

AGROSAVIA
EDITORIAL

Criterios para
la selección de
materiales de

ají

colombiano
(*Capsicum* spp.)
con atributos
diferenciales de calidad
para la agroindustria

Compiladores

Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza
Juan Camilo Henao-Rojas

AGROSAVIA
Corporación colombiana de investigación agropecuaria



Ciencias



Universidad
ICESI



Utedé
Unidad Técnica para el Desarrollo Profesional



Agricultura





Título de la obra

Diversidad biológica y cultural

Técnica: Ilustración digital con tableta, pincel en textura de carboncillo

Autora: Laura Stefanny López Cortés (Sstefcore)

 @sstefcore

 Stefanny López

Descripción

Cada ilustración de este libro nace como un acto de confianza, el de permitir que la ciencia se encontrara con el arte y que las memorias de cada autor trabajaran como raíces que se entrelazan en busca de una misma tierra en donde crecer. Crear y cocrear me ha llevado a considerar que mis trazos son un diálogo, no solo con quienes escribieron cada capítulo,

sino con todas las memorias que ellos mismos cargan y heredan, porque no han sido voces individuales, sino la resonancia y colectividad de muchas otras: de las manos del campesino que siembra, de quien selecciona las semillas, de quien cuida la tierra y de quien reconoce la diversidad del *Capsicum* desde su experiencia y cotidianidad.

Nota: todas las obras fueron cocreadas entre la artista y los autores de cada capítulo.

Criterios para
la selección de
materiales de

ají

colombiano

(*Capsicum* spp.)

con atributos diferenciales de
calidad para la agroindustria

Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza	Jilberth Ferney Alzate Castaño
Juan Camilo Henao-Rojas	Clara Inés Medina Cano
Nancy Yohana Grisales-Vásquez	Sebastián Parra Londoño
Laura Beatriz Espitia-Negrete	Manuela Robledo Gómez
Luz Fanny Orozco-Orozco	Gustavo Adolfo Ossa Ossa
Laura Maria Restrepo Martínez	Federico Roda
Maria Yuli González González	Jaime Andrés Tigreros
Luis Felipe López Hernández	Esteban Castaño Llanos
Miguel Angel Useche	Maira Alejandra Vega Muñoz
Andrés Javier Cortés Vera	Guillermo León Montoya Peláez
Jaime Horacio López-Hoyos	Rafael Chamorro
José Antonio Rubiano Rodríguez	Ana Lía Restrepo Mejía
Carlos Enrique Velásquez Arroyo	Jorge Eliécer Jaramillo Noreña
Carolina Ortiz Muñoz	
Yenifer Campos-Patiño	
Takumasa Kondo	
Gleyder Yeraldín Bedoya-Vélez	
Carolina Zuluaga Mejía	
Cristian Dominguez Pulgarin	
Jaison Martínez Saldarriaga	

Colección
Alianzas AGROSAVIA
• 2025 •

Criterios para la selección de materiales de ají colombiano (*Capsicum* spp.) con atributos diferenciales de calidad para la agroindustria. / Oscar Alfonso Loaiza Loaiza [y otros treinta y dos] - Mosquera (Colombia):

AGROSAVIA, 2025.

307 páginas (Colección Alianzas AGROSAVIA)

Incluye gráficos y tablas.

ISBN e-Book: 978-958-740-862-1

1. *Capsicum annuum* 2. Conservación de recursos genéticos 3. Mejoramiento genético 4. Biodiversidad 5. Germoplasma 6. Calidad del alimento 7. Enfermedades de las plantas 8. Costo de producción.

Palabras clave normalizadas según Tesauro Multilingüe de Agricultura - Agrovoc
Catalogación en la publicación - Biblioteca Agropecuaria de Colombia

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)

Centro de Investigación La Selva, Km 7, vía Rionegro-Las Palmas, Sector Llanogrande, Rionegro, Antioquia.
Código postal 054040, Colombia.

Esta publicación es resultado del proyecto de investigación “Selección de materiales de *Capsicum* spp. con atributos diferenciales y ventajas competitivas agronómicas y agroindustriales”, desarrollado por la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria - AGROSAVIA, en alianza con la Universidad ICESI, Convenio No. 2098, el cual fue financiado por el Fondo Francisco José de Caldas - Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias), en el marco de la Convocatoria 903-2021, para el apoyo a programas y proyectos de I+D+i que contribuyan a resolver los desafíos establecidos en la misión “Bioeconomía para una Colombia potencia viva y diversa hacia una sociedad impulsada por el conocimiento”.

