.....	14
3.1	Relación entre el clima y las plagas.....	17
4	REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL.....	19
4.1	Normas NIMF 4 de 1995 - Requisitos para el establecimiento de áreas libres de plagas:.....	19
4.2	Normas NIMF 6 de 1997 - Directrices para la vigilancia:.....	20
4.3	Normas NIMF 7 de 1997 - Sistema de certificación para la exportación:.....	20
4.4	Normas NIMF 8 de 1998 - Determinación de la situación de una plaga en un área:.....	20
4.5	Normas NIMF 1 de 2006 - Principios fitosanitarios para la protección de las plantas y la aplicación de medidas fitosanitarias en el comercio internacional:.....	20
4.6	Documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES 3514) de abril 21 de 2008.....	21
4.7	Resolución ICA 3180 del 26 de agosto de 2009:.....	22
4.8	Resolución ICA 1507 del 22 de febrero de 2016:.....	22
4.9	Resolución ICA 448 del 20 de enero de 2016:.....	23
4.10	Resolución ICA 3973 del 14 de abril de 2016:.....	23
4.11	Resolución ICA 30021 del 28 de abril de 2017:.....	23
5	REFERENTE TEÓRICO.....	25
5.1	Características biológicas y ciclo de vida del barrenador del aguacate.....	25
5.1.1	<i>Clasificación taxonómica del barrenador del hueso del aguacate, Stenoma catenifer Walsingham, 1912.....</i>	25
5.1.2	<i>Biología.....</i>	26
5.1.3	<i>Hábitos.....</i>	26
5.1.4	<i>Ciclo de vida de Stenoma catenifer.....</i>	28
5.2	Impacto económico y ambiental de <i>Stenoma catenifer</i> en los cultivos de aguacate en Colombia y otras regiones.....	32
5.3	Uso de herramientas geoespaciales en la agricultura.....	34
5.4	Evolución de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y otras tecnologías asociadas a la agricultura.....	35
5.5	Agricultura de precisión (AP).....	36
5.6	Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	36
5.6.1	<i>Herramienta Intersección – Intersection.....</i>	37
5.7	Modelo de grados días de desarrollo (GDD).....	37
5.8	Mapas de Voronoi.....	38
5.9	Modelo de distribución potencial (MDP).....	39
5.10	Worldclim.....	40
5.11	Mapas de riesgo.....	40
6	METODOLOGÍA.....	42

6.1	Enfoque metodológico.....	42
6.2	Tipo de estudio	43
6.3	Definición del área de estudio	43
6.4	Procedimiento	48
6.4.1	<i>Fase 1: Identificación espacial de la superficie sembrada de los hospederos de Stenoma catenifer en Caldas.....</i>	<i>48</i>
6.4.2	<i>Fase 2: Caracterizar los grados días de Stenoma catenifer para la generación de un modelo predictivo de desarrollo de la plaga.....</i>	<i>50</i>
6.4.3	<i>Fase 3: Delimitar e identificar las áreas de ocurrencia de Stenoma catenifer mediante un modelo de distribución potencial de especies.....</i>	<i>51</i>
6.4.4	<i>Fase 4: Identificación de áreas en riesgo a Stenoma catenifer en los sistemas productivos de aguacate.....</i>	<i>53</i>
7	RESULTADOS Y ANÁLISIS	54
7.1	Resultados fase 1: Identificación espacial de la superficie sembrada de los hospederos de <i>Stenoma catenifer</i> en Caldas.	54
7.2	Resultado fase 2: Caracterizar los grados días de <i>Stenoma catenifer</i> para la generación de un modelo predictivo de desarrollo de la plaga.	55
7.3	Resultado fase 3: Delimitación e identificación de las áreas de ocurrencia de <i>Stenoma catenifer</i> mediante un modelo de distribución potencial de especies.....	61
7.4	Resultado fase 4: Identificación de áreas en riesgo a <i>Stenoma catenifer</i> en los sistemas productivos de aguacate en el área de estudio.....	65
8	CONCLUSIONES	69
9	RECOMENDACIONES	71
10	REFERENCIAS	72

Tabla de figuras

Figura 1. Distribución geográfica de <i>Stenoma catenifer</i> en los departamentos de Colombia.....	15
Figura 2. Clasificación taxonómica de <i>Stenoma catenifer</i> Walsingham (1912), insecto barrenador del aguacate.	25
Figura 3. Estados fenológicos del aguacate en etapa de crecimiento y llenado de frutos (EF-712 a EF-719). Tres a seis meses después de floración.	27
Figura 4. A) Huevos de <i>Stenoma catenifer</i> depositados tanto individualmente como en grupos en el fruto, pedúnculo y la unión entre ambos. B) Huevos agrupados. C) Vista en primer plano de dos huevos.	29
Figura 5. Larvas de <i>Stenoma catenifer</i> . A) Superficie dorsal de tono violeta. B) Superficie ventral de tono verde azulado.	29
Figura 6. A) Pupa recién formada con tonalidad azul turquesa. B y C) Pupas de un color café brillante.	30
Figura 7. Adulto de <i>Stenoma catenifer</i>	31
Figura 9. Área de evaluación y ubicación de puntos de monitoreo durante los años 2018 a 2022.	46
Figura 10. Área de estudio específica y ubicación de puntos de monitoreo durante los años 2018 a 2022.	47
Figura 11. Distribución espacial y % de infestación de <i>S. catenifer</i> en cultivos de aguacate en el departamento de Caldas, año 2018-2022.	48
Figura 12. Tasa de crecimiento anual de siembra de aguacate en Caldas	49
Figura 13. Distribución promedio de las áreas de siembra de aguacate en Caldas (2018-2023). La escala de colores indica el área de siembra por municipio.	55
Figura 14. Modelo de grados días de desarrollo de <i>S. catenifer</i> para el área de estudio, 2018. La escala de colores representa la cantidad de GDD.	57
Figura 15. Modelo de grados días de desarrollo de <i>S. catenifer</i> para el área de estudio, 2019. La escala de colores representa la cantidad de GDD.	57
Figura 16. Modelo de grados días de desarrollo de <i>S. catenifer</i> para el área de estudio, 2020. La escala de colores representa la cantidad de GDD.	58
Figura 17. Modelo de grados días de desarrollo de <i>S. catenifer</i> para el área de estudio, 2021. La escala de colores representa la cantidad de GDD.	58
Figura 18. Modelo de grados días de desarrollo de <i>S. catenifer</i> para el área de estudio, 2022. La escala de colores representa la cantidad de GDD.	59
Figura 19. Modelo de grados días de desarrollo de <i>S. catenifer</i> para el área de estudio, 2023. La escala de colores representa la cantidad de GDD.	60
Figura 20. Modelo de distribución potencial de <i>Stenoma catenifer</i> para el departamento de Caldas.	64
Figura 21. Mapa de riesgo promedio a la presencia de huevos <i>S. catenifer</i> en área de estudio.	66
Figura 22. Mapa de riesgo promedio a la presencia de larvas <i>S. catenifer</i> en área de estudio.	67
Figura 23. Mapa de riesgo promedio a la presencia de pupas <i>S. catenifer</i> en área de estudio.	67
Figura 24. Mapa de riesgo promedio a la presencia de adultos <i>S. catenifer</i> en área de estudio.	68

Tablas

Tabla 1. Duración de los estados de desarrollo, cantidad de huevos, período de oviposición, nivel de infestación y daño causado por <i>Stenoma catenifer</i>	31
Tabla 2. Variables bioclimáticas usadas para la generación del modelo de distribución potencial de <i>Stenoma catenifer</i>	52

Lista de cuadros

Cuadro 1. Temperatura base de <i>S. catenifer</i> . Umbral térmico inferior de desarrollo (T_b), constante térmica (K), ecuación de regresión ($1/D$) y coeficiente de determinación (R^2) de los estadios de huevo, larva (oruga), pupa y ciclo biológico (huevo - adulto).....	32
--	----

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN

El aguacate (*Persea americana*), una fruta originaria de México y Centroamérica, ha adquirido una importancia económica a nivel mundial debido a sus diversas aplicaciones tanto en la industria alimentaria como en la cosmética (Pérez *et al.*, 2015; FAO, 2018). Con más de 60 países involucrados en su cultivo y comercialización, el aguacate se ha convertido en un producto altamente demandado en los mercados internacionales (ICA, 2012). A pesar de que México lidera la producción mundial de aguacate, otros países como Colombia han experimentado un crecimiento notable en su producción, impulsados por iniciativas gubernamentales como el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 (PND, 2019).

Colombia, ahora el cuarto productor mundial de aguacate, ha visto un aumento en el área sembrada, especialmente en regiones como Caldas, donde se han establecido miles de hectáreas de este cultivo (ICA, 2022; ICA, 2021). Sin embargo, este crecimiento no está exento de desafíos, ya que el aguacate es vulnerable a una serie de plagas que pueden afectar tanto la cantidad como la calidad de la producción (ICA, 2012). Una de las plagas más limitantes es el barrenador del hueso del aguacate (*Stenoma catenifer*), ya que puede provocar graves pérdidas económicas. Este insecto daña tanto los frutos, afectando la pulpa y la semilla, como las ramas al perforarlas (Velásquez, 2021), con pérdidas que pueden ascender hasta el 80% de la producción, llegando incluso al 100% en casos de incidencia severa (CABI, 2020; SENASIGA-DGSV, 2016).

1.1 Descripción del área problemática

La presencia de *Stenoma catenifer* plantea un desafío considerable para los productores de aguacate en Colombia, especialmente en regiones como Caldas, que representan una parte significativa de la producción nacional. Este insecto fitófago, comúnmente conocido como barrenador del aguacate, posee el potencial de ocasionar daños devastadores en los cultivos, lo que se traduce en pérdidas económicas sustanciales para los agricultores. De acuerdo con datos recopilados por CABI (2020) y SENASIGA-DGSV (2016), se estima que la presencia de *Stenoma catenifer* puede reducir la producción de aguacate hasta en un 80%, llegando incluso al 100% durante periodos de alta incidencia.

La gravedad del problema se ve acentuada por la importancia económica del aguacate en Colombia. Este cultivo experimenta un crecimiento notable en el país y desempeña un papel significativo en la economía agrícola nacional. Sin embargo, la presencia del barrenador del aguacate amenaza la sostenibilidad y la rentabilidad a largo plazo de esta industria en expansión. La situación se agrava debido a la falta de estrategias efectivas de manejo de la plaga, lo que pone en riesgo la estabilidad económica de los productores de aguacate. En este contexto, la aplicación de la tecnología geoespacial emerge como un recurso crucial en la lucha contra esta plaga. Permite un monitoreo preciso y en tiempo real de la distribución y la intensidad de la infestación en los cultivos (Olvera *et al.*, 2020), al facilitar la identificación de áreas vulnerables y patrones de dispersión del insecto, lo que a su vez posibilita la implementación de estrategias de manejo específicas y focalizadas. Así, proporciona una visión holística del problema y permite una toma de decisiones más informada y eficiente por parte de los agricultores y las autoridades sanitarias (Olvera *et al.*, 2020).

Para abordar de manera efectiva este problema, resulta crucial desarrollar e implementar estrategias de manejo integrado de plagas que hagan uso central de la tecnología geoespacial. Esto implica la adopción de prácticas culturales, biológicas y químicas fundamentadas en datos espaciales y análisis geoespaciales para controlar la población del insecto y mitigar su impacto en los cultivos. Además, es esencial fomentar una investigación continua para obtener una comprensión más profunda de la biología, el comportamiento y los patrones de distribución de la plaga, lo que facilitará el desarrollo de medidas preventivas y de control más eficaces.

1.2 Formulación del problema

Stenoma catenifer representa un riesgo considerable para la producción de aguacate, en los ámbitos local, regional y nacional, debido a su capacidad para causar daños rápidos y extensos a los cultivos. El daño y las poblaciones de la plaga se distribuyen de manera generalizada, afectando áreas agroecológicas que abarcan un amplio rango altitudinal, desde los 400 hasta los 2.400 m.s.n.m. (Carabalí, 2020). Aunque los agricultores realizan monitoreos tradicionales para vigilar la plaga, estos métodos son ineficientes y ambiguos. Por lo tanto, surge la necesidad de implementar una dinámica de vigilancia más amplia y efectiva para prevenir la dispersión y el ataque de la plaga a los cultivos. En este contexto, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo puede aprovecharse la tecnología geoespacial para mejorar la eficacia del control de *Stenoma catenifer* en los sistemas productivos de aguacate en el departamento de Caldas?

El propósito de esta investigación es indagar en el potencial de la tecnología geoespacial para respaldar las acciones de vigilancia, monitoreo y control de esta plaga. Se busca así generar estrategias más efectivas para abordar los problemas fitosanitarios en el sector agrícola.

1.3 Justificación

El aguacate, ampliamente reconocido por sus propiedades nutritivas y su versatilidad industrial, ha experimentado un notable incremento en su producción en Colombia en los últimos años. Según datos proporcionados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2020), en el año 2020 se sembraron aproximadamente 93,045 hectáreas de este fruto, con una producción total de 638,591 toneladas. Es relevante destacar que el departamento de Caldas se ha posicionado como una de las principales regiones productoras del país, lo que refleja la creciente demanda de este producto en el mercado.

No obstante, pese al crecimiento constante en la producción de este cultivo, los desafíos ocasionados por los insectos representan una limitación para los productores. Entre las plagas más problemáticas se encuentra el barrenador del hueso del aguacate (*Stenoma catenifer*), capaz de ocasionar considerables pérdidas que pueden reducir la cosecha hasta en un 95%. Para hacer frente a esta plaga, los agricultores a menudo recurren al uso excesivo de insecticidas, lo cual no solo restringe la comercialización, sino que también afecta la reputación del aguacate en los mercados internacionales (Manrique *et al.*, 2009). Ante esta problemática, es necesario realizar estudios exhaustivos sobre el comportamiento y distribución de esta plaga, así como adoptar tecnologías disponibles y desarrollar nuevas alternativas para su manejo.

Autores como Olvera *et al.* (2020) han resaltado la importancia de la tecnología geoespacial en la detección y seguimiento de plagas agrícolas. Utilizando modelos predictivos y análisis de imágenes satelitales, se puede identificar la presencia y el comportamiento de organismos nocivos. La integración de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la prospección fitosanitaria del barrenador del aguacate permitirá la formulación de estrategias basadas en la modelación de su distribución potencial, identificando áreas de mayor riesgo y

concentración de la plaga. Esto simplificará la toma de decisiones para su manejo, incluyendo la determinación de la ubicación de las plantas hospederas y la posible intensidad del daño, contribuyendo así a reducir las pérdidas económicas y mejorar la eficiencia de la producción, al mismo tiempo que se minimiza el uso de agroquímicos y su impacto ambiental.

Este estudio se enfoca en abordar el problema de la incidencia de *Stenoma catenifer* en los sistemas productivos de aguacate en el departamento de Caldas, con énfasis en Aguadas, Pácora y Aranzazu. Para alcanzar este objetivo, se llevarán a cabo una serie de actividades prácticas que incluyen la construcción de un mapa de riesgo utilizando herramientas geoespaciales. Este mapa permitirá determinar el riesgo potencial de la plaga y su distribución en la zona de estudio entre los años 2018 y 2023.

Inicialmente, se buscó identificar espacialmente la superficie sembrada de los hospederos comerciales y rurales, lo que proporcionó una visión clara de la extensión de los cultivos de aguacate en el departamento de Caldas. Luego, se procedió a caracterizar las unidades de calor de *Stenoma catenifer* mediante análisis geoestadístico, utilizando mapas de Voronoi para visualizar y comprender cómo se distribuye esta plaga en función de las condiciones térmicas.

Además, se delimitaron e identificaron las áreas de distribución potencial de la especie mediante el modelo Maxent, lo que permitió priorizar las zonas más vulnerables. Por último, se realizó un mapa de riesgo que mostró de manera clara la amenaza de la plaga en los sistemas productivos de aguacate en el área de estudio, lo cual puede facilitar la toma de decisiones informadas por parte de los agricultores y las autoridades sanitarias.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Utilizar herramientas geoespaciales para construir un mapa de riesgo de *Stenoma catenifer*, con el objetivo de evaluar el nivel de amenaza potencial que esta plaga representa para los sistemas productivos de aguacate en el área de estudio durante el período de 2018 a 2023.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar espacialmente la superficie sembrada de los hospederos comerciales y rurales de aguacate en el departamento de Caldas.
- Caracterizar las unidades de calor (grados días de desarrollo) de *Stenoma catenifer* mediante análisis geoespacial, utilizando mapas de Voronoi.
- Delimitar e identificar las áreas de riesgo a *Stenoma catenifer* mediante un modelo de distribución potencial de la plaga.
- Construir un mapa de riesgo que permita mostrar la amenaza de la plaga en los sistemas productivos de aguacate en el área de estudio.

3 ANTECEDENTES

Stenoma catenifer es una plaga que ha generado preocupación en los cultivos de aguacate en diversas regiones del mundo. Su presencia se ha registrado en diversas regiones de Norteamérica, como México. Asimismo, ha sido reportada en Centroamérica, abarcando países como Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Panamá. En Sudamérica, se ha encontrado en países como Argentina, Brasil, Colombia, Ecuador, Guayana, Perú y Venezuela (SENASIGA-DGSV, 2016).

Su descubrimiento inicial se remonta en la región neotropical de América Latina, donde se cree que la plaga se originó. Investigaciones recientes han confirmado su presencia en países como México, Colombia, Brasil y otros países de la región (Ríos-Casanova & Heppner, 2019; CABI, 2020). La aparición de esta plaga se atribuye a diversos factores, como cambios en los patrones climáticos, la expansión del comercio agrícola y la implementación de prácticas de manejo inadecuadas en los cultivos de aguacate.

En Colombia, *Stenoma catenifer* se considera una plaga cuarentenaria debido a su impacto potencial en los cultivos de aguacate. Su presencia se ha registrado con variada incidencia en diferentes departamentos y municipios del país. Entre ellos se destacan: el Valle del Cauca, localidades como Palmira, Cerrito, Caicedonia, Sevilla, El Águila, Argelia, Bolívar, Versalles, Riofrío y Trujillo; en Caldas, se incluyen Anserma, Manizales, Villamaría, Aguadas, Pácora y Salamina; en el Quindío, municipios como Finlandia, Calarcá, Salento, Quimbaya, Pijao y Circasia; en Risaralda, Pereira, Santa Rosa de Cabal, Apía, Guática y Quinchía; en Tolima, Fresno, Herveo y Alvarado; en Antioquia, se reportan Abejorral, Sonsón, Jericó, Marinilla, Carmen de Viboral, Jardín, La Ceja, San Vicente, El Retiro, Guarne,

Támesis y Urrao; en el Cauca, Sotará, Timbío, Morales, El Tambo y Toribio; en Nariño, San Lorenzo y La Unión; en Huila, Pitalito; en Bolívar, Carmen de Bolívar; y en Magdalena (Carabalí *et al.*, 2023).