Colección: Alianzas AGROSAVIA

Tipología: libro resultado de investigación

Primera edición: diciembre de 2025

Fecha de recepción: 06/07/25

Fecha de evaluación: 29/07/25

Fecha de aceptación: 15/11/25

Autoría

Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza
Juan Camilo Henao-Rojas
Nancy Yohana Grisales-Vásquez
Laura Beatriz Espitia-Negrete
Luz Fanny Orozco-Orozco
Laura Maria Restrepo Martínez
Maria Yuli González González
Luis Felipe López Hernández
Miguel Angel Useche
Andrés Javier Cortés Vera
Jaime Horacio López-Hoyos
José Antonio Rubiano Rodríguez
Carlos Enrique Velásquez Arroyo
Carolina Ortiz Muñoz
Yenifer Campos-Patiño
Takumasa Kondo
Gleyder Yeraldín Bedoya-Vélez

Carolina Zuluaga Mejía
Cristian Dominguez Pulgarin
Jaison Martínez Saldarriaga
Jilberth Ferney Alzate Castaño
Clara Inés Medina Cano
Sebastián Parra Londoño
Manuela Robledo Gómez
Gustavo Adolfo Ossa Ossa
Federico Roda
Jaime Andrés Tigreros
Esteban Castaño Llanos
Maira Alejandra Vega Muñoz
Guillermo León Montoya Peláez
Rafael Chamorro
Ana Lía Restrepo Mejía
Jorge Eliécer Jaramillo Noreña

Publicado en Mosquera, Cundinamarca

Preparación editorial

Editorial AGROSAVIA
editorial@agrosavia.co

Dirección editorial: Astrid Verónica Bermúdez Díaz

Edición: Verónica Barreto Riveros

Corrección de estilo: Sebastián Montero Vallejo

Diseño y diagramación: Jaime Wilches Cañón

Citación sugerida: Loaiza-Loaiza, O. A., Henao-Rojas, J. C., Grisales-Vásquez, N. Y., Espitia-Negrete, L. B., Orozco-Orozco, L. F., Restrepo Martínez, L. M., González González, M. Y., López Hernández, L. F., Useche, M. Á., Cortés Vera, A. J., López-Hoyos, J. H., Rubiano Rodríguez, J. A., Velásquez Arroyo, C. E., Ortiz Muñoz, C., Campos-Patiño, Y., Kondo, T., Bedoya-Vélez, G. Y., Zuluaga Mejía, C., Dominguez Pulgarin, C., ... Martínez Saldarriaga, J. (2025). *Criterios para la selección de materiales de ají colombiano (Capsicum spp.) con atributos diferenciales de calidad para la agroindustria*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.investigation.7408621>

Cláusula de responsabilidad: AGROSAVIA no es responsable de las opiniones ni de la información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, declarando en este último supuesto que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación. Igualmente, expresan que no existe conflicto de interés alguno con relación a los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros, relativa a los derechos de autor u otros derechos que se vulneren como resultado de su contribución.

Línea de atención al cliente

018000-121515

atencionalcliente@agrosavia.co

www.agrosavia.co



https://co.creativecommons.org/?page_id=13

Agradecimientos

La presente publicación no habría sido posible sin el esfuerzo y compromiso de numerosas personas e instituciones que contribuyeron a su desarrollo.

A Clara Inés Medina y Jorge Eliécer Jaramillo, formuladores del proyecto, quienes con su liderazgo, conocimiento, dedicación y visión permitieron estructurar esta iniciativa y hacer realidad cada uno de sus componentes.

A la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), que nos apoya para desarrollar destrezas y adquirir el conocimiento en la investigación agropecuaria, además de ser el custodio del germoplasma vegetal del país, fundamental para la conservación, el mejoramiento y el aprovechamiento del ají en Colombia.

Al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias), entidad financiadora del proyecto, por su apoyo para la generación de conocimiento científico y para la promoción de la investigación como motor del desarrollo agroindustrial en el país.

A la Universidad Icesi, ejecutora del programa, por su compromiso con la ciencia, la educación y la innovación en el sector agroalimentario, fortaleciendo las capacidades técnicas y académicas necesarias para el éxito del proyecto.