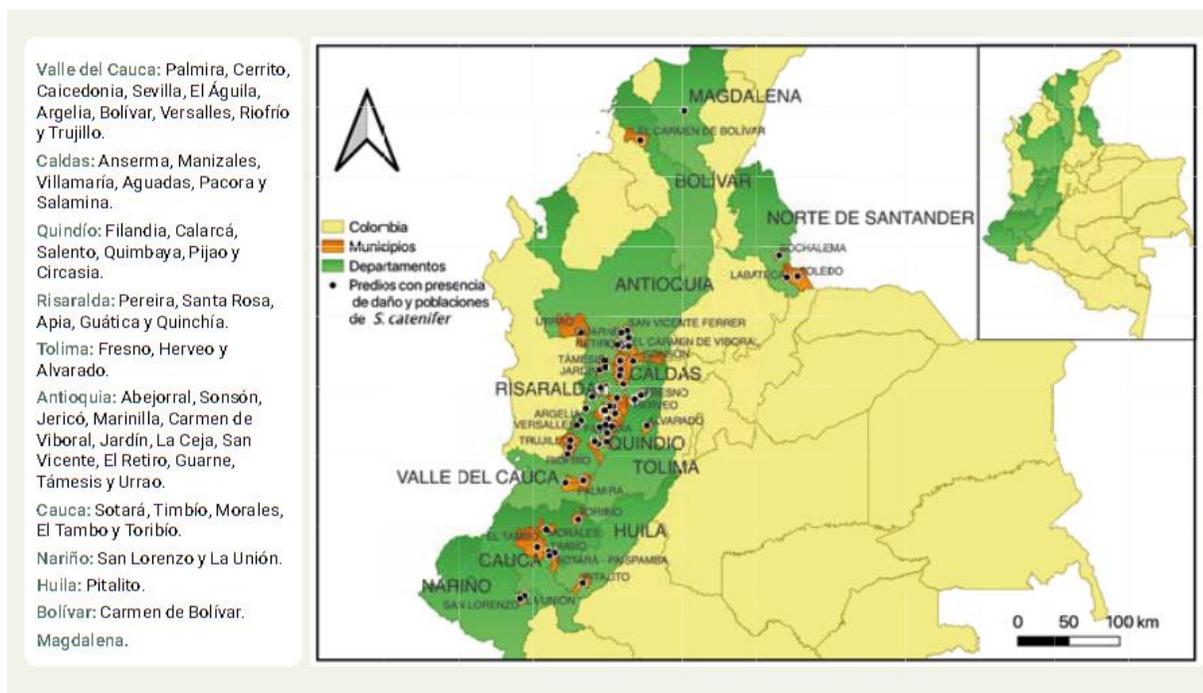


Figura 1. Distribución geográfica de *Stenoma catenifer* en los departamentos de Colombia.

Fuente: Carabalí *et al* (2023).

El barrenador del aguacate, tiene una marcada preferencia por especies de la familia Lauraceae. Dentro de sus principales hospederos se encuentra *Persea americana*, mientras que se han identificado como hospederos secundarios a *P. schiedeana*, *Beilschmiedia* sp., *Chlorocardium rodiedi*, *Nectandra megapotamica* y *Cinnamomum camphora* (SENASIGADGSV, 2016).

El ciclo de vida de esta plaga se caracteriza por su capacidad para infestar los frutos del aguacate en etapas tempranas de desarrollo, lo que conduce a daños considerables en la calidad y la producción de la fruta. Los estudios han demostrado que esta plaga es capaz de

completar su ciclo de vida en un período relativamente corto, lo que aumenta su potencial para causar daños en los sistemas productivos en un corto período de tiempo (Ríos-Casanova & Heppner, 2019). La aparición y propagación de esta plaga ha generado una respuesta urgente tanto de la comunidad científica como agrícola, con un enfoque en comprender los factores que contribuyen a su proliferación y en desarrollar estrategias efectivas para su manejo y control. Además de investigar la biología, ecología y genética de la plaga, se han propuesto soluciones basadas en tecnología geoespacial para mitigar su impacto en los cultivos de aguacate. Estas soluciones incluyen la implementación de sistemas de monitoreo y detección temprana mediante el uso de imágenes satelitales y drones, la creación de modelos predictivos para mapear la distribución espacial de la plaga, y la utilización de técnicas de manejo integrado de plagas que aprovechan datos geoespaciales para optimizar la aplicación de medidas de control (Rodríguez *et al.*, 2020; FAO, 2021).

Olvera *et al.* (2020) emplearon un enfoque geoespacial para evaluar el riesgo potencial de HLB en Colombia. El estudio combinó datos sobre la distribución de plantas hospederas, el vector *Diaphorina citri* y variables bioclimáticas para identificar áreas con mayor probabilidad de infestación.

A diferencia de Montoya *et al.* (2010), quienes utilizaron el método de interpolación por ponderación inversa a la distancia (IDW) para estimar la presencia de la mosca del Mediterráneo a nivel de zonas, Olvera *et al.* (2020) optaron por un modelado estadístico más complejo.

Lo anterior, sirve de referencia en la selección del método de interpolación y modelos de máxima entropía que describen la distribución de *Stenoma catenifer* en el flanco oriental de la cordillera central en Caldas.

Así mismo se encontró que, en Colombia, ya se ha implementado el uso exitoso de la inteligencia artificial para predecir plagas en los cultivos de aguacate Hass. Este innovador método, desarrollado por investigadores colombianos, combina datos meteorológicos y análisis de imágenes de drones para pronosticar con alta precisión la presencia de *Stenoma catenifer*, también conocida como barrenador del hueso del aguacate. Los resultados de esta investigación han demostrado que la inteligencia artificial puede prever con hasta un 80% de precisión la aparición de esta plaga, permitiendo a los agricultores tomar medidas preventivas de manera oportuna y eficaz. Este avance tecnológico representa una herramienta valiosa para proteger la producción de aguacate, reducir las pérdidas y promover la sostenibilidad en el sector agrícola colombiano (Agronet, 2023).

3.1 Relación entre el clima y las plagas

Las variaciones climáticas pueden incidir directa o indirectamente en la proliferación de plagas que afectan los cultivos. Luna *et al.* (2017) contribuyeron al desarrollo de evaluaciones de riesgo de plagas para el cultivo de frutas al estudiar la distribución geográfica de cinco importantes insectos plaga del aguacate en México (*Conotrachelus aguacatae*, *Conotrachelus perseae*, *Heilipus lauri*, *Copturus aguacatae*, *Stenoma catenifer*) y su interacción con las zonas comerciales de cultivo de aguacate. Para ello, utilizaron el método de máxima entropía (MaxEnt) para evaluar el impacto de los factores bioclimáticos en la propagación de estas plagas. El modelo incorporó 19 variables climáticas globales y datos de elevación para analizar su influencia. Los resultados destacaron que la altitud, la regularidad de la temperatura y la estacionalidad de las precipitaciones fueron las variables más influyentes en la propagación potencial de las plagas observadas, contribuyendo con un 72.6% para *C. aguacatae*, 76.1% para *C. perseae*, 79.1% para *Copturus aguacatae*, 77.0% para *H. lauri* y 66.7% para *S. catenifer*.

En otro estudio, Velázquez *et al.* (2020) monitorearon las fluctuaciones de la población de plagas de *S. catenifer* Walsingham en los cultivos de aguacate Hass en México, explorando su relación con la humedad relativa y la temperatura. Utilizando trampas con feromonas en cuatro plantaciones de aguacate, registraron porcentajes de infestación del 65% para el primer huerto, 55% para el segundo, 17% para el tercero y 12% para el cuarto. Observaron una correlación negativa entre el número de *S. catenifer* capturadas, la humedad relativa ($r = -0.21$) y la temperatura ($r = -0.25$). Las capturas de insectos se registraron dentro de un rango de temperatura de 15.8 °C a 25.4 °C, con una humedad relativa fluctuante entre el 41.1% y un máximo del 96.1%. Esto sugiere que el riesgo relativo de infestación es casi insignificante en todo el rango de temperatura cuando la humedad relativa es baja, destacando la importancia de la humedad relativa durante las bajas temperaturas.

Además, Ibrahim *et al.* (2022) modelaron la dinámica poblacional de dos plagas del aguacate (*Bactocera dorsalis* y *Ceratitis* spp.) en Kenia utilizando datos de lluvia total, temperatura promedio, humedad relativa y conteos de plagas en trampas. Utilizando técnicas de redes neuronales difusas (FNN), desarrollaron modelos que superaron un coeficiente de determinación (R^2) mayor a 0.85 en la predicción de la dinámica de las plagas. Estos modelos pueden utilizarse para identificar y predecir niveles de daño de plagas en los cultivos.

4 REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL

En Colombia, *Stenoma catenifer* se considera una plaga cuarentenaria debido a su potencial impacto en los cultivos de aguacate. En este sentido, las Normas Internacionales para Medidas Fitosanitarias (NIMF) son importantes para regular y gestionar la presencia de esta plaga en el país.

El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) es la entidad encargada de establecer las regulaciones y normativas fitosanitarias en el país. En este sentido, la Resolución ICA 1507, del 22 de 2016, declara oficialmente a *Stenoma catenifer* como una plaga cuarentenaria, lo que implica que su presencia debe ser monitoreada y controlada de manera estricta para prevenir su propagación y minimizar los daños en los cultivos de aguacate.

La normativa fitosanitaria colombiana se basa en estándares internacionales y en normativas establecidas por organismos como la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF) y las NIMF. Estas regulaciones buscan promover el comercio seguro de productos agrícolas y garantizar la protección de la salud de las plantas en Colombia y en otros países.

A continuación, se explica cómo se relacionan estas normas con *Stenoma catenifer*:

4.1 Normas NIMF 4 de 1995 - Requisitos para el establecimiento de áreas libres de plagas:

Estas normas establecen los requisitos y procedimientos para el establecimiento de áreas libres de plagas. En el caso de *Stenoma catenifer*, estas normas podrían ser relevantes para implementar medidas de control en áreas donde se detecta la presencia de la plaga, con el objetivo de contener su dispersión y evitar su propagación a áreas libres de la plaga.

4.2 Normas NIMF 6 de 1997 - Directrices para la vigilancia:

Estas normas ofrecen directrices para la realización de la vigilancia fitosanitaria, es decir, la observación sistemática y continua de la presencia de plagas. En el caso de *Stenoma catenifer*, estas normas serían aplicables para establecer programas de vigilancia que permitan monitorear la presencia y la distribución de la plaga en áreas de cultivo de aguacate.

4.3 Normas NIMF 7 de 1997 - Sistema de certificación para la exportación:

Estas normas establecen los requisitos y procedimientos para certificar la calidad fitosanitaria de productos agrícolas destinados a la exportación. En el caso del aguacate, la presencia de *Stenoma catenifer* puede afectar la certificación para la exportación, por lo que estas normas son relevantes para garantizar que los productos exportados estén libres de esta plaga.

4.4 Normas NIMF 8 de 1998 - Determinación de la situación de una plaga en un área:

Estas normas proporcionan directrices para determinar la situación fitosanitaria de una plaga en un área específica. Para *Stenoma catenifer*, estas normas serían aplicables para evaluar la presencia y distribución de la plaga en áreas productoras de aguacate en Colombia. Esto es crucial para identificar la extensión del problema y tomar medidas de control adecuadas.

4.5 Normas NIMF 1 de 2006 - Principios fitosanitarios para la protección de las plantas y la aplicación de medidas fitosanitarias en el comercio internacional:

La anterior norma detalla los principios fundamentales para la protección de las plantas y la implementación de medidas fitosanitarias en el contexto del comercio internacional. Esta normativa aborda aspectos esenciales relacionados con la protección de las plantas, como la

soberanía, necesidad, riesgo manejado, impacto mínimo, transparencia, armonización, no discriminación, justificación técnica, cooperación y equivalencia de medidas fitosanitarias, entre otros. Asimismo, proporciona pautas específicas para la aplicación de medidas fitosanitarias en el movimiento internacional de personas, productos y medios de transporte. Estas incluyen el análisis de riesgo de plagas, el establecimiento de listas de plagas, el reconocimiento de áreas libres de plagas, la vigilancia, la notificación de plagas, la certificación fitosanitaria y la seguridad fitosanitaria de los envíos. Además, la norma también aborda los objetivos establecidos por la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF), destacando la importancia de promover prácticas que salvaguarden la salud y la integridad de los ecosistemas agrícolas a nivel mundial (Ortega, 2018).

4.6 Documento del Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES 3514) de abril 21 de 2008

La implementación de la Política Nacional Fitosanitaria y de inocuidad para las cadenas de frutas y otros vegetales ofrece directrices claves para mejorar las condiciones fitosanitarias de las frutas, particularmente las tropicales, que han experimentado un notable crecimiento en Colombia en los últimos años. Este aumento ha contribuido a satisfacer la demanda nacional y a consolidar su presencia en ciertos mercados internacionales (Cortés *et al.*, 2021).

El ICA mediante la Dirección Técnica de Epidemiología y Vigilancia Fitosanitaria formula, prepara y desarrolla planes, programas, proyectos y procedimientos para proteger la producción agropecuaria de plagas y enfermedades que afectan y pueden afectar las áreas productivas comerciales en Colombia. Lo anterior es llevado a cabo a través de actividades de

prevención, vigilancia y control de riesgos sanitarios, biológicos y químicos en especies animales y vegetales en todo el país.

En razón a lo mencionado y a la gran demanda que ha tenido el aguacate en el mercado internacional, en específico la variedad Hass, el ICA ha establecido un referente normativo para la producción nacional, relacionado con las medidas de manejo y control fitosanitario, el cual se enlista a continuación (Cortés *et al.*, 2021):

4.7 Resolución ICA 3180 del 26 de agosto de 2009: Por medio de la cual se establecen los requisitos y procedimientos para la producción y distribución de material de propagación de frutales de viveros.

Esta resolución regula cómo se debe producir y distribuir el material de plantación de árboles frutales en los viveros, asegurando que cumpla con ciertos estándares y requisitos establecidos por el Instituto Colombiano Agropecuario.

4.8 Resolución ICA 1507 del 22 de febrero de 2016: Por medio de la cual se reglamenta las plagas de control oficial en el cultivo del aguacate y establece sus medidas de manejo y control.

El ICA, en su compromiso con la reglamentación fitosanitaria y la implementación de medidas preventivas, establece como plagas de control oficial en el cultivo de aguacate *Persea americana* Miller a ciertas plagas. Estos incluyen:

1. Barrenador de la semilla *Heilipus lauri* Boheman (Coleóptera: Curculionidae)
2. Barrenador de la semilla *Heilipus trifasciatus* (Fabricius) (Coleóptera: Curculionidae)

3. Barrenador del fruto, semilla y ramas *Stenoma catenifer* Walsingham (Lepidóptera: Oecophoridae).

Este enfoque busca la erradicación y la contención de plagas cuarentenarias, así como la gestión de aquellas no cuarentenarias reglamentadas, asegurando la protección de los cultivos y la salud del sector agrícola.

4.9 Resolución ICA 448 del 20 de enero de 2016: Por medio de la cual se establecen los requisitos para el registro ante el ICA de los predios de producción de vegetales para exportación en fresco, el registro de los exportadores y el registro de las plantas empacadoras de vegetales para la exportación en fresco.

El ICA tiene como objetivo fundamental controlar la sanidad y la fitosanidad de las importaciones y exportaciones de productos vegetales. Esto se hace para evitar la introducción de plagas que puedan perjudicar la agricultura del país y para certificar la calidad sanitaria de las exportaciones.

4.10 Resolución ICA 3973 del 14 de abril de 2016: Por medio de la cual se reglamenta la licencia fitosanitaria para la movilización de material vegetal en el territorio nacional. Esta resolución establece los requisitos y procedimientos que deben seguirse para obtener y utilizar esta licencia, que es fundamental para garantizar la sanidad y la seguridad de la movilización de material vegetal en el país.

4.11 Resolución ICA 30021 del 28 de abril de 2017: Por medio de la cual se establecen los requisitos para la certificación de las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) en producción primaria de vegetales y otras especies para consumo humano.

Esta resolución define los estándares y procedimientos que deben seguir los productores agrícolas para garantizar que sus prácticas de cultivo cumplan con criterios de calidad, seguridad y sostenibilidad establecidos por el Instituto Colombiano Agropecuario.

5 REFERENTE TEÓRICO

En esta sección se desarrolla el marco teórico, el cual aborda las teorías y conceptos fundamentales empleados para definir el problema de investigación planteado en este documento.

5.1 Características biológicas y ciclo de vida del barrenador del aguacate

5.1.1 Clasificación taxonómica del barrenador del hueso del aguacate, *Stenoma catenifer* Walsingham, 1912

Stenoma catenifer, conocido como el barrenador del aguacate, es una polilla que pertenece a la familia Oecophoridae. Su biología y comportamiento presentan desafíos en su control efectivo en los campos agrícolas.

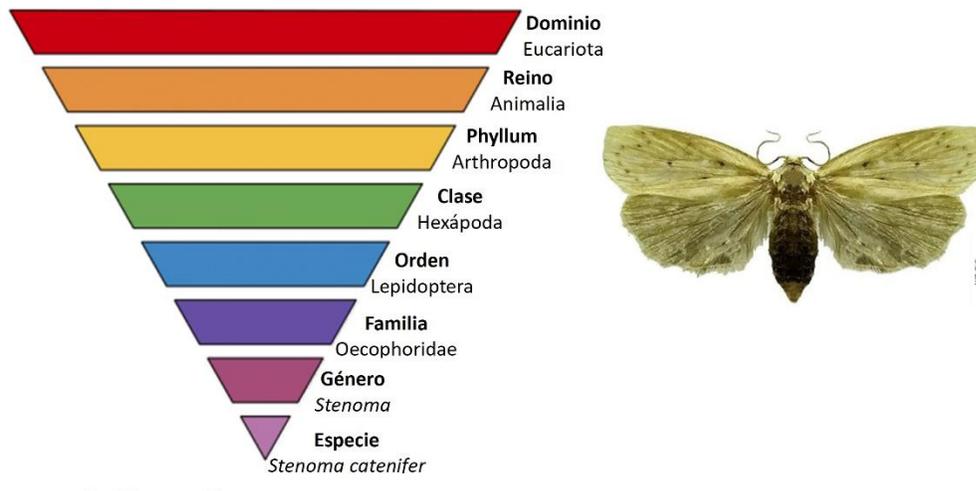


Figura 2. Clasificación taxonómica de *Stenoma catenifer* Walsingham (1912), insecto barrenador del aguacate.

Fuente: Construcción propia, modificado de AGROSAVIA, 2024

5.1.2 *Biología*

Stenoma catenifer, una especie de polilla, es conocida por los daños considerables que ocasiona en los cultivos de aguacate en diferentes partes del mundo. Desde una perspectiva biológica, tanto los machos como las hembras comparten similitudes en su morfología general y ciclo de vida. Sin embargo, difieren en su comportamiento reproductivo y en la forma en que realizan la oviposición, como señalan Jiménez & Rodríguez, (2014) y Kondo *et al.*, (2020).

En cuanto a la morfología, los adultos son polillas de tamaño relativamente pequeño, con una envergadura que varía entre los 18 y 25 milímetros. Tanto los machos como las hembras presentan alas de coloración marrón claro a gris oscuro, con patrones de marcas y manchas que les permiten camuflarse en su entorno. Sin embargo, las hembras presentan un ovipositor especializado, una estructura alargada y afilada en la parte posterior del abdomen que les permite depositar sus huevos en los frutos del aguacate (Jiménez & Rodríguez, 2014; Kondo *et al.*, 2020).

Así mismo, *Stenoma catenifer* es una especie que está intrínsecamente ligada a la disponibilidad de frutos de aguacate. En regiones tropicales y subtropicales, la dinámica poblacional puede mostrar fluctuaciones constantes a lo largo del año, debido a la presencia de hospederos con distintos periodos de floración. Durante el crecimiento vegetativo, las poblaciones tienden a aumentar, alcanzando su punto máximo justo antes de la temporada de cosecha (CABI, 2020; Carabalí, 2020; Carabalí *et al.*, 2021).