A Hugo Restrepo & Cía. S.A., aliado comercial del proyecto, por su confianza y respaldo en la valoriza-

ción del *Capsicum* spp., facilitando el vínculo entre la investigación y su aplicación en la agroindustria.

A nuestro instituto aliado, la Unidad Técnica para el Desarrollo Profesional (Utedé) de Buga, por su apoyo en la articulación académica y en la generación de conocimiento aplicado al desarrollo del sector agroalimentario.

A los Bancos de Germoplasma Vegetal para la Alimentación y la Agricultura de la Nación Colombiana, manejados por AGROSAVIA, quien suministró los materiales de *Capsicum* utilizados para esta investigación.

Al programa de Ciencias Culinarias de la Universidad de Antioquia, cuyo aporte fue clave en diversas acciones del proyecto, resaltando la riqueza cultural y gastronómica del ají en Colombia.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a todos los investigadores, productores, técnicos y colaboradores que hicieron parte de esta iniciativa. Gracias a su esfuerzo, el conocimiento generado en este libro contribuirá al fortalecimiento de la conservación, la producción y el aprovechamiento del ají en Colombia, con el fin de consolidar su importancia en la agricultura, la industria y la cultura gastronómica del país.

¡Gracias a todos por hacer posible este trabajo!

• Contenido •

Presentación	9
Prólogo	10
Introducción	12
Capítulo I. Conservación de recursos genéticos del género <i>Capsicum</i>	15
Introducción	18
Importancia de la conservación de recursos genéticos y su uso	18
Descripción y origen del género <i>Capsicum</i>	21
Principales colecciones internacionales de <i>Capsicum</i>	22
Historia de la conformación de los principales bancos de germoplasma de <i>Capsicum</i> en Colombia e investigaciones relacionadas	24
Reflexión	35
Referencias	36
Capítulo II. Diversidad y mejoramiento genético del ají (<i>Capsicum</i> spp.)	39
Introducción	42
La taxonomía botánica del ají (<i>Capsicum</i> spp.)	42
La genética del síndrome de domesticación del ají	46
Huellas genéticas de la demografía en <i>Capsicum</i> spp.	47
Base genética de la adaptación ecológica en ají	48
Estrategias modernas de mejoramiento genético en ají	50
La era genómica del ají	54
Arquitectura genómica de los biocompuestos en frutos de ají	67
Híbridos de ají (<i>Capsicum</i> spp.) con perfiles mejorados de compuestos bioactivos y su impacto en la agroindustria	68
Rutas biosintéticas de los principales biocompuestos en los frutos de ají	73
Reflexión	80
Referencias	81
Capítulo III. Diversidad fenotípica de accesiones de <i>Capsicum</i> del Banco de Germoplasma Vegetal para la Alimentación y la Agricultura de la Nación Colombiana	91
Introducción	94
Caracterización morfológica	95
Resultados	100
Conclusiones	108
Reflexión	108
Referencias	110

Capítulo IV. Contexto agronómico de la evaluación de materiales de *Capsicum* spp. 111

Introducción	114
Preparación y acondicionamiento del suelo	114
Establecimiento del cultivo	118
Manejo del riego y del drenaje	120
Manejo de la fertilización	129
Tutorado	132
Manejo de arvenses	132
Reflexión	132
Referencias	133

Capítulo V. Insectos fitófagos asociados a diferentes materiales de *Capsicum* 135

Introducción	138
Áfidos o pulgones	139
Trips	142
Lepidópteros	143
Ácaros	146
Mosca blanca	149
Minador de la hoja	151
Reacción a insectos plaga en 284 materiales de <i>Capsicum</i> establecidos en el C. I. La Selva durante 2023	152
Reacción a insectos plaga de 34 materiales de <i>Capsicum</i> establecidos en dos localidades diferentes durante 2024	157
Reflexión	165
Referencias	166

Capítulo VI. Principales enfermedades asociadas a accesiones del género

***Capsicum* establecidas bajo condiciones protegidas 173**

Introducción	176
<i>Leveillula</i> sp. - mildew polvoso	178
<i>Sclerotinia</i> sp. - moho blanco	181
<i>Botrytis</i> sp. - moho gris	184
<i>Colletotrichum</i> sp. - antracnosis	187
<i>Cercospora</i> sp. - ojo de sapo	190
<i>Alternaria</i> sp. - mancha foliar por alternaria	192
Virus	194
Enrollamiento de las hojas	195