5.1.3 *Hábitos*

La polilla del hueso del aguacate adapta sus hábitos según la disponibilidad de frutos y el desarrollo de las ramas en los distintos genotipos y cultivares de aguacate *P. americana*. Durante la fase vegetativa o de floración, su presencia adulta se correlaciona con el

crecimiento de brotes jóvenes (Carabalí *et al.*, 2023). Las hembras, que viven aproximadamente seis días, aprovechan este período para aparearse y depositar los huevos en frutos y ramas jóvenes, siendo capaces de ovipositar en frutos de diferentes edades fenológicas, desde 2 a 3 meses hasta 7 meses de edad. Esta versatilidad en la elección del hospedero indica una amplia adaptabilidad de la especie (Carabalí *et al.*, 2021; Alcaraz, 2013).

Durante la fase reproductiva, las hembras de *Stenoma catenifer* seleccionan frutos en estados fenológicos de crecimiento y llenado avanzado (EF-712 a EF-719), mostrando preferencia por aquellos que presentan mayor rugosidad en su superficie (Carabalí *et al.*, 2021). Durante la oviposición, los huevos son depositados entre las depresiones o cavidades presentes en la cáscara del fruto. Después de la incubación, las larvas emergen del huevo y penetran el fruto mediante una pequeña incisión en la cáscara, dejando rastros de excremento y residuos de ingestión en el tejido afectado (Carabalí *et al.*, 2021).



Figura 3. Estados fenológicos del aguacate en etapa de crecimiento y llenado de frutos (EF-712 a EF-719). Tres a seis meses después de floración.

Fuente: Correa *et al.*, 2022.

En la etapa vegetativa, la hembra prefiere ovipositar en las depresiones de las ramas jóvenes aún no lignificadas. Esta estrategia le permite establecerse en áreas vulnerables de la

planta, facilitando su alimentación y ciclo de vida. Los hábitos de oviposición en frutos y ramas jóvenes resaltan la capacidad de adaptación de *Stenoma catenifer* a diferentes partes de la planta de aguacate, subrayando su versatilidad y el potencial para causar daños significativos en los sistemas productivos de aguacate (Carabalí *et al.*, 2021).

Durante la etapa larval, *Stenoma catenifer* se nutre de la pulpa y la semilla del aguacate. Conforme la larva se desarrolla, aumenta la ingesta de estas estructuras, generando galerías irregulares de color marrón oscuro en su interior. Los residuos de su alimentación son expulsados hacia el exterior, formando montículos de aserrín fino en la superficie del fruto (Carabalí, 2020; Carabalí *et al.*, 2021).

En los primeros estadios larvales, las galerías generadas por el barrenador se presentan como diminutas perforaciones en la pulpa del aguacate. Sin embargo, conforme la larva se desarrolla, estas galerías adquieren un tamaño considerable y suelen estar acompañadas de pequeñas acumulaciones de excremento. Esta etapa se lleva a cabo íntegramente dentro del fruto, hasta que la larva alcanza el estado de prepupa, momento en el cual se prepara para su transformación hacia la fase adulta (Carabalí *et al.*, 2021).

5.1.4 Ciclo de vida de Stenoma catenifer

El ciclo de desarrollo de *Stenoma catenifer* comprende diversas fases, iniciando con el huevo, que presenta una forma ovalada y un tono inicial verde pálido, el cual evoluciona hacia un tono blanco cremoso. La hembra deposita los huevos de manera individual o en agrupaciones en el fruto, pedúnculo y la unión entre ambos. La incubación de los huevos abarca un período de cinco a seis días (SENASICA- DGSV, 2016).



Figura 4. A) Huevos de *Stenoma catenifer* depositados tanto individualmente como en grupos en el fruto, pedúnculo y la unión entre ambos. B) Huevos agrupados. C) Vista en primer plano de dos huevos.

Fuente: SENASICA- DGSV, 2016

Después de la eclosión de los huevos, las larvas emergen y se alimentan de la pulpa y el tejido del fruto, creando galerías características que eventualmente pueden afectar la calidad del aguacate. Durante la fase larval, las larvas pasan por cinco instars o etapas de desarrollo, creciendo y alimentándose hasta que están listas para empupar, lo cual puede ocurrir dentro del fruto, semilla, y el suelo. La larva completa su desarrollo en aproximadamente 20 días dentro del fruto (Acevedo-Jaramillo *et al.*, 1972; SENASICA- DGSV, 2016).



Figura 5. Larvas de *Stenoma catenifer*. A) Superficie dorsal de tono violeta. B) Superficie ventral de tono verde azulado.

Fuente: SENASICA- DGSV, 2016

La pupa es una etapa inactiva donde la larva se encapsula en un capullo protector y sufre una metamorfosis interna que culmina con la formación del adulto. La pupa es de color café ligeramente brillante y tiene una duración entre 14.1 y 15.3 días dependiendo de las condiciones de temperatura (SENASICA-DGSV, 2016).

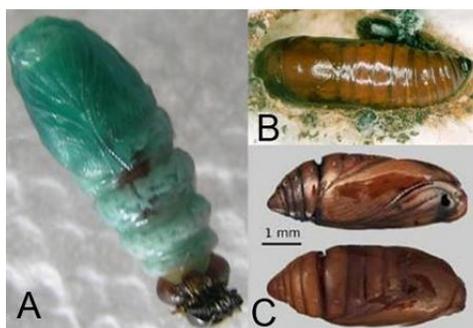


Figura 6. A) Pupa recién formada con tonalidad azul turquesa. B y C) Pupas de un color café brillante.

Fuente: SENASICA- DGSV, 2016

Una vez que emergen como adultos, tanto los machos como las hembras de *Stenoma catenifer* buscan activamente nuevos hospederos para ovipositar y continuar el ciclo de vida de la plaga. Las hembras depositan sus huevos en los frutos del aguacate utilizando su ovipositor, mientras que los machos buscan hembras para la reproducción. Los adultos se caracterizan por un penacho en la cabeza de color café rojizo, ojos negros, antenas amarillas o grisáceas, y un palpo labial largo. Las hembras son ligeramente más grandes que los machos, y ambos presentan alas con patrones distintivos. Ambos individuos son predominantemente nocturnos y tienen una longevidad promedio de entre 5.7 y 7.0 días, dependiendo de las condiciones ambientales (SENASICA-DGSV, 2016).



Figura 7. Adulto de *Stenoma catenifer*.

Fuente: SENASICA- DGSV, 2016

Manrique *et al.* (2014) señalaron que se han registrado considerables variaciones en los datos documentados sobre la duración y viabilidad de los estados de desarrollo de *S. catenifer* en la literatura. Estas discrepancias se atribuyen a la influencia de las condiciones ambientales, la calidad del alimento suministrado y los métodos empleados para evaluar su desarrollo, ver Tabla 1.

Sin embargo, la notable capacidad reproductiva y alta tasa de fecundidad de *S. catenifer* juegan un papel fundamental en su éxito como plaga, permitiéndole generar múltiples generaciones durante una sola temporada de cultivo. Esta adaptabilidad biológica, junto con su habilidad para infestar los frutos del aguacate en diversas etapas de desarrollo, la posiciona como una amenaza significativa para la industria del aguacate a nivel global.

Tabla 1. Duración de los estados de desarrollo, cantidad de huevos, período de oviposición, nivel de infestación y daño causado por *Stenoma catenifer*.

	García, 1967	Acevedo- Jaramillo, 1972	Boscán de Martínez y Godoy 1984.	Hohmann y Meneguim, 1993	Cervantes- Peredo, 1999'
Huevo	---	5.0-6.0	5.57	6.0	5.0
Larva	17	20.0	19.81	15.3	12.2-15.1
Pupa	10	14.1-15.3	11.11	10.6	12.1
Adulto	4	5.7-7.0	4.23	4.7-5.1	5.0
Número de huevos/hembra	---	180-240	---	164	206.2
Periodo de preoviposición	---	2-3	---	2-3	3
Infestación	---	---	---	Hasta 100%	10.0

Fuente: SENASICA- DGSV, 2016

* Los datos disponibles se refieren a *Chlorocardium rodiei*, mientras que para el resto de los datos los autores utilizaron muestras de *Persea americana*.

Cuadro 1. Temperatura base de *S. catenifer*: Umbral térmico inferior de desarrollo (T_b), constante térmica (K), ecuación de regresión ($1/D$) y coeficiente de determinación (R^2) de los estadios de huevo, larva (oruga), pupa y ciclo biológico (huevo - adulto).

Fases/periodo	T_b (°C) (IC)	K (GD)	Equação de regressão	R^2	P
Ovo	9,14 (8,76–10,13)	82,3	$1/D = 0,0126t_i - 0,1111$	0,985	$\leq 0,05$
Lagarta	8,26 (7,44–9,51)	398,4	$1/D = 0,0025t_i - 0,0207$	0,974	$\leq 0,05$
Pupa	8,26 (9,85–10,27)	164,7	$1/D = 0,0061t_i - 0,0612$	0,995	$\leq 0,05$
Ovo-adulto	8,89 (8,61–9,34)	644,5	$1/D = 0,0016t_i - 0,0138$	0,986	$\leq 0,05$

(¹) IC: intervalo de confiança (95%); GD: graus-día.

Fuente: Nava *et al.* (2005).

5.2 Impacto económico y ambiental de *Stenoma catenifer* en los cultivos de aguacate en Colombia y otras regiones

La presencia de *Stenoma catenifer* en los cultivos de aguacate ha tenido importantes repercusiones económicas y ambientales, tanto en Colombia como en otras regiones del mundo. En México, uno de los principales productores mundiales de aguacate, se ha registrado la presencia de esta plaga en varias áreas importantes de producción, como lo son: Chiapas, Colima, Guerrero, Michoacán, Nuevo León, Oaxaca, Tamaulipas, Veracruz y Querétaro, donde se ha implementado un control oficial por parte de las autoridades fitosanitarias (SENASICA-DGSV, 2016). En Brasil, investigaciones realizadas por Nava *et al.* (2006) señalan infestaciones de 1 a 4 larvas por fruto en la variedad Margarida de aguacate, con la posibilidad de encontrar hasta 8 larvas por fruto, lo que sugiere una variabilidad en función del nivel poblacional del insecto en la plantación. En México, Palacios-Torres *et al.* (2011) han documentado infestaciones de hasta 5 larvas por fruto en áreas geográficamente aisladas. Por

último, en Colombia, Manrique *et al.* (2014) han informado de una infestación promedio de 1.52 larvas por fruto de aguacate, con un máximo de 10 larvas.

Las pérdidas económicas en la producción de aguacate, han impactado la rentabilidad de los agricultores y la economía de las regiones productoras. Los daños que provoca incluyen la destrucción de la pulpa y la semilla del aguacate, lo que disminuye el valor comercial de la fruta y afecta adversamente los ingresos de los productores (Carabalí *et al.*, 2021; Murgas *et al.*, 2018). En ausencia de estrategias de manejo adecuadas, este insecto puede acarrear considerables pérdidas en los cultivos comerciales de aguacate, llegando a afectar entre el 45% y el 80% de la producción (Velázquez, 2020).

El control de esta plaga puede conducir a costos adicionales para los agricultores, como la inversión en insecticidas y métodos de control (Hoddle & Hoddle, 2008; Manrique *et al.*, 2014). Estos desembolsos extras inciden en la rentabilidad y generan un impacto adverso en la economía local. En Colombia, se estima que el barrenador del fruto ocasiona pérdidas en la producción que superan el 25,6% (Puentes & Moreno, 1992; Manrique *et al.*, 2014).

La presencia de *Stenoma catenifer* no solo impacta en términos económicos, sino que también conlleva importantes implicaciones ambientales. Varias investigaciones sobre el tema han evidenciado que las galerías generadas por las larvas de esta plaga en los frutos del aguacate pueden debilitar la integridad estructural de los árboles, aumentando así su vulnerabilidad a enfermedades secundarias y potencialmente reduciendo su productividad a largo plazo (Carabalí *et al.*, 2021; Manrique *et al.*, 2014). Además, el uso excesivo de insecticidas para combatir la plaga puede acarrear consecuencias ambientales negativas, como la contaminación del suelo y del agua, así como la disminución de la biodiversidad en los agroecosistemas. Esto último es especialmente preocupante debido al impacto en las

poblaciones autóctonas de insectos, que desempeñan un papel vital en la polinización y el control de otras plagas, aspectos cruciales para la producción sostenible de aguacate (Murgas *et al.*, 2018).

5.3 Uso de herramientas geoespaciales en la agricultura

El uso de herramientas geoespaciales en la agricultura ha transformado la manera en que se manejan los recursos y se toman decisiones en el ámbito rural. Estas herramientas, como los sistemas de información geográfica (SIG), la teledetección y el posicionamiento global (GPS), proporcionan a agricultores, investigadores y responsables de decisiones una visión detallada y precisa del entorno agrícola (Ghosh & Kumpatla, 2022).

Una de las aplicaciones más relevantes de estas herramientas es la gestión de cultivos. Los SIG permiten el mapeo minucioso de los campos, facilitando la planificación de siembras, riegos y aplicación de fertilizantes de manera más eficiente. Además, la teledetección ofrece información sobre la salud de los cultivos y la calidad del suelo, lo que posibilita detectar problemas como sequías, enfermedades vegetales y erosión tempranamente (Ghosh & Kumpatla, 2022).

Otra área clave es la gestión de recursos naturales. Los SIG y la teledetección se emplean para monitorear la deforestación, erosión del suelo y calidad del agua, lo que ayuda a implementar prácticas sostenibles y proteger el medio ambiente (Ghosh & Kumpatla, 2022; Peter *et al.*, 2012).

Asimismo, estas herramientas son esenciales en la planificación urbana y la gestión de riesgos naturales. Los SIG permiten identificar zonas propensas a desastres como inundaciones

y deslizamientos de tierra, posibilitando la toma de medidas preventivas y de mitigación por parte de las autoridades pertinentes (Guzzetti & Tonelli, 2004).

5.4 Evolución de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y otras tecnologías asociadas a la agricultura.

La evolución de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha revolucionado el sector agrícola, proporcionando herramientas poderosas para la gestión eficiente de recursos, la toma de decisiones y la monitorización de cultivos. Los SIG, que permiten la captura, almacenamiento, análisis y visualización de datos geoespaciales, han sido ampliamente adoptados en la agricultura debido a su capacidad para integrar información de múltiples fuentes, como datos climáticos, de suelos y de cultivos, en un único sistema (Ghosh & Kumpatla, 2022). Esto facilita la identificación de patrones espaciales, la evaluación de riesgos y la planificación de cultivos, lo que a su vez contribuye a la optimización de la producción y la gestión sostenible de los recursos agrícolas.

Por otro lado, la teledetección, que utiliza sensores remotos para adquirir información sobre la superficie terrestre desde plataformas como satélites o drones, ha demostrado ser una herramienta invaluable en la agricultura de precisión (Khanal *et al.*, 2020). La capacidad de la teledetección para proporcionar imágenes de alta resolución espacial y temporal permite monitorear el estado de los cultivos, detectar enfermedades o estrés hídrico, y evaluar el rendimiento de manera rápida y precisa (Ghosh & Kumpatla, 2022; Khanal *et al.*, 2020). Además, la combinación de datos de teledetección con técnicas de análisis geoespacial y modelos predictivos ha mejorado la capacidad de los agricultores para tomar decisiones informadas sobre la gestión de sus cultivos, la detección temprana de problemas y la maximización de la productividad (Weiss *et al.*, 2020).

5.5 Agricultura de precisión (AP)

La Agricultura de Precisión se fundamenta en tecnologías electrónicas, de telecomunicación e informática, las cuales permiten la optimización de los procesos en la cadena productiva mediante la integración espacial y temporal de datos. Estos datos son recopilados en el campo a través de herramientas como los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), Sistemas de Información Geográfica (SIG), sensores, satélites y mapas topográficos (Pérez, 2018; González *et al.*, 2019).

Una de las principales herramientas en la agricultura de precisión es la generación de mapas (González *et al.*, 2019). Estos mapas permiten representar la información obtenida en el campo de manera espacial y temporal, de forma comprensible y útil para los agricultores. Esto les permite tomar decisiones informadas y conscientes para una gestión estratégica de los cultivos a mediano y largo plazo (González *et al.*, 2019; Orozco & Ramírez, 2016).

5.6 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas versátiles que permiten recopilar, almacenar, analizar y visualizar datos con un componente espacial o geográfico. Están diseñados para gestionar eficientemente información geográfica, facilitando su uso en investigaciones espaciales y temporales. El término 'geográfico' se refiere al estudio de las características, habitantes y fenómenos de la Tierra. En esencia, los SIG tienen tres objetivos fundamentales: recolectar datos geográficos, analizar objetos y sus interrelaciones, y explorar reglas geográficas avanzadas que determinan nuestro comportamiento espaciotemporal (Lü *et al.*, 2019).

En el contexto de la entomología agrícola, los SIG facilitan el estudio de patrones espaciales en poblaciones insectiles, al integrar datos georreferenciados sobre densidades de

insectos, tipos de cultivo y características del suelo. Esta integración de datos en un SIG posibilita la creación de capas que permiten generar mapas, que brindan una representación visual y analítica detallada de la distribución y dinámica de las poblaciones de interés (Liebhold *et al.*, 1993).

5.6.1 Herramienta Intersección – Intersection

La Herramienta Intersección en ArcGIS es una funcionalidad que permite identificar las áreas donde las geometrías de múltiples conjuntos de datos geospaciales se superponen. Esto posibilita analizar la relación espacial entre diferentes características geográficas, generar nuevos conjuntos de datos basados en la intersección de capas existentes y realizar análisis de superposición para diversos fines, como la planificación urbana, la gestión de recursos naturales y la mitigación de riesgos (ESRI, 2023).

5.7 Modelo de grados días de desarrollo (GDD)

El modelo de grados días de desarrollo (GDD) es una herramienta crucial en entomología agrícola, puesto que se emplea para predecir el desarrollo y la actividad de los insectos en función de la temperatura. Este enfoque parte de la premisa de que la tasa de desarrollo de los insectos está directamente relacionada por la temperatura ambiente (Damos & Savopoulou-Soultani, 2012). A medida que la temperatura aumenta, los insectos pueden completar sus ciclos de vida más rápidamente, mientras que, a temperaturas más bajas, el desarrollo puede ralentizarse o detenerse por completo (Sridhar & Reddy, 2013).

El cálculo de los GDD implica registrar la temperatura diaria y acumular los grados por encima de un umbral específico, conocido como temperatura base, que es la temperatura mínima requerida para que ocurra el desarrollo (Damos & Savopoulou-Soultani, 2012). Este modelo se utiliza ampliamente en la gestión de plagas agrícolas para predecir la actividad de

insectos como *Stenoma catenifer*, ya que permite anticipar períodos críticos, como la eclosión de huevos, la emergencia de adultos o la oviposición. De esta manera, se puede comprender mejor la dinámica poblacional de las plagas y se pueden definir de manera más eficiente los períodos de muestreo y el número de generaciones (Nava *et al.*, 2005).

Al comprender los requisitos térmicos de los insectos y su relación con la temperatura, los agricultores pueden programar acciones de control de manera más precisa y eficiente, minimizando así el impacto de las plagas en los cultivos y reduciendo el uso innecesario de pesticidas (Fand *et al.*, 2014).

5.8 Mapas de Voronoi

Los mapas de Voronoi son una técnica utilizada en el análisis espacial y geoespacial para dividir un área en regiones poligonales basadas en la proximidad a un conjunto de puntos de referencia. Estas regiones, denominadas celdas de Voronoi, consisten en áreas donde cada punto dentro de una celda está más cerca de un punto de referencia específico que de cualquier otro punto de referencia en el conjunto (Okabe *et al.*, 2009).