Mosaicos	196
Bronceados	197
Manchas bacterianas	199
Marchitez bacteriana (<i>Ralstonia solanacearum</i>)	201
Pudrición blanda o tallo hueco (<i>Pectobacterium</i> spp.)	202
Conclusiones	204
Reflexión	205
Referencias	205
Capítulo VII. Atributos de calidad nutricional y agroindustrial de los ajís en Colombia: descripción de la diversidad fisicoquímica de frutos de <i>Capsicum</i> spp. provenientes del BGV	209
Introducción	212
Calidad y nutrición	213
Diversidad fisicoquímica	218
Reflexión	243
Referencias	245
Capítulo VIII. Oportunidades de transformación de frutos de <i>Capsicum</i> en Colombia	249
Introducción al mercado de <i>Capsicum</i> sp.	252
Utilidades del fruto	260
Algunas variedades de interés en el mercado internacional sembradas en Colombia	261
Algo más que salsa: formulaciones o productos comerciales	263
Una historia del picante en el Valle del Cauca y Colombia: Hugo Restrepo y Cía., más de 45 años apostando por el agro colombiano	267
Reflexión	269
Referencias	270
Capítulo IX. Costos de producción para <i>Capsicum</i> spp. en Colombia	273
Introducción	276
Flujo de caja	283
Evaluación financiera	284
Análisis de los costos obtenidos por parcela	285
Reflexión	286
Referencias	286
Anexos	288
Conclusiones y reflexiones finales	295
Autoría	298



Presentación

El conocimiento científico cobra mayor sentido cuando dialoga con las necesidades y oportunidades de los territorios. Este libro sobre el género *Capsicum* es el resultado de un esfuerzo colectivo orientado a reconocer el valor de los ajís como parte esencial de la biodiversidad, la cultura y la economía agroalimentaria de nuestro país.

En Colombia, estas especies representan mucho más que un recurso agrícola: son parte de la memoria gastronómica, de las prácticas culturales y del potencial de innovación en sectores como la agroindustria, la salud y los mercados especializados. En cada semilla, en cada fruto, se expresa una riqueza genética que es, al mismo tiempo, patrimonio cultural y oportunidad de desarrollo sostenible.

Desde el Centro de Investigación La Selva y la sede Eje Cafetero de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA), reconocemos que este trabajo constituye un hito en la consolidación de conocimiento sobre *Capsicum*, el cual integra investigación, sistematización de experiencias y aportes de múltiples actores. Su valor reside no solo en los resultados alcanzados, sino también en el proceso de articulación entre investigadores, instituciones aliadas y comunidades productoras, que permite proyectar un camino sólido hacia el aprovechamiento integral de estas especies.

Este libro, además, es un ejemplo de cómo el arte-ciencia se convierte en un puente para acercar el conoci-

miento a la sociedad. Las ilustraciones realizadas por Laura Stefanny López Cortés enriquecen la obra, al integrar la sensibilidad expresiva del arte con el rigor científico, con lo que se muestra que la ciencia también puede ser contada a través de la belleza del arte. Esta unión abre nuevas posibilidades para comunicar, inspirar y valorar la diversidad del ají colombiano.

Queremos resaltar y agradecer especialmente el apoyo de quienes hicieron posible esta publicación: Minciencias, financiador del proyecto; la Universidad Icesi, ejecutora del programa; Hugo Restrepo & Cía., aliado comercial; la Utedé de Buga, y los Bancos de Germoplasma Vegetal para la Alimentación y la Agricultura de la Nación Colombiana, custodiados por AGROSAVIA. Su compromiso y colaboración reflejan la importancia de sumar esfuerzos entre lo público, lo privado, la academia y la comunidad científica para transformar la investigación en impacto real.

Este libro debe asumirse como un punto de partida y una invitación a seguir trabajando de manera conjunta. La investigación y el desarrollo alrededor del género *Capsicum* requieren continuidad, innovación y alianzas estratégicas de largo plazo que permitan consolidar estas especies como motores de desarrollo, competitividad y sostenibilidad en Colombia.

Juan Mauricio Rojas Acosta
Director Centro de Investigación La Selva
y Sede Eje Cafetero
AGROSAVIA





Prólogo

Explorar el universo del *Capsicum* colombiano es sumergirse en una historia vibrante en la que la biodiversidad se encuentra con la cultura, la ciencia y la innovación. Este libro es una compilación técnica sobre una especie vegetal, pero, además, es una invitación a descubrir las múltiples capas de conocimiento, tradición y posibilidad que encierra el género *Capsicum*, y a comprender su verdadero valor para el país y el mundo.