En el caso del desarrollo de insectos y su relación con la temperatura en su ciclo biológico, los mapas de Voronoi podrían ser útiles para visualizar y comprender cómo se distribuyen estas plagas en función de las condiciones térmicas. Al asignar puntos de referencia a lugares donde se han registrado presencias de insectos, y al utilizar datos de temperatura para definir la distancia en los polígonos de Voronoi, se puede observar cómo puede variar la distribución de las plagas en relación con diferentes rangos de temperatura (Nolan, 2020).

Estos mapas podrían proporcionar información valiosa sobre las áreas donde la temperatura es más propicia para el desarrollo y la supervivencia de los insectos a lo largo de su ciclo biológico. Por ejemplo, podrían identificar áreas con temperaturas óptimas para la

reproducción y el crecimiento de la población de la plaga, así como áreas donde las temperaturas son menos favorables y, por lo tanto, menos propensas a su presencia activa. Esta información podría ser útil para los agricultores y los responsables de la gestión de plagas en la implementación de estrategias de monitoreo y control específicas en función de las condiciones térmicas de cada área.

5.9 Modelo de distribución potencial (MDP)

El Modelo de Distribución Potencial (MDP) se utiliza en la ecología y la biogeografía para predecir la distribución espacial de las especies en función de variables ambientales. Esta metodología se basa en la relación entre la presencia de una especie y las condiciones ambientales, lo que permite inferir dónde podría encontrarse la especie en áreas no muestreadas (Guisan & Zimmermann, 2000).

La aplicación del MDP implica la recopilación de datos sobre la presencia de la especie de interés y variables ambientales relevantes, como temperatura, precipitación y tipo de suelo (Elith & Leathwick, 2009). Estos datos se utilizan para desarrollar un modelo estadístico que relaciona la presencia de la especie con las condiciones ambientales.

La precisión y fiabilidad de los modelos de distribución potencial pueden variar según la calidad de los datos y el modelo estadístico utilizado, por lo que es esencial validar los modelos con datos independientes (Guisan & Zimmermann, 2000). Este enfoque se ha utilizado ampliamente en estudios de conservación de la biodiversidad, manejo de especies invasoras y evaluación de impacto ambiental.

El MDP ha ganado popularidad gracias al avance tecnológico y la disponibilidad de datos espaciales y herramientas informáticas (Elith & Leathwick, 2009). Esto lo convierte en una herramienta valiosa para la investigación y la toma de decisiones en ecología y biogeografía.

5.10 Worldclim

WorldClim es una plataforma que recopila datos climáticos de todo el mundo, ofreciendo una amplia gama de información sobre temperaturas, precipitaciones y otros elementos climáticos clave. Estos datos se presentan en forma de mapas interactivos y capas geoespaciales, lo que facilita su acceso y comprensión para una variedad de usuarios (Fergnani, 2022), desde científicos hasta planificadores urbanos y agricultores.

Una de las principales ventajas de WorldClim es su alta resolución y precisión, lo que permite realizar análisis detallados a nivel local y regional. Esto resulta útil para estudiar patrones climáticos, modelar la distribución de especies, evaluar el impacto del cambio climático y planificar medidas de adaptación (Cerasoli *et al.*, 2022).

WorldClim se utiliza en una amplia gama de campos, incluyendo la investigación académica, la gestión ambiental, la agricultura de precisión y la planificación de conservación. Su acceso gratuito y su interfaz intuitiva lo convierten en una herramienta accesible para todos los que buscan comprender mejor el clima y sus efectos en el planeta.

5.11 Mapas de riesgo

La generación de mapas a partir de información geoespacial está intrínsecamente relacionada con el uso de tecnologías como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estas herramientas permiten la recopilación, almacenamiento, manipulación, análisis y representación de datos geoespaciales en una variedad de formatos, incluidos gráficos, figuras y mapas (Huisman & de By R. A, 2009).

Los mapas de riesgo proporcionan a los productores información valiosa para definir estrategias de control de plagas, enfermedades y otros factores externos que puedan afectar los cultivos. No solo ayudan en las labores de prospección fitosanitaria, sino que también previenen

el desarrollo de altas densidades poblacionales de plagas y enfermedades mediante controles oportunos (Baker *et al.*, 2015).

En la actualidad, existen numerosos programas comerciales con módulos SIG integrados, entre los cuales se encuentran ArcGIS, QGIS, gvSIG, AFS, Grass GIS, entre otros (González *et al.*, 2019). ArcGIS es especialmente popular entre usuarios tanto experimentados como novatos en todo el mundo (Pérez, 2018). Este software proporciona potentes herramientas analíticas para explorar datos geoespaciales, incluidos aquellos relacionados con la producción agrícola. Aunque no está específicamente diseñado para la gestión de datos agrícolas, sus diversas funcionalidades ofrecen un conjunto completo de herramientas para cumplir con los requisitos clave (Pérez, 2018). ArcGIS es comúnmente utilizado por empresas que prestan servicios a los productores agrícolas en el campo de la agricultura de precisión.

6 METODOLOGÍA

La presente propuesta de investigación se caracteriza por ser aplicada y poseer un enfoque tecnológico, empleando un método cuantitativo. La estructura metodológica se fundamenta en el concepto del triángulo epidemiológico para evaluar el riesgo asociado a *Stenoma catenifer*, mediante la correlación de variables ambientales, presencia de la plaga y hospederos (Scholthof, 2007). Cada variable se aborda con métodos especializados, los cuales se detallan más adelante.

6.1 Enfoque metodológico

El enfoque metodológico adoptado para esta investigación es de naturaleza cuantitativa, una decisión fundamentada en la necesidad de analizar exhaustivamente las variables que influyen en el potencial de introducción, establecimiento y dispersión de *Stenoma catenifer* en los sistemas productivos de aguacate (Laiton *et al.*, 2020). Al emplear esta metodología, se busca obtener datos numéricos precisos que permitan una comprensión detallada del comportamiento de la plaga en diferentes contextos ambientales y de manejo agronómico.

La elección del enfoque cuantitativo también se justifica por la capacidad para realizar análisis estadísticos rigurosos y generar resultados cuantificables. Esta precisión es esencial para una evaluación objetiva del riesgo fitosanitario y para proporcionar información relevante que respalde la toma de decisiones en la implementación de medidas de manejo y control de la plaga. Además, los métodos cuantitativos ofrecen la posibilidad de realizar modelos predictivos y proyecciones futuras sobre la dinámica poblacional de *Stenoma catenifer*, lo que resulta fundamental para el desarrollo de estrategias efectivas de manejo integrado de plagas en los cultivos de aguacate.

6.2 Tipo de estudio

El tipo de estudio seleccionado para esta investigación es correlacional, lo que implica que se busca comprender la relación y la influencia mutua entre las variables consideradas en el estudio y la incidencia de *Stenoma catenifer* en los sistemas productivos de aguacate. En este enfoque, se pretende cuantificar y analizar detalladamente cómo diferentes factores pueden influir en la presencia y la severidad de la infestación por esta plaga en los cultivos de aguacate.

Esta metodología permite identificar patrones y tendencias significativas que ayuden a comprender mejor los factores que contribuyen al riesgo fitosanitario y a desarrollar estrategias de manejo más efectivas. Además, al establecer correlaciones entre las variables, se busca proporcionar información útil para la toma de decisiones en la implementación de medidas preventivas y de control dirigidas a mitigar los efectos negativos de *Stenoma catenifer* en la producción de aguacate.

6.3 Definición del área de estudio

El departamento de Caldas, situado en la región central de Colombia, presenta una variada geografía que influye en su actividad agrícola, especialmente en la producción de aguacate. Con un rango altitudinal que va desde los valles interandinos hasta las cumbres de la cordillera central, Caldas exhibe una diversidad topográfica que abarca desde terrenos planos hasta montañosos. La temperatura media anual varía entre los 12°C y los 20°C (Boletín climatológico, 2022), mientras que la evaporación anual promedio se sitúa alrededor de los 1600 mm (IDEAM, 2022). El clima del área de estudio corresponde principalmente a la zona de vida de bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB) (González, 1993), según el esquema de Holdridge; con una precipitación media anual que oscila entre 660 y 1110 mm, presentando una

distribución bimodal caracterizada por dos períodos distintos de lluvia, siendo marzo el mes más seco y noviembre el más lluvioso (Boletín ambiental, 2014).

En este contexto, el presente estudio se llevó a cabo en el departamento de Caldas, durante el periodo comprendido entre los años 2018 y 2023, por ser un área propicia para el cultivo de aguacate y, por ende, un escenario relevante para abordar la problemática relacionada con *Stenoma catenifer*. Por lo anterior, el departamento de Caldas se estableció como la localización general del estudio, como se observa en la figura 8.

La localización general, abarca los municipios estratégicos para la investigación de la plaga en el período mencionado, los cuales, de acuerdo a los datos de monitoreo proporcionados por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2023) registran y concentran la mayor cantidad de muestreos para el flanco oriental de la cordillera central, ver figura 9, con especial énfasis en los municipios de Aguadas, Pácora y Aranzazu, que a partir de ahora se denominarán como el área de estudio, ver figura 10. La selección de estos municipios se basó en su similitud en cuanto a características ambientales, geomorfológicas e hipsométricas, así como en su proximidad entre sí, lo que facilitó su evaluación.

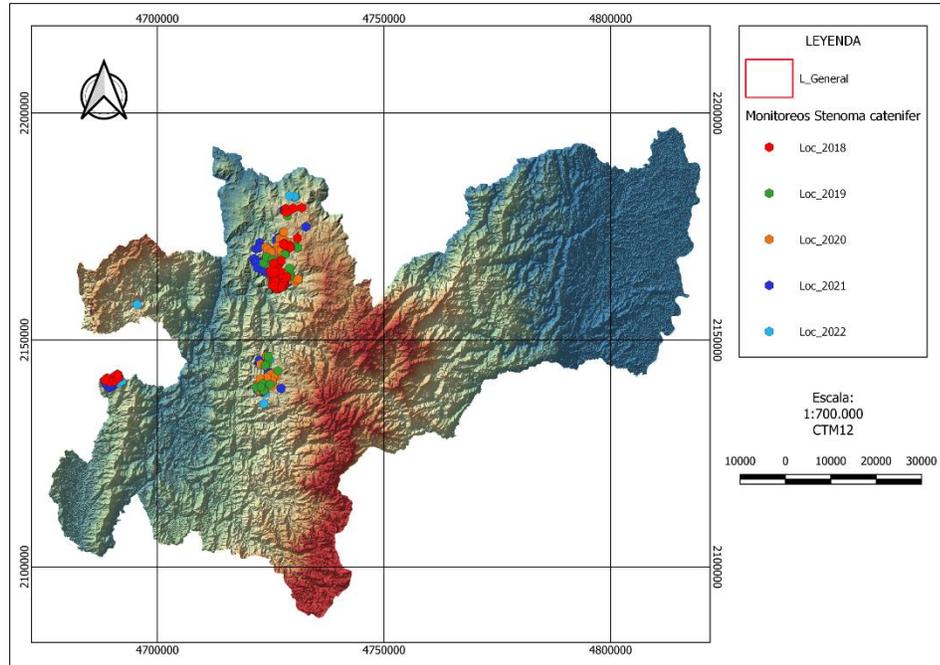


Figura 8. Área general de estudio y ubicación de puntos de monitoreo durante los años 2018 a 2022.

Fuente: Construcción propia, 2024

La escala del área general se estableció en 1:700,000 debido a que proporciona un equilibrio entre la visualización detallada de la información y la cobertura geográfica adecuada para el área de estudio, que abarca varios municipios. Además, esta escala permite representar con claridad los elementos geográficos relevantes y los puntos de muestreo de manera legible, facilitando la interpretación de los datos y la identificación de patrones espaciales, lo que ayuda a presentar una visión general del área de estudio sin comprometer la precisión de la información cartográfica.

Así mismo, la elección de la escala de 1:300,000 para la figura 9 y 10 se basó en consideraciones adaptadas a las necesidades específicas de cada mapa. Esta escala proporciona un nivel de detalle intermedio que permite una visualización más detallada que la escala

1:700,000, pero aun así mantiene una cobertura geográfica adecuada para representar el área de estudio de manera integral.

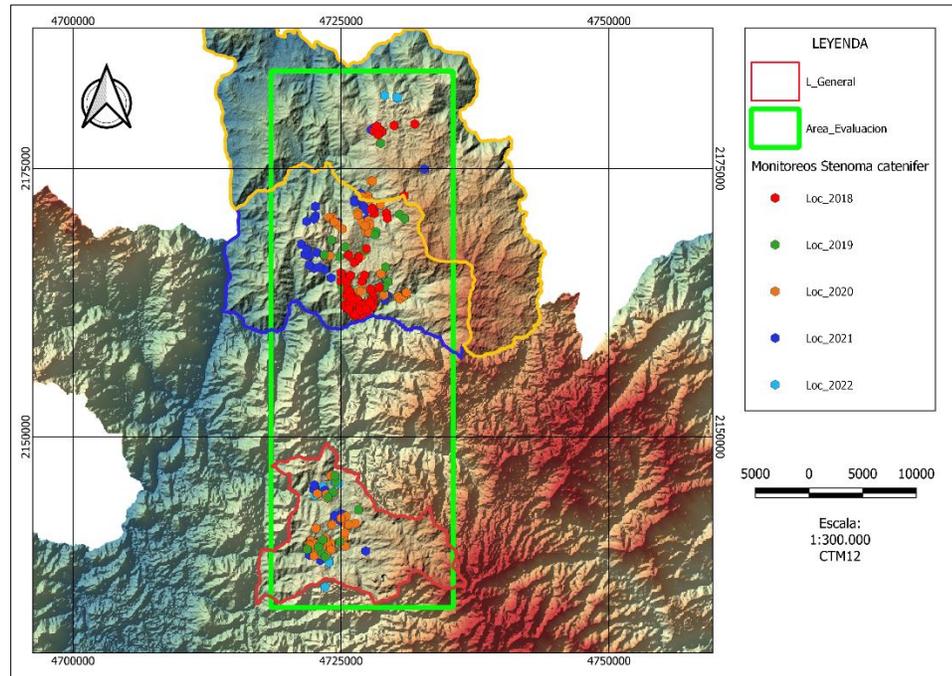


Figura 8. Área de evaluación y ubicación de puntos de monitoreo durante los años 2018 a 2022.

Fuente: Construcción propia, 2024

Para la georreferenciación y análisis de los datos, se emplearon las coordenadas de origen central CTM12. Este sistema de coordenadas se eligió debido a sus ventajas, entre las que se incluyen la capacidad para integrar una base de datos única en coordenadas planas para todo el territorio, así como su uso multipropósito (IGAC, s.f).

El área de evaluación comprende los municipios de Aguadas, Pácora y Aranzazu. Durante el período de 2018 a 2023, se observa que se realizó un mayor número de muestreo en Pácora, seguido por Aranzazu, mientras que en Aguadas se llevó a cabo en menor cantidad.

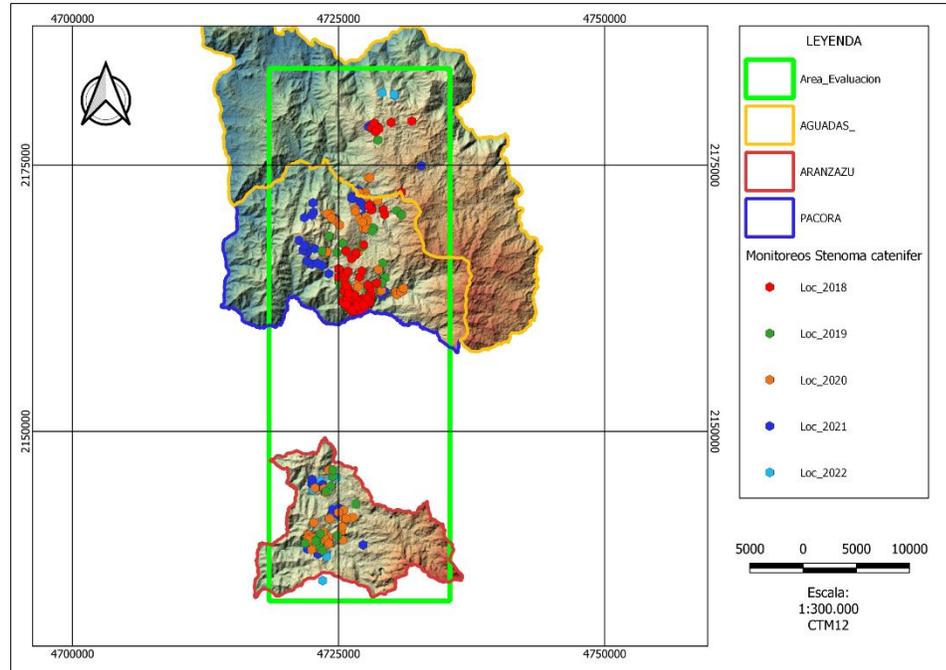


Figura 9. Área de estudio específica y ubicación de puntos de monitoreo durante los años 2018 a 2022.

Fuente: Construcción propia, 2024

Para lo anterior, se empleó una base de datos proporcionada por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), como parte del sistema oficial de vigilancia de las plagas cuarentenarias del aguacate en el país. Esta base de datos contiene registros de monitoreo de la presencia de *S. catenifer* en cultivos de aguacate en el departamento de Caldas. Se seleccionaron los datos correspondientes a los años 2018, 2019, 2020, 2021 y 2022 para analizar la distribución espacial de la plaga, ver figura 11. Estos registros fueron fundamentales para identificar los lugares específicos donde se llevaron a cabo los monitoreos.

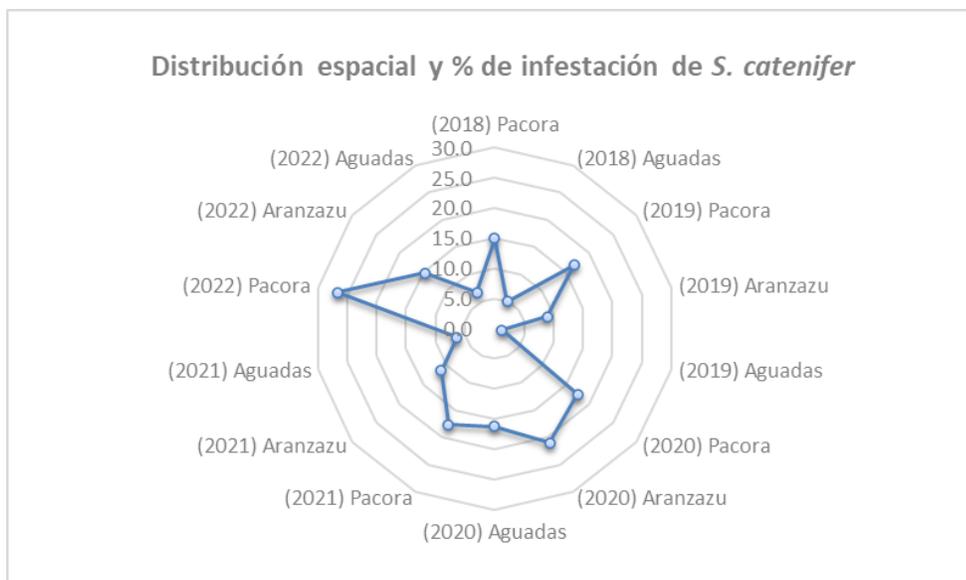


Figura 10. Distribución espacial y % de infestación de *S. catenifer* en cultivos de aguacate en el departamento de Caldas, año 2018-2022.

Fuente: ICA, 2023

6.4 Procedimiento

El procedimiento del presente estudio se estructuró en cuatro fases, cada una destinada a abordar aspectos específicos del análisis de riesgo de *Stenoma catenifer* en los cultivos de aguacate en Caldas. El proceso se llevó a cabo de forma secuencial, y los resultados obtenidos en cada etapa fueron fundamentales para guiar las actividades de las fases siguientes.

6.4.1 Fase 1: Identificación espacial de la superficie sembrada de los hospederos de *Stenoma catenifer* en Caldas

Para la identificación de los hospederos comerciales y rurales de *Stenoma catenifer* se obtuvieron datos del Tercer Censo Nacional Agropecuario del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2014) y de los informes de la cadena productiva del Aguacate proporcionados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2019; 2021). Dichos datos o

estadísticas proporcionan el total de la superficie sembrada de aguacate en Caldas entre los años 2014 y 2021. Estos datos se consolidaron en una única base de datos a nivel municipal y se sometieron a un proceso de depuración para su correcta clasificación. Además, estas estadísticas se proyectaron hasta el año 2023 con una hoja de cálculo de pronóstico visual con un intervalo de confianza del 95%, como se evidencia en la figura 12. Todo este análisis se realizó empleando el software Microsoft® Excel® LTSC MSO (versión 2402, compilación 16.0.17328.20124) de 64 bits.

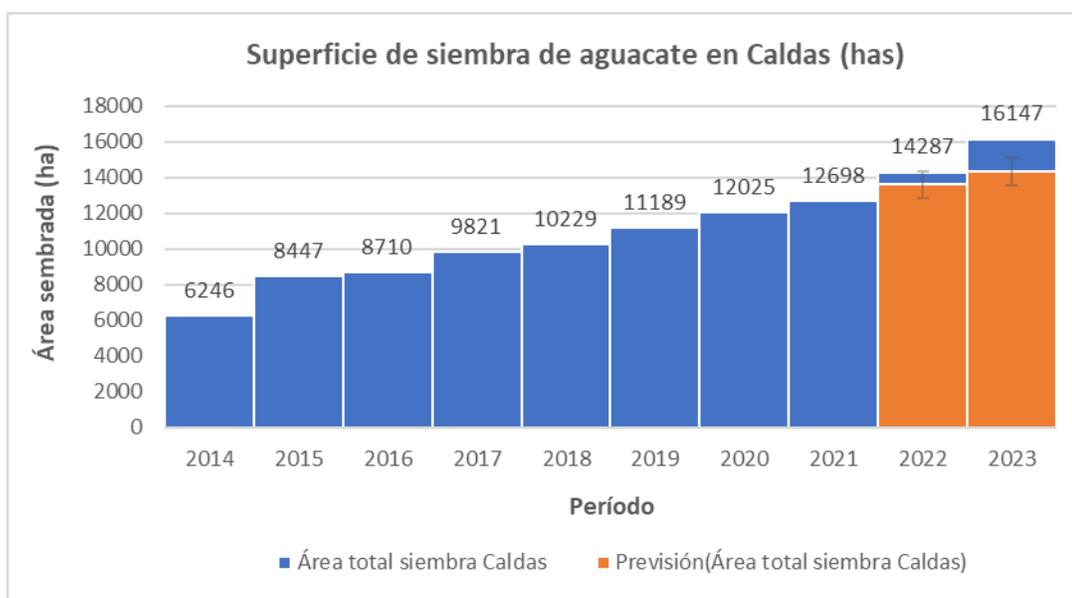


Figura 11. Tasa de crecimiento anual de siembra de aguacate en Caldas

Fuente: Construcción propia, 2024

Una vez depuradas y filtradas las estadísticas, se procedió a calcular la tasa de crecimiento anual del área de siembra de aguacate, lo que permitió obtener el área de siembra por municipio en cada período. Esta información se integró con un mapa vectorial (Shapefile) a nivel municipal descargado del Geoportal del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2021). Posteriormente, se representó la cartografía de la superficie sembrada mediante colores

por municipio; los tonos cálidos indican los sitios con mayor área de siembra, mientras que los tonos fríos señalan aquellos con menor superficie.

6.4.2 Fase 2: Caracterizar los grados días de *Stenoma catenifer* para la generación de un modelo predictivo de desarrollo de la plaga.

Para caracterizar los grados día de desarrollo de *Stenoma catenifer* en relación con la temperatura, se utilizaron los datos hidrometeorológicos del banco de datos del IDEAM. Inicialmente, se llevó a cabo la búsqueda y descarga de la información de la temperatura media anual correspondiente a los años 2018 a 2023 para los departamentos de Caldas y Antioquia. Una vez obtenida esta base de datos, se procedió a depurar y organizar los registros para cada periodo evaluado, incluyendo el cálculo de las coordenadas planas. Seguidamente, se generaron datas individuales por cada periodo, abarcando las distintas etapas del ciclo de desarrollo de *Stenoma catenifer*, que comprenden el huevo, la larva, la pupa y el adulto.

Para definir los rangos de temperatura apropiados para cada fase de desarrollo, se consultaron diversos estudios de investigación que establecían los valores óptimos para cada etapa. Por ejemplo, se estableció un rango de temperatura de 18 a 22°C para la fase de huevo, debido a que se ha observado un mayor desarrollo en estas condiciones. Para la fase de larva, se consideraron temperaturas entre 18 a 25°C, mientras que para la pupa se seleccionaron valores de 18 a 22°C. Finalmente, para el estado adulto se estableció un rango de 18 a 20°C.

Una vez creadas las datas para cada fase y periodo evaluado, se procedió a generar mediante análisis geoestadístico, mapas de Voronoi en función de la temperatura. Estos mapas permitieron visualizar las áreas que presentaron mayor temperatura en cada periodo. Tras obtener dichos resultados, se les aplicó la siguiente fórmula:

$$\text{GDD} = \left(\frac{(T_{\text{max}} + T_{\text{min}})}{2} - T_{\text{b}} \right) \times \text{DD}$$

Donde T_{min} : temperatura mínima; $T_{\text{máx}}$: temperatura máxima, T_{b} : temperatura base y DD : días de desarrollo (Olvera *et al.*, 2020, modificado por Castaño, 2024). Para *S. catenifer* se usaron los datos de $T_{\text{máx}}$ y T_{min} reportados por SENASICA-DGSV (2016), citados en el cuadro 1, quienes reportaron un umbral inferior de 18 °C y máximo de 25 °C.

Para calcular los grados días de desarrollo (GDD) se empleó la fórmula del modelo en relación con la temperatura. Esta actividad se llevó a cabo mediante el software Microsoft Excel, lo que permitió obtener información detallada sobre las unidades de calor correspondientes a cada estado de desarrollo para todos los periodos evaluados.

6.4.3 Fase 3: Delimitar e identificar las áreas de ocurrencia de *Stenoma catenifer* mediante un modelo de distribución potencial de especies.

Para realizar el Modelo de distribución potencial de *Stenoma catenifer*, se utilizó el software MaxEnt (Maximum Entropy Modeling), una herramienta ampliamente reconocida y utilizada en ecología y biogeografía para predecir la distribución de especies. MaxEnt se basa en el principio de máxima entropía y utiliza datos de presencia de la especie de interés, junto con variables ambientales para generar un modelo que predice la probabilidad de ocurrencia de la especie en un área determinada (Phillips *et al.*, 2004).

En este estudio, se utilizaron los datos de presencia de *Stenoma catenifer* proporcionados por el Instituto Colombiano Agropecuario (2023), para el periodo de 2018 a 2022 en el departamento de Caldas. Además, se emplearon las 19 variables bioclimáticas de las capas mundiales de WorldClim, en formato ráster con una resolución de 1 km², como se detalla en la

tabla 2 (Fick & Hijmans, 2017; Hijmans *et al.*, 2005). Estas variables comprenden datos climáticos como temperatura, precipitación y otros factores relevantes para la ecología de la especie. La base de datos contiene un total de 836 registros de presencia de la plaga, los cuales fueron estructurados en un archivo CSV para su integración en el software de análisis MaxEnt. El archivo se estructuró con tres columnas que incluían el nombre científico de la especie y las coordenadas planas de cada punto donde se registró la incidencia.

Se llevó a cabo el análisis estadístico y espacial con el fin de generar un mapa que ilustra las áreas con mayor probabilidad de presencia de la especie. Este enfoque permite identificar zonas con condiciones ambientales propicias para el barrenador, brindando así información crucial para la gestión y control de esta plaga en los cultivos de aguacate. Las referencias bibliográficas utilizadas en este contexto incluyen estudios previos que han aplicado exitosamente el software MaxEnt en la modelización de la distribución de especies (Phillips *et al.*, 2006; Elith *et al.*, 2011).

Tabla 2. Variables bioclimáticas usadas para la generación del modelo de distribución potencial de *Stenoma catenifer*.

Clave	Variable bioclimática	Clave	Variable bioclimática
BIO1	Temperatura promedio anual	BIO11	Temperatura promedio del trimestre más frío
BIO2	Oscilación diaria de la temperatura	BIO12	Precipitación anual
BIO3	Isotermalidad	BIO13	Precipitación del periodo más lluvioso
BIO4	Estacionalidad de la temperatura	BIO14	Precipitación del periodo más seco
BIO5	Temperatura máxima promedio del periodo más cálido	BIO15	Estacionalidad de la precipitación
BIO6	Temperatura mínima promedio del periodo más frío	BIO16	Precipitación del trimestre más lluvioso
BIO7	Oscilación anual de la temperatura	BIO17	Precipitación del trimestre más seco
BIO8	Temperatura promedio del trimestre más lluvioso	BIO18	Precipitación del trimestre más cálido
BIO9	Temperatura promedio del trimestre más seco	BIO19	Precipitación del trimestre más frío
BIO10	Temperatura promedio del trimestre más cálido		

Fuente: Olvera *et al.*, 2020.

Durante la ejecución del modelo, se asignó el 80 % de los datos para el entrenamiento y el 20 % restante para validar la prueba, utilizando una salida del modelo tipo logística con probabilidades de presencia estimadas en un rango binario. Esta metodología se respalda en estudios previos (Phillips *et al.*, 2006; Tang *et al.*, 2019; Hung Nguyen *et al.*, 2021). El resultado del modelo se interpreta mediante una prueba estadística de validación conocida como área bajo la curva (AUC), que evalúa la sensibilidad del modelo. Una puntuación más cercana a 1 indica una mayor confiabilidad en los resultados, según lo explicado por Phillips *et al.* (2006). Además, el software calcula el porcentaje de contribución de cada variable bioclimática al modelo, lo que revela la similitud climática entre los sitios habitados por *Stenoma catenifer* y aquellos que representan un riesgo potencial de dispersión de la plaga. Todo lo anterior permite una comprensión más detallada de los factores que influyen en la distribución y el riesgo de la especie. Los resultados finales fueron procesados en ArcMap 10.8.

6.4.4 Fase 4: Identificación de áreas en riesgo a *Stenoma catenifer* en los sistemas productivos de aguacate.

Tras la creación de los mapas de Voronoi, se procedió a intersectar las capas correspondientes a los huevos, larvas, pupas y adultos de cada período, utilizando la función de intersección. Esto permitió calcular el promedio de la incidencia o riesgo de *Stenoma catenifer* en el área de evaluación. Además, estos resultados se complementaron con las unidades de calor o GDD en los sitios donde se presentó una mayor incidencia de la plaga. La escala de riesgo se agrupó en valores de 60.5 a 555.57 unidades de calor, valores cercanos a 555.57 indicarían el mayor riesgo y valores cercanos a 60.5 indicarían menor riesgo.

7 RESULTADOS Y ANÁLISIS

7.1 Resultados fase 1: Identificación espacial de la superficie sembrada de los hospederos de *Stenoma catenifer* en Caldas.

En la figura 13 se evidencia el crecimiento sostenido de los sistemas productivos aguacateros en Caldas en los últimos años, consolidándose como un sector estratégico para el desarrollo económico y social del departamento. Según la declaración de área libre de plagas cuarentenarias del ICA de 2022, Caldas cuenta con más de 19,238 hectáreas sembradas en aguacate, distribuidas en sus 27 municipios. Las subregiones del Bajo Occidente, Magdalena Caldense, Centro Sur y Norte Caldense destacan por la alta densidad y extensión de áreas destinadas al cultivo de aguacate, convirtiéndose en las regiones con la mayor superficie sembrada de plantas hospedantes en el departamento. Estas áreas, por ende, representan un riesgo potencial de infestación por *S. catenifer*, puesto que, favorecen su dispersión y su adaptación a las condiciones climáticas de la zona.

Incluso, este incremento en la superficie de aguacate ha dado lugar a una serie de problemas socioambientales, destacando la mayor vulnerabilidad de las poblaciones rurales y el aumento del riesgo de infestación por plagas. La ampliación de la superficie destinada al cultivo ha propiciado un ambiente favorable para la proliferación de diferentes plagas, lo que representa una amenaza adicional para la sostenibilidad del cultivo y el bienestar de las comunidades locales.

Stenoma catenifer ha sido previamente identificado en múltiples áreas, abarcando seis municipios del departamento. De acuerdo con la investigación llevada a cabo por Carabalí *et al.* (2023) acerca del control de plagas de relevancia económica y cuarentenaria en los cultivos de

aguacate, estos municipios son Anserma, Manizales, Villamaría, Aguadas, Pácora y Salamina. Específicamente, Pácora, Salamina y Aguadas se destacan por presentar la mayor extensión de cultivos de aguacate en el norte de Caldas, como se informa en datos de Corpocaldas (2020). Además, la presencia de la plaga en Aguadas, Pácora, Aranzazu y Anserma ha sido confirmada por los registros de monitoreo del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2023).

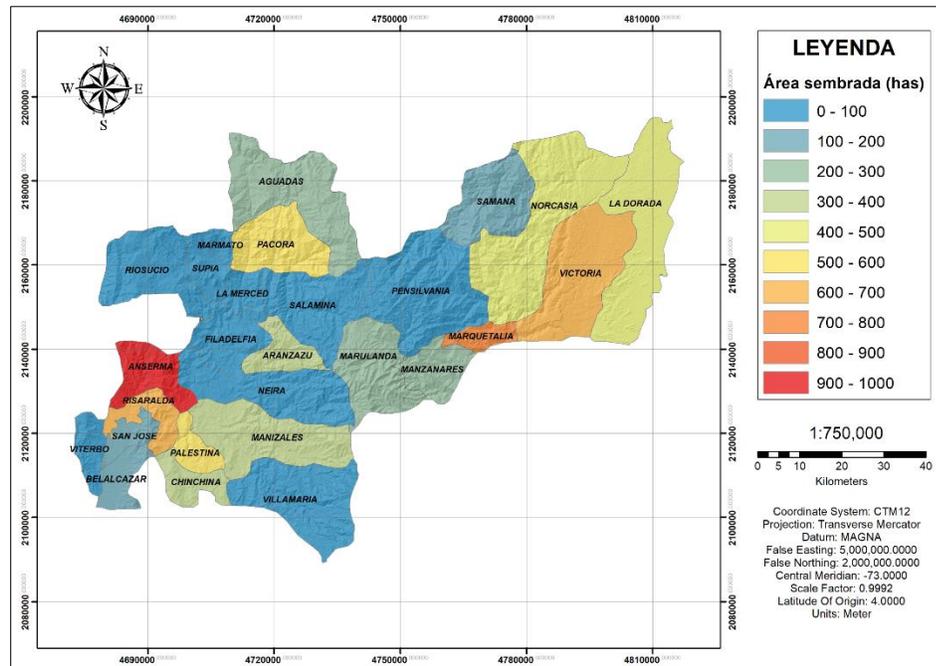


Figura 12. Distribución promedio de las áreas de siembra de aguacate en Caldas (2018-2023). La escala de colores indica el área de siembra por municipio.

Fuente: Construcción propia, 2024

7.2 Resultado fase 2: Caracterizar los grados días de *Stenoma catenifer* para la generación de un modelo predictivo de desarrollo de la plaga.

Se llevaron a cabo modelos de grados días de desarrollo para el período comprendido entre los años 2018 y 2023. A pesar de la mínima variación térmica en el país debido a su proximidad a la línea ecuatorial, se observó un notable contraste en los rangos promedio de temperatura media en el área de estudio, según lo informado por el IDEAM en 2024. Durante

estos períodos, se identificaron los sitios donde las temperaturas excedían el umbral inferior de desarrollo para *S. catenifer*, fijado en 8.9 °C según Nava *et al.* (2005).

Durante la fase de caracterización, se evidenció que los umbrales de mayor actividad de la plaga para cada etapa de su ciclo en el área de estudio fueron de 20°C para los huevos y pupas, 21.5°C para las larvas, y 19°C para los adultos (ver figuras 14 - 19). Esto sugiere que estas temperaturas son óptimas para el desarrollo y la reproducción de *S. catenifer*, lo que puede tener implicaciones significativas en la dinámica poblacional de la plaga en el área de estudio.

Estudios realizados por Nava *et al.* (2005) y SENASICA-DGSV (2016) han observado que cuando la temperatura supera los 25°C, la actividad de *Stenoma catenifer* se ve afectada negativamente, lo que acorta su duración, viabilidad, fecundidad y longevidad. SENASICA-DGSV (2016) especifica que la viabilidad de la plaga es más alta en el rango térmico entre los 18°C y los 25°C. Por otro lado, Nava *et al.* (2005) encontraron que, en semillas de aguacate del cultivar Brenda, a una temperatura de 20°C, las hembras de *Stenoma catenifer* ponían un promedio de 318.3 huevos, mientras que a 30°C la cantidad de huevos fue menor, con 133.4. Además, la duración de los machos y hembras fue más corta a 30°C, con una duración promedio de 10.6 días para los machos y 9.9 días para las hembras, en comparación con los 18.3 días para los machos y 18 días para las hembras a 20°C.

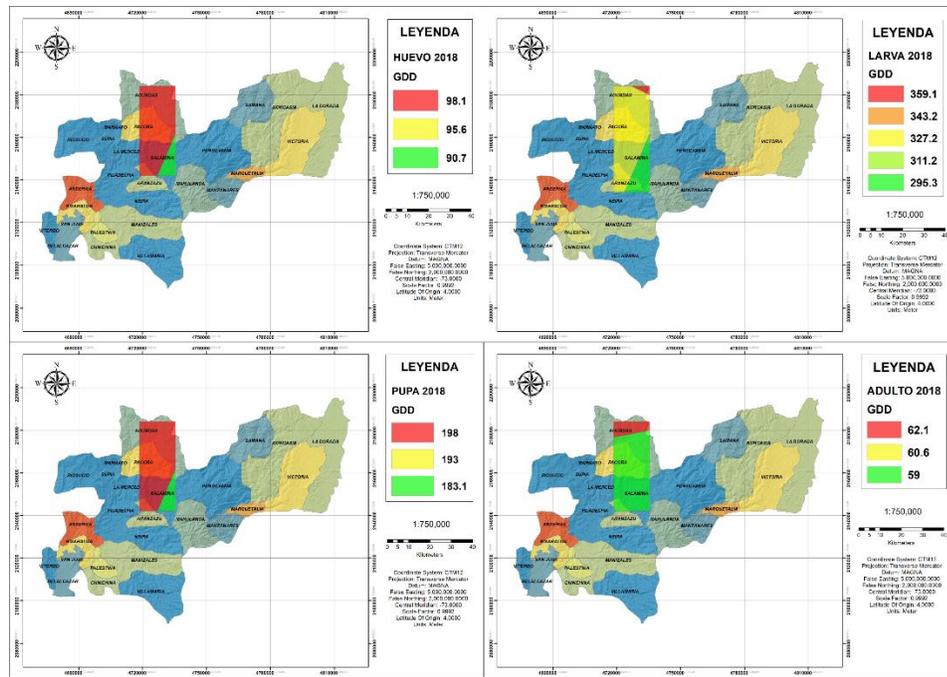


Figura 13. Modelo de grados días de desarrollo de *S. catenifer* para el área de estudio, 2018. La escala de colores representa la cantidad de GDD.