Colombia, reconocida globalmente por su riqueza biológica, alberga una diversidad de ajís que trasciende lo gastronómico y se proyecta como una plataforma estratégica para la construcción de modelos bioeconómicos con generación de valor. En estas páginas, el lector hallará, además de datos y evidencia científica, un conjunto de rutas, experiencias inspiradoras y recomenda-

ciones prácticas para transformar la agrobiodiversidad en soluciones reales, sostenibles y con alto impacto social y productivo.

Esta obra es el resultado de un esfuerzo colectivo entre investigadores, universidades y empresas agroindustriales que decidieron unir saberes y voluntades para caracterizar, conservar, transformar y valorizar el ají colombiano desde una perspectiva integral. Cada capítulo abre una puerta distinta: propuestas a desafíos fitosanitarios; exploración de oportunidades de mejoramiento y selección de materiales genéticos; comprensión profunda de los atributos fisicoquímicos que hacen único a cada fruto; diseño de nuevas cadenas de valor que conectan el campo con los mercados, y la revalorización cultural de un alimento ancestral que aún tiene mucho por contar.



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

El lector podrá navegar por fronteras del conocimiento, sin perder de vista las realidades agronómicas, sociales y culturales del territorio colombiano. Más allá del ají, este libro propone una ruta metodológica que puede ser replicada para otras especies de interés agroindustrial, lo que muestra que la ciencia aplicada, cuando se articula con la industria, tiene el poder de generar proyectos transformadores con impacto territorial.

Invitamos al lector a adentrarse en este recorrido con mente abierta y espíritu crítico; a dejarse inspirar por la riqueza de datos que aquí se presentan, por las experiencias y visiones que aquí se reúnen, y a creer, como lo hicieron sus autores, que es posible construir consensos multidisciplinarios, generar y cultivar materiales de alta calidad basados en nuestra agrobiodiversidad, y avanzar hacia un mo-

delo de desarrollo que sea, al mismo tiempo, más justo, sostenible y profundamente colombiano.

Finalmente, invitamos al lector a conocer y disfrutar de las ilustraciones realizadas por Laura Stefanny López Cortés para cada una de las portadillas de los capítulos y para la portada del libro. En cada obra, la artista representó la temática específica, el sentir, el esfuerzo y el simbolismo que tiene para los equipos de autores el resultado final de su trabajo. Así mismo, en la portada se representa la riqueza de la diversidad cultural, de pensamientos y de ideas presente en estas páginas: una gran similitud con la diversidad biológica del género *Capsicum*.



Introducción

El género *Capsicum*, de la familia Solanaceae, conocido como chile o ají, es originario de América Central y Suramérica (Bosland & Votava, 2000). Está conformado por aproximadamente 43 especies, de las cuales 38 son silvestres y 5, domesticadas o semidomesticadas: *Capsicum annuum* L., *Capsicum chinense* Jacq., *Capsicum frutescens* L., *Capsicum pubescens* Ruiz y Pav. y *Capsicum baccatum* L. (Barboza et al., 2021). Estos materiales presentan una amplia variabilidad de formas, colores, aromas, sabores y tamaños que contribuye a la alimentación y gastronomía del mundo desde épocas prehispánicas (Bosland & Votava, 2000).

En Colombia, esta agrobiodiversidad es custodiada por AGROSAVIA en el Banco de Germoplasma Vegetal y fue estudiada por el proyecto “Selección de materiales de *Capsicum* spp. con atributos diferenciales y ventajas competitivas agronómicas y agroindustriales”, financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) a través de la convocatoria de bioeconomía 903 de 2021, el cual representa una valiosa herramienta para el conocimiento de esta especie. En la investigación se contó con el apoyo de la Universidad Icesi y de los demás aliados del proyecto: Hugo Restrepo & Cía. S.A. y la Unidad Técnica para el Desarrollo Profesional (Utedé) de Buga.