Fuente: Construcción propia, 2024

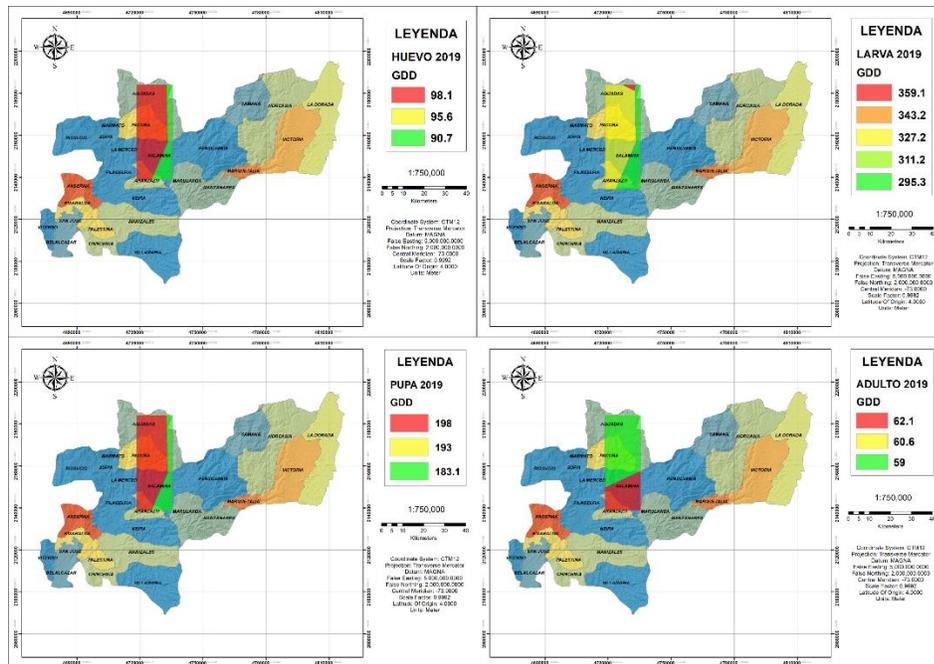


Figura 14. Modelo de grados días de desarrollo de *S. catenifer* para el área de estudio, 2019. La escala de colores representa la cantidad de GDD.

Fuente: Construcción propia, 2024

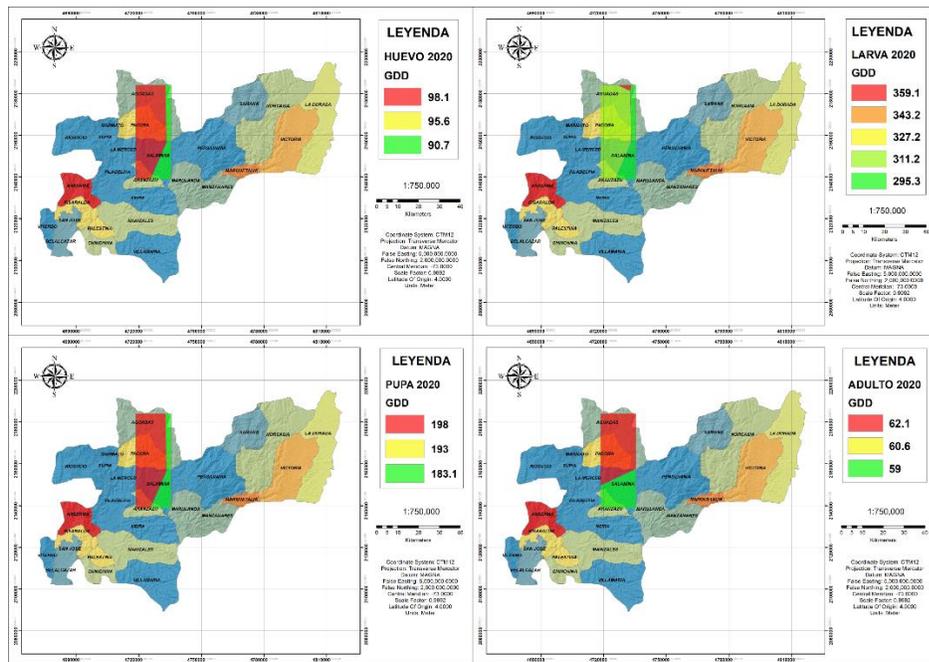


Figura 15. Modelo de grados días de desarrollo de *S. catenifer* para el área de estudio, 2020. La escala de colores representa la cantidad de GDD.

Fuente: Construcción propia, 2024

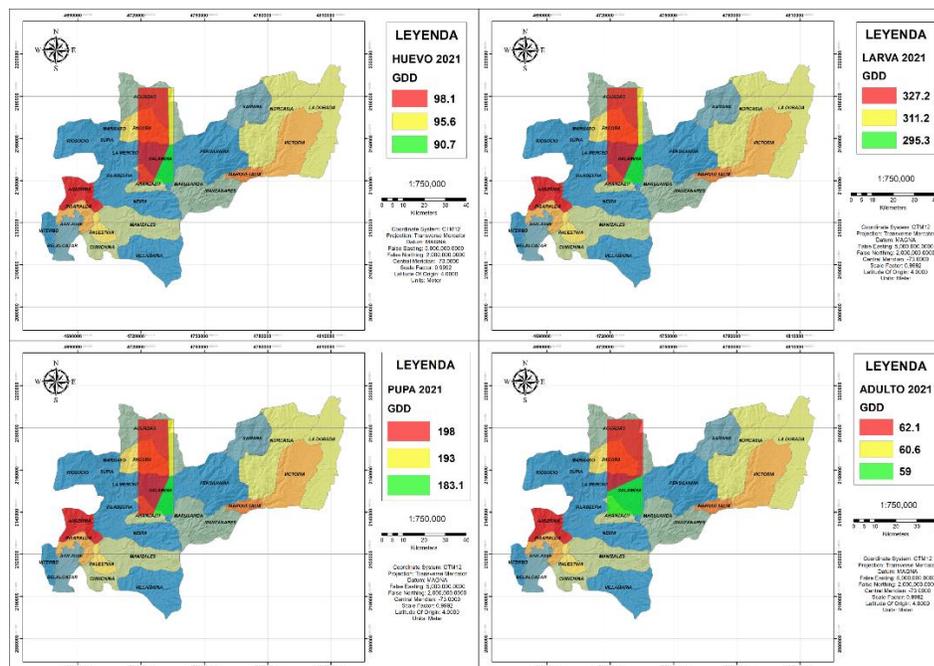


Figura 16. Modelo de grados días de desarrollo de *S. catenifer* para el área de estudio, 2021. La escala de colores representa la cantidad de GDD.

Fuente: Construcción propia, 2024

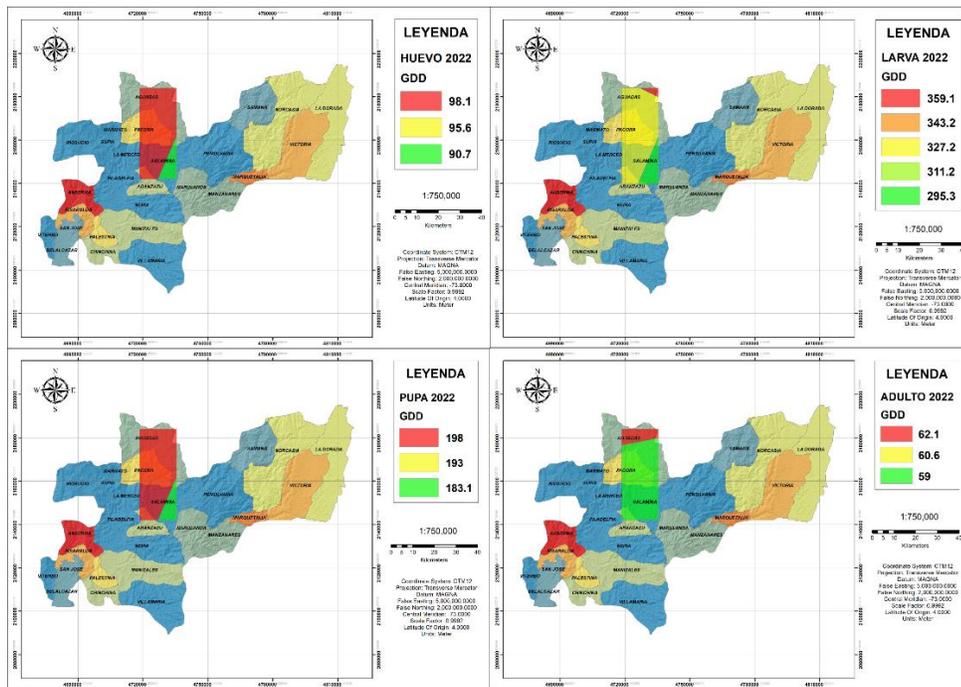


Figura 17. Modelo de grados días de desarrollo de *S. catenifer* para el área de estudio, 2022. La escala de colores representa la cantidad de GDD.

Fuente: Construcción propia, 2024

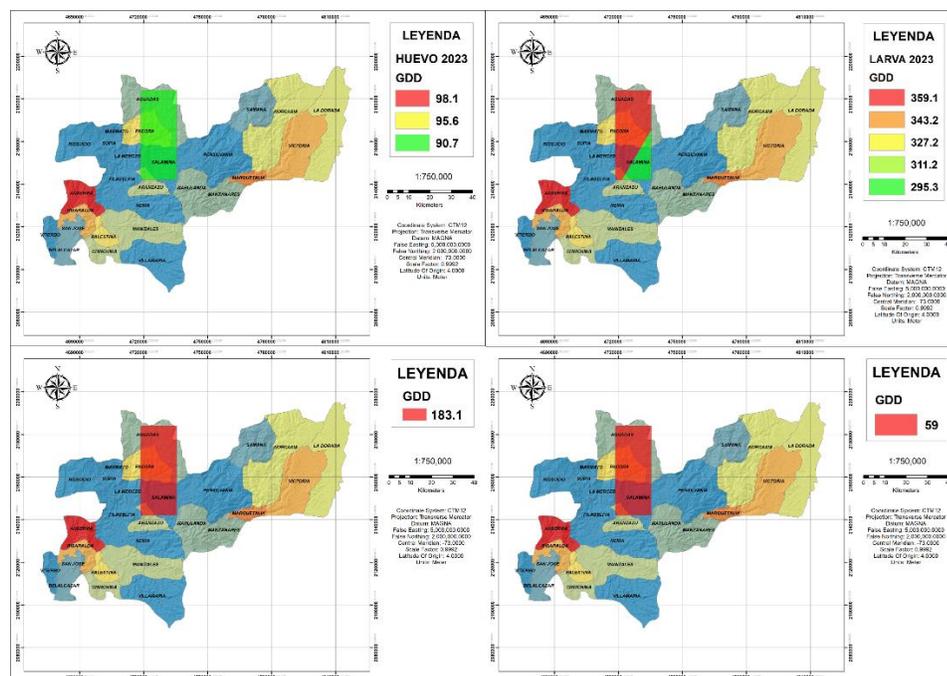


Figura 18. Modelo de grados días de desarrollo de *S. catenifer* para el área de estudio, 2023. La escala de colores representa la cantidad de GDD.

Fuente: Construcción propia, 2024

Los grados días de desarrollo (GDD) para cada etapa del ciclo de vida de la plaga fueron los siguientes: Huevo: 98.1 GDD; Larva: 343.2 GDD; Pupa: 198 GDD; y Adulto: 60.6 GDD. Estos resultados indican que se requiere un total de 699.9 unidades de calor para completar todo el ciclo de vida de *Stenoma catenifer*, desde el estado de huevo hasta el estado adulto, lo que constituye una generación de la plaga. Estos valores revelan claramente las condiciones climáticas propicias para el desarrollo de al menos una generación de la plaga en la mayor parte del área de estudio.

Según el estudio de Nava *et al.* (2005), en el municipio de São Tomás de Aquino, Brasil, se registraron acumulaciones anuales de grados día (GD) por encima del umbral térmico de desarrollo de 8.89°C. Estas cifras alcanzaron los 4,996.8 GD y 3,302.0 GD durante el ciclo productivo de diciembre a agosto, lo que corresponde a aproximadamente 7.8 y 5.1 generaciones de la plaga en condiciones de campo y de laboratorio, respectivamente.

Para el trópico Andino de Caldas, la incidencia de *Stenoma catenifer* puede ser mayor durante los meses de mayo a agosto. Autores como Uribe & Tabares (2024) reportan que estos meses coinciden con la época de mayor precipitación y temperaturas cálidas para la zona, condiciones ideales para el inicio de la brotación y posterior floración de los hospederos de la plaga.

7.3 Resultado fase 3: Delimitación e identificación de las áreas de ocurrencia de *Stenoma catenifer* mediante un modelo de distribución potencial de especies.

Después de completar 500 iteraciones, se generó el modelo de distribución potencial de máxima entropía de *Stenoma catenifer*. Este modelo exhibió una alta precisión, obteniendo un AUC de 0.956 en los datos. De acuerdo con Peterson *et al.* (2011) y Phillips *et al.* (2006), este valor indica un rendimiento notable, ya que tanto las curvas de sensibilidad como de especificidad se acercan a 1. Esto sugiere que el modelo proporciona una excelente capacidad predictiva, superando los resultados esperados al azar. En contraste, valores cercanos o inferiores a 0.5 indicarían que el modelo no es más informativo que lo obtenido por azar.

El modelamiento en MaxEnt y las variables bioclimáticas muestran que *S. catenifer* presenta una mayor probabilidad de presencia en el flanco oriental de la cordillera central, con una distribución continua, la cual disminuye gradualmente hacia los municipios de Neira, Manizales y Villamaría. Autores como Carabalí *et al.* (2023) confirman la presencia de *Stenoma* en los municipios de Anserma, Manizales, Villamaría, Aguadas, Pacora y Salamina, siendo Anserma ajeno al flanco oriental de la cordillera central.

Las variables que más contribuyeron en la generación del modelo fueron la temperatura promedio del trimestre más frío (29.9%), la temperatura promedio anual (20.5%), la estacionalidad térmica (16.7%), la precipitación anual (14.7%), la precipitación durante el trimestre más cálido (7.2%), la isothermalidad (4.0%), la temperatura mínima promedio del período más frío (3.2%), la precipitación durante el trimestre más seco (2.6%), y la estacionalidad de la precipitación (1.2%). La suma de estas variables explicó el 100 % del modelo. Estos resultados muestran que las variables climáticas, especialmente la temperatura y la precipitación, tienen una influencia significativa en la distribución de la especie, coincidiendo

con los hallazgos de Velázquez (2020), quien evaluó el sistema de trapeo de *Stenoma catenifer* en huertos de aguacate Hass en Colima, México, destacando que la temperatura y la humedad relativa crean condiciones propicias para la presencia de la plaga, generando zonas bioclimáticas de mayor riesgo. Según su estudio, temperaturas por encima de 15.8°C y humedades superiores al 60% favorecen la posibilidad de infestación de la especie.

El incremento de la humedad relativa como resultado de la precipitación, puede tener un impacto significativo en el desarrollo de especies como *S. catenifer*. Investigaciones, como la llevada a cabo por Velázquez (2020), han demostrado que esta especie tiende a prosperar en ambientes con alta humedad relativa, ya que esto proporciona condiciones óptimas para su reproducción, supervivencia y actividad. Por lo tanto, un aumento en la humedad relativa como resultado de la precipitación puede crear un entorno más propicio para el desarrollo y la proliferación de esta especie de insecto plaga. Por otro lado, autores como Vázquez *et al.* (2017) examinaron la asociación entre el número de polillas de *Stenoma catenifer* capturadas y los factores climáticos, como la precipitación y la temperatura, en el estado de Chiapas, México. Los resultados revelaron una correlación positiva entre la captura de polillas y la precipitación en áreas de baja altitud. En contraste, en zonas de mayor altitud, la captura de la especie mostró una correlación más fuerte con la temperatura que con la precipitación.

Así mismo, la prevalencia de *S. catenifer* se confirma en la zona del modelado puesto que su nicho ecológico siendo el aguacate, le proporciona las condiciones necesarias para su alimentación, reproducción y supervivencia. Según datos respaldados por el Plan de Gestión Ambiental Regional 2020 - 2031, los municipios con la mayor cantidad de áreas cultivadas de aguacate para el departamento son Pácora, Aguadas, Aranzazu y Salamina (Corpocaldas, 2020). Por otro lado, el Boletín especial de caracterización de producción para Caldas 2022, resalta que

dos terceras partes de la producción y el rendimiento se concentran en seis municipios del departamento, siendo: Pácora, Aguadas, Salamina, Neira y Aranzazu en el norte de Caldas, y Villamaría y Neira en la región Centro-Sur (Caldata, 2022).

La influencia del clima en la proliferación de plagas agrícolas es un tema crucial para comprender y abordar eficazmente los desafíos relacionados con la protección de los cultivos. Los estudios de Luna et al. (2017), Velázquez et al. (2020) e Ibrahim et al. (2022) proporcionan evidencia sólida de la relación entre las condiciones climáticas y la dinámica de las poblaciones de plagas, destacando la importancia de factores como la temperatura, la humedad relativa y las precipitaciones en la propagación y el establecimiento de plagas en los cultivos.

A pesar de la reciente declaración del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) que establece ciertas áreas de producción de aguacate Hass en el municipio de Pácora, Caldas, como libres de las plagas cuarentenarias *Heilipus lauri* (Boheman), *Heilipus trifasciatus* (Fabricius) y *Stenoma catenifer* (Walsingham), es importante señalar que persisten áreas en Pácora y en otros municipios cercanos que aún enfrentan la presencia de *Stenoma catenifer*.

La Resolución 17742 de 2022 del ICA respalda esta acción, reconociendo que esta actividad representa actualmente el 19% del área total sembrada en el departamento. Sin embargo, según las proyecciones del modelo MaxEnt, estas zonas podrían continuar siendo vulnerables a la presencia de esta plaga debido a las condiciones climáticas favorables de la región.

Es fundamental llevar a cabo muestreos en las subregiones del Alto Occidente y Alto Oriente del departamento de Caldas, ya que se encuentran dentro del área de distribución potencial modelada, con una alta probabilidad de presencia de esta especie. Esta situación

subraya la importancia continua del monitoreo y control de plagas para salvaguardar la sostenibilidad del cultivo de aguacate en el área de estudio.

En la figura 20, los puntos con valores cercanos a 1 revelan una distribución potencial más amplia para *Stenoma catenifer*, lo que indica condiciones propicias para su presencia y proliferación. Las zonas con mayor probabilidad de ocurrencia (rojo) se localizan principalmente en el flanco oriental de la cordillera central del departamento. Por otro lado, las áreas con menor probabilidad (azul) se ubican en el Magdalena caldense, Bajo Oriente y Centro-Sur de Caldas.