La selección de los materiales sobresalientes se realizó a partir de características de interés para la agroindustria, entre las que se destacan las propiedades fisicoquímicas, el rendimiento, el comportamiento agronómico, las características morfológicas, la identidad genética, la percepción del consumidor, las perspectivas del mercado y la tolerancia e incidencia de plagas y enfermedades. La interacción de todos estos factores se refleja en mayor o menor medida en oportunidades de transformación de los frutos y en los costos de producción, por lo cual se hace indispensable seleccionar aquellos materiales que sobresalgan por representar mayor sostenibilidad en la cadena de valor del sistema productivo.

Por ello, a lo largo de los nueve capítulos que componen esta publicación, el lector encontrará un recorrido integral por las múltiples dimensiones que conforman el estudio y la aplicación del ají colombiano, abordadas desde perspectivas científicas, técnicas, culturales y agroindustriales.

El recorrido de este libro inicia en el capítulo I, el cual se centra en la conservación de los recursos genéticos del género *Capsicum*. Aquí se presentan la historia, la caracterización y la gestión de los principales bancos de germoplasma del país, resaltando la necesidad de contar con colecciones



Foto: Esteban Castaño Llanos

bien documentadas y accesibles para sustentar procesos de investigación, mejoramiento y aprovechamiento sostenible. Seguidamente, el capítulo II amplía la mirada hacia la diversidad genética, la evolución, la domesticación y las estrategias de mejoramiento genético del ají. Allí se ofrece un análisis de herramientas modernas como la genómica, la hibridación dirigida, el estudio de compuestos bioactivos y el uso de biotecnología, lo que permite visualizar aplicaciones de las ciencias “ómicas” en la agricultura moderna para la obtención de variedades con atributos nutricionales, funcionales y comerciales mejorados.

El trayecto continúa con el capítulo III, que presenta los resultados de la caracterización fenotípica de diversas accesiones del Banco de Germoplasma Vegetal. Desde el estadio de plántula hasta el fruto maduro, se examinan rasgos morfológicos clave para la selección de materiales con potencial en programas de mejoramiento y en el diseño de productos diferenciados. En el capítulo IV se compilan las prácticas agronómicas ejecutadas durante el desarrollo de las diferentes evaluaciones realizadas en los experimentos, es decir, se lleva a cabo una descripción técnica de la metodología empleada para el establecimiento en invernadero y el manejo de las accesiones de *Capsicum* spp. evaluadas.



El capítulo V introduce la dimensión fitosanitaria del cultivo al describir las principales plagas e insectos fitófagos asociados al ají en las condiciones de Colombia. Este conocimiento resulta vital para comprender el comportamiento de los materiales ante estas amenazas y para fortalecer estrategias de manejo integrado que disminuyan pérdidas productivas y reduzcan el uso de insumos químicos. Complementariamente, el capítulo VI se enfoca en las enfermedades que afectan el *Capsicum spp.* bajo condiciones protegidas, incluyendo aquellas causadas por hongos, bacterias y virus. La información recopilada permite identificar materiales con mayor tolerancia, así como diseñar esquemas de manejo sanitario más sostenibles, es decir, que reduzcan el uso de agroquímicos y favorezcan el manejo orgánico y ecológico de los cultivos, con el objetivo de sostener e incrementar su productividad.