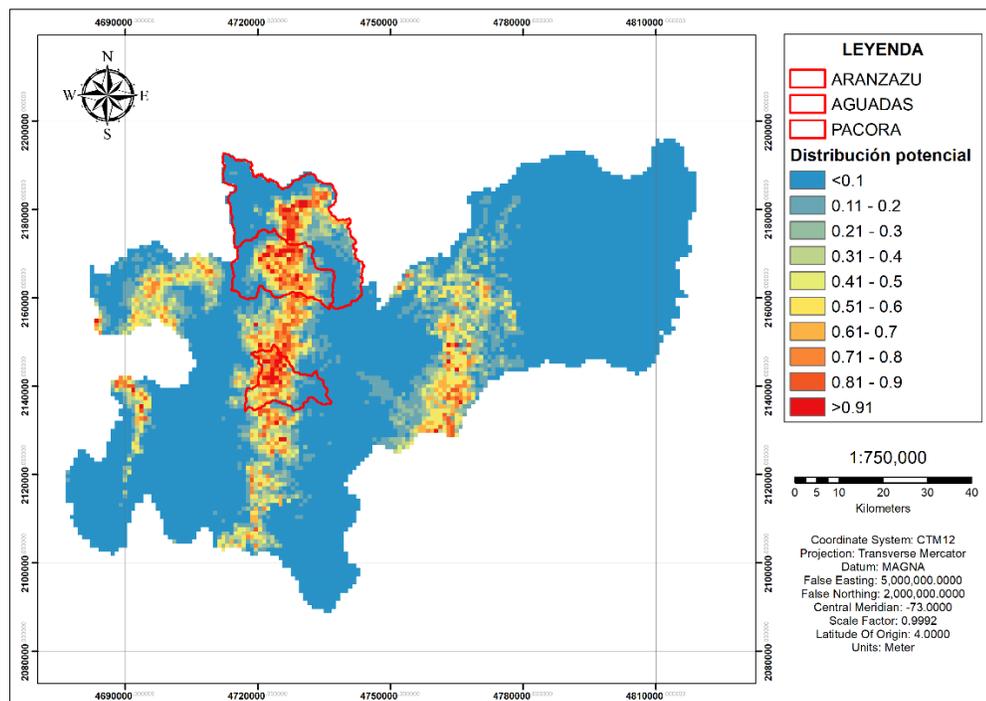


Figura 19. Modelo de distribución potencial de *Stenoma catenifer* para el departamento de Caldas.

Fuente: Construcción propia, 2024 con base en el modelado de Maxent.

7.4 Resultado fase 4: Identificación de áreas en riesgo a *Stenoma catenifer* en los sistemas productivos de aguacate en el área de estudio.

Los resultados obtenidos durante la fase 4 del estudio, muestran que áreas como Aguadas, Pácora y Aranzazu se encuentran más expuestas a la presencia de *Stenoma catenifer*, dado que presentan condiciones ambientales favorables para la proliferación y establecimiento de la plaga, que se alinean con hallazgos similares en la literatura científica. Estudios previos, como el realizado por Luna *et al.* (2017) en México, también destacaron la importancia de las condiciones ambientales en la distribución de plagas del aguacate. La observación de una correlación significativa entre las condiciones climáticas y la presencia de *Stenoma catenifer* refuerza la necesidad de monitorear y comprender cómo estos factores influyen en la dinámica de la plaga, lo cual está respaldado por la investigación de Velázquez *et al.* (2020) en México, donde se observó una relación entre la humedad relativa y la temperatura con la población de plagas de *S. catenifer*.

Asimismo, la identificación de áreas con una mayor concentración de cultivos de aguacate como las más susceptibles a la infestación por *Stenoma catenifer* coincide con investigaciones previas que subrayan la importancia de la distribución y densidad de los cultivos en la evaluación del riesgo de infestación. Estos hallazgos concuerdan con los resultados de Luna *et al.* (2017), quienes observaron una asociación entre la densidad de cultivos de aguacate y una mayor propagación de plagas. Esta observación sugiere la necesidad de prestar especial atención a estas zonas y de implementar medidas de control y manejo específicas para mitigar el riesgo de infestación.

La variación en el nivel de riesgo potencial entre los diferentes períodos del estudio, atribuida a la dinámica de los grados días de desarrollo, está en línea con la importancia de

considerar la acumulación de calor a lo largo del tiempo en la predicción del riesgo de infestación por plagas, como lo sugiere la investigación de Ibrahim *et al.* (2022) en Kenia. La necesidad de emplear imágenes satelitales de temperatura de la superficie terrestre para mejorar la precisión del modelo de riesgo coincide con los enfoques avanzados utilizados en otros estudios para predecir la dinámica de las plagas.

Además, la inclusión de datos adicionales, como la densidad de cultivos y la proximidad de los predios aguacateros a carreteras o viveros, para mejorar la precisión del modelo de riesgo, se alinea con la necesidad de considerar múltiples factores en la evaluación del riesgo de infestación, como sugieren varios estudios previos. En conjunto, estos hallazgos respaldan la importancia de adoptar enfoques integrales y multidisciplinarios para el manejo de plagas y la protección de la producción de aguacate.

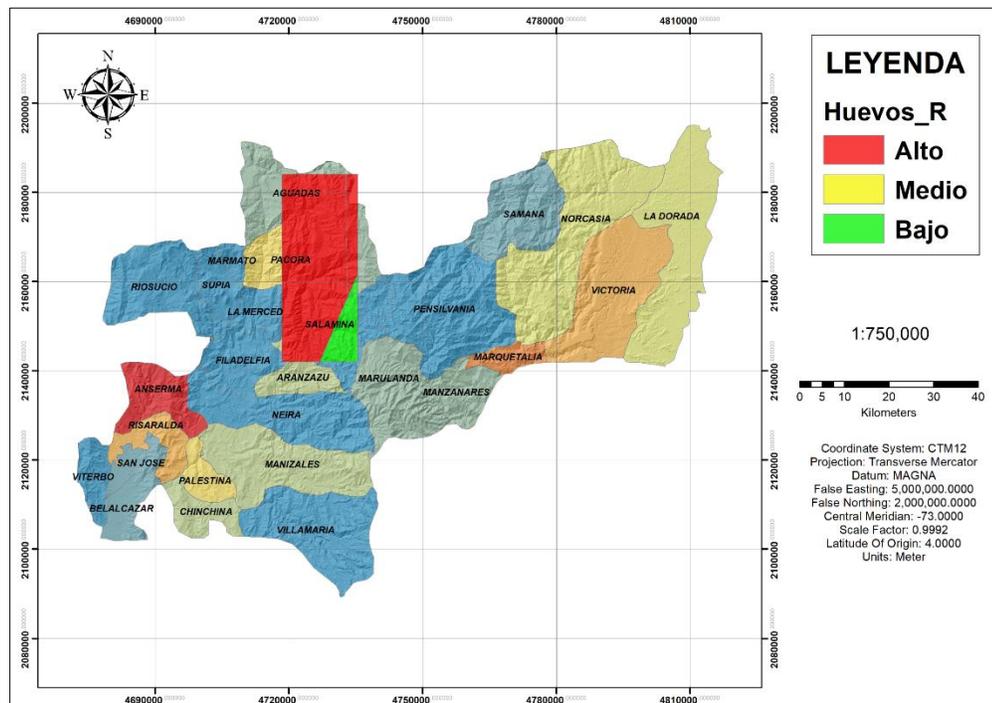


Figura 20. Mapa de riesgo promedio a la presencia de huevos *S. catenifer* en área de estudio.

Fuente: Construcción propia, 2024

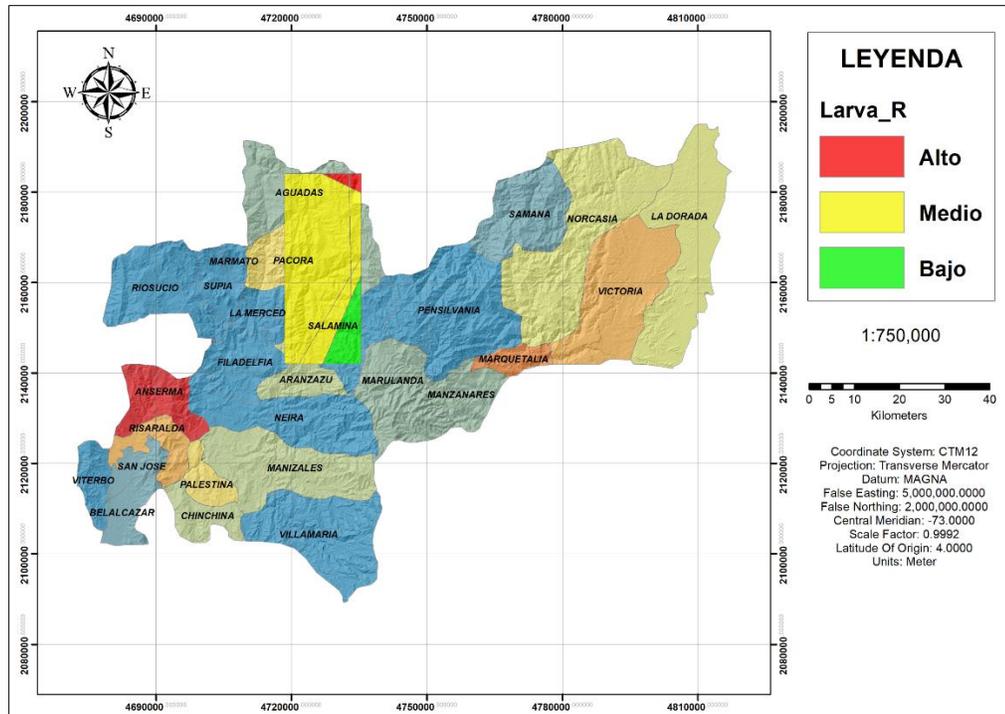


Figura 21. Mapa de riesgo promedio a la presencia de larvas *S. catenifer* en área de estudio.

Fuente: Construcción propia, 2024

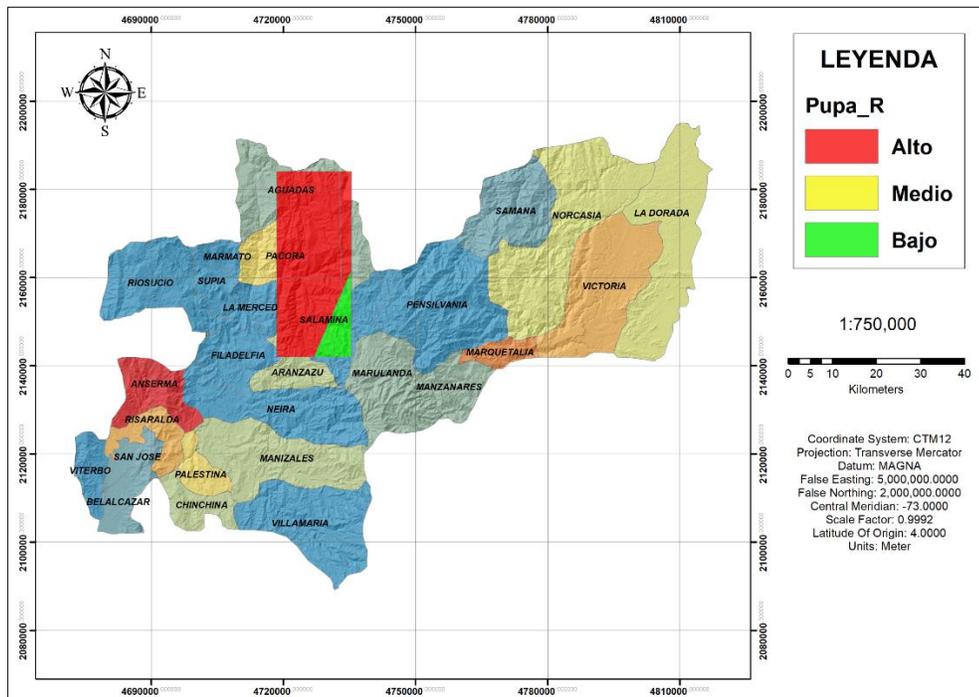


Figura 22. Mapa de riesgo promedio a la presencia de pupas *S. catenifer* en área de estudio.

Fuente: Construcción propia, 2024

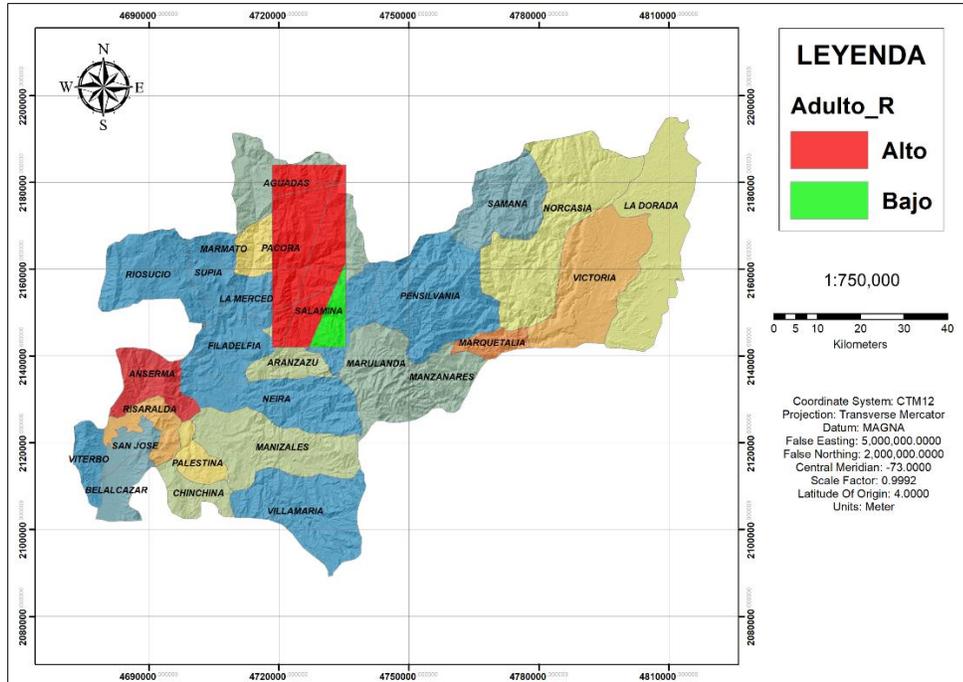


Figura 23. Mapa de riesgo promedio a la presencia de adultos *S. catenifer* en área de estudio.

Fuente: Construcción propia, 2024

8 CONCLUSIONES

- La metodología replicada ofrece una herramienta para el monitoreo y la vigilancia de plagas agrícolas, con un enfoque preventivo y adaptable a diferentes contextos. Esta herramienta puede contribuir a la toma de decisiones más eficientes y oportunas para el control y la prevención de plagas, protegiendo la agricultura y la seguridad alimentaria.

- Las áreas donde se han identificado casos positivos de *Stenoma catenifer*, distribuidas en varios municipios del norte de Caldas, representan un importante foco de riesgo para la producción de aguacate en la región. Aproximadamente 19.238 hectáreas de cultivos de aguacate se encuentran vulnerables a la infestación por esta plaga, lo que destaca la necesidad de mantener una vigilancia y control constantes para evitar su propagación. Aunque existen zonas declaradas libres de plagas cuarentenarias en el departamento, es crucial continuar con el monitoreo exhaustivo, ya que la expansión de *Stenoma catenifer* podría resultar en graves consecuencias económicas y ambientales para las extensas áreas de cultivo de aguacate en la zona.

- Las condiciones ambientales en Caldas proporcionan un entorno propicio para el desarrollo de *Stenoma catenifer*; la ubicación geográfica del departamento y su variado paisaje generan temperaturas idóneas para el desarrollo de múltiples generaciones de esta especie. La distribución potencial de *Stenoma catenifer* se extiende a la mayoría de las zonas productoras de aguacate en el área de estudio; factores climáticos como la temperatura promedio del trimestre más frío, la temperatura promedio anual, la estacionalidad térmica, y la precipitación anual son determinantes en la distribución de esta plaga.

- La adopción de tecnologías avanzadas, particularmente la geoespacial, emerge como una herramienta esencial en la detección y delimitación de áreas de riesgo asociadas a *Stenoma catenifer*. Su aplicación fortalecería notablemente las operaciones de monitoreo y diagnóstico, posibilitando su implementación a niveles regionales o locales con una frecuencia temporal dinámica.

- Debido al impacto económico y ambiental que genera *Stenoma catenifer* en la región de Caldas, es imperativo seguir investigando sobre su biología, ecología y dinámica poblacional. Esto permitirá mejorar la comprensión de los factores que influyen en la distribución y el comportamiento de la plaga, así como desarrollar estrategias de manejo más efectivas y sostenibles a largo plazo.

9 RECOMENDACIONES

- Integrar no solo la información espacial sobre la distribución de cultivos hospedantes, sino también datos sobre la dinámica poblacional de la plaga y las condiciones climáticas locales.

- Considerar no solo la extensión de los cultivos de aguacate, sino también la densidad de estos cultivos en el área de estudio.

- Para obtener un resultado más preciso, se recomienda obtener información específica de la temperatura promedio diaria y los GD acumulados en el norte de Caldas para el período de estudio.

- Es importante realizar estudios de campo para validar el modelo de GDD y adaptarlo a las condiciones locales.

- Monitorear la población de *S. catenifer* en campo para determinar con el modelo el número de generaciones de la plaga.

- Se recomienda emplear imágenes satelitales de temperatura de la superficie terrestre a diario y contrastarlas con datos provenientes de estaciones meteorológicas, ya que esto aumentaría la fiabilidad de los resultados en cuanto a las unidades de calor.

10 REFERENCIAS

- Acevedo-Jaramillo E, Vásquez GJT, Sosa-Moss C. 1972. Estudios sobre el barrenador del hueso y pulpa del aguacate *Stenoma catenifer*. Chapingo, México. *Agrociencia*, 9: 17-24.
- AGROSAVIA. (2024). Colección Taxonómica Nacional de Insectos "Luis María Murillo" (CTNI). Base de datos CTC. Disponible en: <https://www.agrosavia.co/ctni/ctc/lepidoptera/oecophoridae/stenoma/stenoma-catenifer/>
- Alcaraz, M. L., Thorp, T. G., & Hormaza, J. I. (2013). Phenological growth stages of avocado (*Persea americana*) according to the BBCH scale. *Scientia Horticulturae*, 164, 434-439.
- Baker, R., Eyre, D., Brunel, S., Dupin, M., Reynaud, P., & Jarosik, V. (2015). Mapping endangered areas for pest risk analysis. *Pest risk modelling and mapping for invasive alien species*, 7, 18-34.
- Boletín Ambiental de Caldas. (2014). Recuperado de <https://es.scribd.com/document/449806730/Boletin-ambiental-de-caldas>
- Caldata. (2022). Boletín especial: Caracterización de la producción de aguacate en Caldas (agosto de 2022). Recuperado de <https://caldata.caldas.gov.co/wp-content/uploads/2023/03/Boletin-especial-caracterizacion-de-produccion-de-aguacate-en-Caldas-08-2022.pdf>
- Carabalí Muñoz, A., Caicedo Vallejo, A. M., & Holguín, C. M. (2021). Guía para el reconocimiento y manejo de las principales plagas de aguacate cv. Hass en Colombia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - Agrosavia; ICA. <https://doi.org/10.21930/agrosavia.nbook.7404913>

- Carabalí, A. (2020). Polilla de la semilla del aguacate *Stenoma catenifer* Walsingham (Lepidoptera Elachistidae). En J. A. Bernal & C. A.
- Carabalí-Muñoz, A., Montes-Prado, M., Canacuan N., D. E., Cuéllar-Palacios, C. M., Zapata, J. C., & Rosero, R. A. (2023). Manejo integrado de plagas de importancia económica y cuarentenaria del cultivo de aguacate *Persea americana* (Lauraceae): *Stenoma catenifer* (Lepidoptera: Depressariidae), *Heilipus lauri* y *Heilipus trifasciatus* (Coleoptera: Curculionidae). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-Agrosavia.
- Centre for Agricultural Bioscience International (CABI). (2020). *Stenoma catenifer* (avocado seed moth). In *Invasive Species Compendium*. Retrieved from <https://www.cabi.org/isc/datasheet/52353>
- Cerasoli, F., D'Alessandro, P., & Biondi, M. (2022). Worldclim 2.1 versus Worldclim 1.4: Climatic niche and grid resolution affect between-version mismatches in habitat suitability models predictions across Europe. *Ecology and evolution*, 12(2), e8430.
- Comisión de Medidas Fitosanitarias (1995). Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias No. 4: Requisitos para el establecimiento de áreas libres de plagas. Recuperado de <http://www.cosave.org/sites/default/files/nimfs/d4d3200ea8b1484a791a74495ee8a755.pdf>
- Comisión de Medidas Fitosanitarias. (1997). Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias No. 6: Directrices para la vigilancia. Recuperado de <http://www.cosave.org/sites/default/files/nimfs/26ee3c70a9cc5d0a0e8e7300c154987e.pdf>
- Comisión de Medidas Fitosanitarias. (1997). Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias No. 7: Sistema de certificación para la exportación. Recuperado de https://www.ippc.int/largefiles/adopted_ISPMs_previousversions/es/ISPM_07_1997_Es_2006-05-02.pdf

- Comisión de Medidas Fitosanitarias. (1998). Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias No. 8: Determinación de la situación de una plaga en un área. Recuperado de <http://www.cosave.org/sites/default/files/nimfs/d054967dc844633e764c22e3976e8152.pdf>
- Comisión de Medidas Fitosanitarias. (2006). Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias No. 1: Principios fitosanitarios para la protección de las plantas y la aplicación de medidas fitosanitarias en el comercio internacional. Recuperado de www.cosave.org/sites/default/files/nimfs/e5a4e248a84907b76bbc62078d4e65fe.pdf
- Consejo Nacional de Política Económica y Social. (2008, abril 21). Documento CONPES 3514.
- Corpocaldas. (2020). Plan de gestión ambiental regional 2020-2031 [Anexo XI]. Recuperado de https://corpocaldas2022.blob.core.windows.net/webadmin/file_SectoresE_ukDoAOyv.pdf
- Correa Moreno, D. L., Jaramillo Laverde, A., Grajales Guzmán, L. C., & Bolaños-Benavides, M. M. (2022). Crecimiento verde y agricultura climáticamente inteligente en el cultivo de aguacate (*Persea americana*). Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria-AGROSAVIA.
- Cortés Mora, P. C., Díaz Rivillas, M. A., Peña Corrales, E. L., Rico Díaz, L. P., & Roncancio González, P. A. (2021). Exportación de aguacate Hass de Colombia a Estados Unidos. Politécnico Grancolombiano. Recuperado de <https://alejandria.poligran.edu.co/bitstream/handle/10823/2917/G2%20-%20Plan%20de%20negocios.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Damos, P., & Savopoulou-Soultani, M. (2012). Temperature-driven models for insect development and vital thermal requirements. *Psyche: A Journal of Entomology*, 2012, 1-13.

- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2014). Censo Nacional Agropecuario 2014. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/censo-nacional-agropecuario-2014>
- Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual review of ecology, evolution, and systematics*, 40, 677-697.
- Elith, J., Phillips, S.J., Hastie, T., Dudik, M., Chee, Y.E. and Yates, C.J. (2011) A Statistical Explanation of MaxEnt for Ecologists. *Diversity and Distributions*, 17, 43-57. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x>
- Esri. (2023, mayo). Interseccionar entidades. ArcGIS Pro Documentation. <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/3d-analyst/intersecting-features.htm>
- Fand, B. B., Choudhary, J. S., Kumar, M., & Bal, S. K. (2014). Phenology modelling and GIS applications in pest management: A tool for studying and understanding insect-pest dynamics in the context of global climate change. *Approaches to Plant Stress and their Management*, 107-124.
- FAO. (2021). Integrated pest management of avocado seed moth (*Stenoma catenifer* Walsingham). Food and Agriculture Organization of the United Nations. Retrieved from <http://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC221884/?keywords=Stenoma+catenifer>
- Fernani, P. N. (2022). R como un SIG: Extracción de datos climáticos de WorldClim.
- Fick, S., & Hijmans, R. (2017). WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302-4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>

- Food and Agriculture Organization or the United Nations (FAO). (2018). FAOSTAT-Producción Agrícola. <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Consultado el 20/03/22.
- Ghosh, P., & Kumpatla, S. P. (2022). GIS applications in agriculture. In *Geographic Information Systems and Applications in Coastal Studies*. IntechOpen.
- González, H. (1993). Memoria explicativa: Mapa geológico generalizado del departamento de Caldas: Geología y recursos minerales. Scale, 1(250), 000.
- González-González, M. G., Gómez-Sanchís, J., Alegre, V., López, S., Blasco, J., Cubero, S., & Soria-Olivas, E. (2019). Herramienta para la generación de mapas de rendimiento en cítricos usando los datos de una plataforma de asistencia a la recolección con sistema de clasificación. In *X Congreso Ibérico de Agroingeniería-X Congresso Ibérico de Agroengenharia*.
- Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modelling*, 135(2-3), 147-186.
- Guzzetti, F. y Tonelli, G. (2004). Sistema de información sobre catástrofes hidrológicas y geomorfológicas en Italia (SICI): una herramienta para gestionar los riesgos de deslizamientos e inundaciones. *Peligros naturales y ciencias del sistema terrestre*, 4 (2), 213-232.
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, L., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 25(15), 1965-1978. <https://doi.org/10.1002/joc.1276>
- Hoddle, M. S., & Hoddle, C. D. (2008). Bioecology of *Stenoma catenifer* (Lepidoptera: Elachistidae) and associated larval parasitoids reared from Hass avocados in Guatemala. *Journal of Economic Entomology*, 101(3), 692-698.

- Huisman, O., & de By, R. A. (2009). Principles of geographic information systems. ITC Educational Textbook Series, 1, 17.
- Hung Nguyen, Q., Bang Ly, H., Al-Ansari, N., & Thai Pham, B. (2021). Influence of Data Splitting on Performance of Machine Learning Models in Prediction of Shear Strength of Soil. Hindawi.
- Ibrahim, E. A., Salifu, D., Mwalili, S., Dubois, T., Collins, R., & Tonnang, H. E. (2022). An expert system for insect pest population dynamics prediction. Computers and Electronics in Agriculture, 198, 107124.
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2009). Resolución Número 3180 del 26 de agosto de 2009. Recuperado de <https://www.ica.gov.co/getattachment/Normatividad/Normas-Ica/Resoluciones-Oficinas-Nacionales/2020/2020R78006/2009R3180.pdf.aspx?lang=es-CO>
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2012). Manejo fitosanitario del cultivo del aguacate Hass (Persea americana Mill): medidas para la temporada invernal. Recuperado de <https://www.ica.gov.co/getattachment/4b5b9b6f-ecfc-46e1-b9ca-b35cc1cef2e2/->
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2016). Resolución Número 1507 del 22 de febrero de 2016. Recuperado de <https://www.ica.gov.co/getattachment/81591168-ac45-478a-b84b-f054d4e5829b/2016r1507.aspx>
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2016). Resolución Número 1507 del 22 de febrero de 2016. Recuperado de <https://www.ica.gov.co/getattachment/81591168-ac45-478a-b84b-f054d4e5829b/2016R1507.aspx>
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2016). Resolución Número 448 del 20 de enero de 2016. Recuperado de <https://faolex.fao.org/docs/pdf/col157658.pdf>

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2016). Resolución Número 3973 del 14 de abril de 2016. Recuperado de <https://www.ica.gov.co/getattachment/Normatividad/Normas-Ica/Resoluciones-Oficinas-Nacionales/2021/2021R115686/Res-3973-2016.pdf.aspx?lang=es-CO>

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2017). Resolución Número 30021 del 28 de abril de 2017. Recuperado de <https://www.ica.gov.co/getattachment/9d8fe0fa-66d2-4feb-9513-cbba30dc4844/2017R30021.aspx>

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2022). Resolución No. 17742 de 2022, Por la cual se declaran algunas zonas de producción de aguacate var. Hass del municipio de Pácora (Caldas) como área libre de las plagas cuarentenarias *Heilipus lauri* (Boheman), *Heilipus trifasciatus* (Fabricius) y *Stenoma catenifer* (Walsingham). Recuperado de <https://www.ica.gov.co/getattachment/53c90b1f-23fa-4a7d-a1fd-3ce19b61bcfb/2022R00017742.aspx>

Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). (2023). Área libre de plagas cuarentenarias del aguacate Hass. Recuperado de <https://www.ica.gov.co/noticias/ica-area-libre-plagas-cuarentenarias-aguacate-hass#:~:text=En%20el%20departamento%20de%20Caldas,en%20el%20municipio%20de%20P%C3%A1cora>

Instituto Colombiano Agropecuario. (2021). Con 43 mil kilos, el aguacate Hass colombiano marca "gol de campo" en el Super Bowl 2021. ICA. <https://www.ica.gov.co/noticias/ica-600-toneladas-aguacate-hass-colombiano#:~:text=Colombia%20cuenta%20con%2025.000%20hect%C3%A1reas,indirectos%20en%20toda%20la%20cadena>

Instituto Colombiano Agropecuario. (2021). En Caldas se realizan mesas de trabajo para aumentar la productividad y las exportaciones de aguacate Hass. ICA. <https://www.ica.gov.co/noticias/ica-caldas-mesas-trabajo-aguacate-hass>

- Instituto Colombiano Agropecuario. (2022). En 2022, Colombia ha exportado 1.100 toneladas certificadas de aguacate Hass a los EEUU. ICA. <https://www.ica.gov.co/noticias/ica-colombia-exportacion-1100-toneladas-aguacate>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). (2022). IDEAM - Datos meteorológicos. Recuperado de <https://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/datos-meteorologicos>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2021). Datos abiertos Subdirección Cartografía y Geografía. Cartografía básica. Cartografía base escala 1:500.000. Geoportal. <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-cartografia-y-geografia>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (s.f.). Origen. Recuperado de <https://origen.igac.gov.co/>
- Jiménez Martínez, E., & Rodríguez Flores, O. (2014). Insectos: Plagas de cultivos en Nicaragua.
- Khanal, S., Kc, K., Fulton, J. P., Shearer, S., & Ozkan, E. (2020). Remote sensing in agriculture—accomplishments, limitations, and opportunities. *Remote Sensing*, 12(22), 3783.
- Kondo, T., et al. (2020). Insectos y ácaros. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12324/36879>.
- Luna, A., López-Martínez, V., Jiménez-García, D., Jones, R. W., Castañeda-Vildozola, Á., & Ruiz-Montiel, C. (2017). Actual and potential distribution of five regulated avocado pests across Mexico, using the maximum entropy algorithm. *Florida Entomologist*, 100(1), 92-100.
- Laiton-Jiménez, L. A., Franco, F. L., Montoya, E. C., & Machado, P. B. (2020). Bases para establecer una alerta temprana de *Monalonion velezangeli* (Hemiptera: Miridae) en café en el Huila. *Revista Cenicafé*, 71(2), 07-20.

Liebhhold, A. M., Rossi, R. E & Kemp, W.P. (1993). Geostatistics and geographic information systems in applied insect ecology. *Annual review of entomology*, 38, 303–327.

Lü, G., Batty, M., Strobl, J., Lin, H., Zhu, A. X., & Chen, M. (2019). Reflections and speculations on the progress in Geographic Information Systems (GIS): a geographic perspective. *International journal of geographical information science*, 33(2), 346-367.

Manrique B, M.B; Carabalí, A; Kondo D. T. & Bacca, T. (2014). Biología del pasador del fruto del aguacate *Stenoma catenifer* Walsingham (Lepidoptera: Elachistidae) y búsqueda de sus posibles enemigos naturales. *Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. U. de Caldas*, 18 (2): 79-92.

Manrique Burbano, M., Carabali Muñoz, A., & Ramos, Y. (2009). Aspectos sobre la biología de la polilla de la semilla del aguacate *Stenoma catenifer* Walsingham (Lepidoptera: Elachistidae). Conference: XXXVI Congreso de la Sociedad Colombiana de entomología.

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2019). Cadena productiva Aguacate. Septiembre 2019. Recuperado de: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Aguacate/Documentos/2019-09-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2020). Cadena productiva Aguacate. Primer trimestre 2020. Recuperado de: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Aguacate/Documentos/2020-03-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2021). Cadena productiva Aguacate. Marzo 2021. Recuperado de: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Aguacate/Documentos/2021-03-31%20Cifras%20Sectoriales.pdf>

- Murgas, A. S., Carranza, R. E., & Abrego, J. C. (2018). Presencia y daño causado por la polilla *Stenoma catenifer* Walsingham (Lepidoptera: Elachistidae) barrenadora del fruto de aguacate *Persea americana* Mill en Panamá. *Centros: Revista científica universitaria*, 7(1), 74-88.
- Nava, D. E., Haddad, M. D. L., & Parra, J. R. P. (2005). Exigências térmicas, estimativa do número de gerações de *Stenoma catenifer* e comprovação do modelo em campo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40, 961-967.
- Nava, D. E., Parra, J. R., Bento, J., Diez-Rodriguez, G. I., & Haddad, M. L. (2006). Distribuição vertical, danos e controle cultural de *Stenoma catenifer* Walsingham (Lepidoptera: Elachistidae) em pomar de abacate. *Neotropical Entomology*, 35, 516-522.
- Nolan Ma. (2020). Voronoi Diagram. <https://cklix.people.wm.edu/teaching/math400/Voronoi-paper.pdf>
- Okabe, A., Boots, B., Sugihara, K., & Chiu, S. N. (2009). Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagrams.
- Olvera-Vargas, L. A., Quiroz Gaspar, Á. D. J., Contreras-Medina, D. I., & Aguilar-Rivera, N. (2020). Análisis de riesgo potencial de Huanglongbing a través de tecnología geoespacial en Colombia. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(3), 1-23.
- Orozco, Ó. A., & Ramírez, G. L. (2016). Sistemas de información enfocados en tecnologías de agricultura de precisión y aplicables a la caña de azúcar, una revisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 15(28), 103-124.
- Palacios-Torres RE, Ramírez del Ángel E, Uribe González E, Granados-Escamilla D, Romero-Castañeda J, Valdez-Carrasco J. (2011). Avocado seed moth, *Stenoma catenifer* Walsingham (Lepidoptera: Elachistidae) in Queretaro, México. *Acta Zoológica Mexicana* (n.s.), 27(2): 501-504.

- Pérez Álvarez, S., Ávila Quezada, G., & Coto Arbelo, O. (2015). El aguacatero (*Persea americana* Mill). *Cultivos Tropicales*, 36(2), 111-123.
- Pérez Astray, J. J. (2018). Sistema de información geográfica para la agricultura de precisión en la caña de azúcar en Cuba (Doctoral dissertation, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Automática y Sistemas Computacionales).
- Peter, Y., Reuben, I., & Bulus, E. (2012). The application of remote sensing and geographic information system (GIS) for monitoring deforestation in south-west Nigeria. *Journal of Environmental Issues and Agriculture in Developing Countries* Vol, 4(1), 6.
- Peterson, A., Soberón, J., Pearson, R., Anderson, R., Martínez-Meyer, E., Nakamura, M., & Araújo, M. (2011). *Ecological niches and geographic distributions* (MPB-49). Princeton University Press. <https://doi.org/10.23943/princeton/9780691136868.001.0001>
- Phillips, S., Anderson, R., & Schapire, R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Phillips, S.J., Dudík, M. and Schapire, R.E. (2004). A Maximum Entropy Approach to Species Distribution Modeling. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Machine Learning*, 655-662. <http://dx.doi.org/10.1145/1015330.1015412>
- Phillips, Steven J., Dudík, Miroslav., Schapire, Robert E. (2024). Software Maxent para modelar nichos y distribuciones de especies (Versión 3.4.1). Disponible en la URL: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/. Consultado el 19 de marzo de 2024.

Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022: Retos, estrategias y metas. (2019). Transformación empresarial: desarrollo productivo, innovación y adopción tecnológica para la productividad. Tomado de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/PND-Resumen-2018-2022.pdf>

Puentes, E. y F. Moreno F. (1992). Ciclo de vida y hábitos de *Stenoma catenifer* Walsingham, Lepidóptera: Stenomidae, pasador del fruto del aguacate y observaciones sobre otras plagas del fruto en Palmira, Valle: Tesis de Ingeniero Agrónomo, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira.

Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario de Colombia (Agronet). (2023).

La inteligencia artificial predice con alta precisión plagas en aguacate Hass.

Recuperado de <https://www.agronet.gov.co/Noticias/Paginas/La-inteligencia-artificial-predice-con-alta-precisi%C3%B3n-plagas-en-aguacate-Hass.aspx>

Ríos-Casanova, L., & Heppner, J. B. (2019). The Avocado Seed Moth *Stenoma catenifer* (Lepidoptera: Elachistidae): History of an Invading Species, Pest Biology and Control in Mexico and Other Countries. *Journal of Integrated Pest Management*, 10(1), 1–8. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmz032>

Rodríguez, J. M., Llácer, G., & Angulo-Sandoval, P. (2020). Potential distribution of the avocado seed moth *Stenoma catenifer* (Lepidoptera: Elachistidae) in Peru. *Florida Entomologist*, 103(3), 453–459. <https://doi.org/10.1653/024.103.0310>

Scholthof, G. (2007). The disease triangle: pathogens, the environment and society. *Nature Reviews Microbiology*, 5, 152-156. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1596>

SENASICA-DGSV. (2016). Palomilla barrenadora del aguacate (*Stenoma catenifer* Walsingham). Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria- Dirección General de Sanidad Vegetal- Centro Nacional de Referencia Fitosanitaria- Grupo Especialista Fitosanitario. Ficha Técnica. Tecámac, México 16 p. Disponible en:

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/155686/Ficha_Tecnica_stenoma_catenifer_EPF_2016_1.pdf

Sistema Integrado de Monitoreo Ambiental de Caldas (SIMAC). (2022). Boletín climatológico anual 2022. Recuperado de https://cdiac.manizales.unal.edu.co/publicaciones/Boletín_Anual_2022.pdf

Sridhar, V., & Reddy, P. V. R. (2013). Use of degree days and plant phenology: a reliable tool for predicting insect pest activity under climate change conditions. In *Climate-resilient horticulture: Adaptation and mitigation strategies* (pp. 287-294). India: Springer India.

Tang, J., Li, J., Lu, H., Lu, F., & Lu, B. (2019). Potential distribution of an invasive pest, *Euplatypus parallelus*, in China as predicted by maxent. *Pest Management Science*, 75(6), 1630-1637. <https://doi.org/10.1002/ps.5280>

Uribe Castrillón, C. & Tabares Osorio, C. (2024). Fenología del aguacate Hass en el trópico andino del departamento de Caldas.

Velásquez Echavarría, J. S. (2021). Registro de *Stenoma catenifer* Walsingham, 1912 (Lepidoptera: Elachistidae) en aguacates del bosque seco tropical de Santa Fe de Antioquia, Antioquia. Grupo de estudiantes de entomología Unal. Sede de Medellín. Recuperado de: <https://viewer.joomag.com/mi-primera-publicacion-metroflor-104-web/0235505001626229416>

Vázquez, M. A., Cruz-López, L., Gómez, J., & Castillo, A. (2017). Annual capture of two elachistidae moth species using *Stenoma catenifer* sex pheromone in criollo avocado (*Persea americana*) at Chiapas, Mexico. *Southwestern Entomologist*, 42(1), 91-101.

Velázquez Martínez, G. D. C. (2020). Sistema de trampeo para *Stenoma catenifer* Walsingham (Lepidoptera: Elachistidae) en huertos de aguacate Hass en Colima (Doctoral dissertation).

Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote sensing of environment*, 236, 111402.