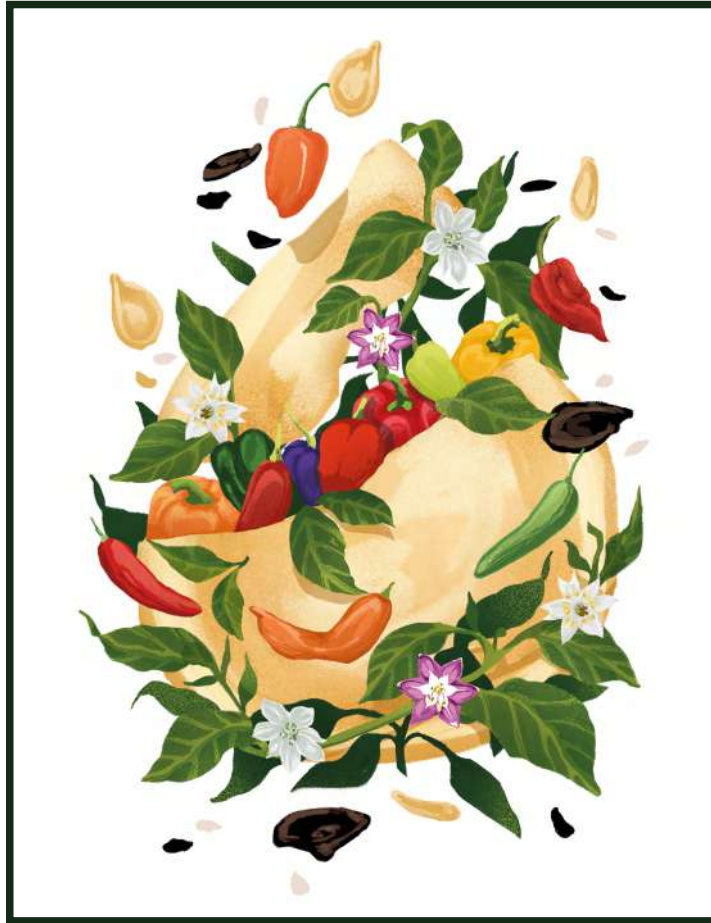
En el capítulo VII, la atención se dirige a los atributos fisicoquímicos y agroindustriales de los frutos provenientes del Banco de Germoplasma Vegetal. Se analiza la presencia de compuestos bioactivos, como capsaicinoides, carotenoides y flavonoides, fundamentales para identificar accesiones con valor funcional y aplicaciones en alimentos diferenciados o, incluso, en cosmética natural. El capítulo VIII, por su parte, explora las oportunidades de transformación del fruto del ají en Colombia, presentando casos de éxito, materiales con proyección de mercado y desarrollos industriales que trascienden el uso tradicional del ají como simple

picante. Aquí, la experiencia de la empresa Hugo Restrepo & Cía. ilustra cómo la articulación entre ciencia, industria e innovación puede generar productos con alto valor agregado. Finalmente, el capítulo IX aborda los costos de producción del cultivo en distintas condiciones agroecológicas, ofreciendo herramientas prácticas, como análisis de flujo de caja, evaluación financiera y comparación entre unidades productivas. Esta información resulta esencial para la toma de decisiones económicas en proyectos productivos rurales o empresariales.

En suma, la selección de materiales sobresalientes que aquí se presenta corresponde a un análisis integral que considera aspectos multidimensionales en la selección de materiales de interés, desde la producción hasta el mercado y el consumidor. Por ello esta obra representa un aporte significativo al uso estratégico de la agrobiodiversidad tropical, a la conservación de recursos fitogenéticos y al impulso de modelos agroindustriales bioeconómicos y sostenibles, con los cuales se espera contribuir al fortalecimiento de sistemas agroalimentarios más resilientes y a la generación de oportunidades para las comunidades rurales que cultivan y transforman el ají en Colombia.







Título de la obra

Recursos genéticos

Técnica

Ilustración digital con tableta, pincel en
textura de carboncillo

Autora

Laura Stefanny López Cortés (Sstefcore)



@sstefcore



Stefanny López

- Capítulo I -

Conservación de recursos genéticos del género *Capsicum*

Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza, Laura María Restrepo-Martínez, Jilberth Ferney Alzate-Castaño,
Luz Fanny Orozco-Orozco, Laura Beatriz Espitia-Negrete, Nancy Yohana Grisales-Vásquez,
Maria Yuli González González

En este capítulo se contextualiza de forma clara y concisa la conservación de las principales colecciones de *Capsicum* en Colombia y el mundo, se presentan los esfuerzos realizados para conocer los recursos genéticos disponibles y se exponen las posibilidades para su utilización y aprovechamiento, además de un breve análisis de la situación actual en Colombia. También se ofrece un breve contexto histórico sobre el origen de los principales bancos de germoplasma que conservan materiales de ají en el país, junto con la descripción botánica de la especie y de los principales grupos taxonómicos cultivados en el mundo con sus características

y valor cultural y económico. Los autores describen la principal materia prima para trabajar con ají y explican la riqueza genética disponible en Colombia, como primer paso para seleccionar materiales de interés con atributos diferenciales y de calidad para la agroindustria colombiana. Finalmente, se concluye que, a pesar de la gran diversidad de ajís conservados en el país, cada institución ha realizado esfuerzos de manera independiente y que Colombia no ha logrado articular las diferentes colecciones de ají hacia un propósito común, por lo que se recomienda fomentar el trabajo interinstitucional en la cadena del cultivo.



Introducción

La diversidad constituye la base de cualquier cultivo en el planeta, ya que en ella se encuentra la fuente de genes de resistencia a plagas y enfermedades, genes relacionados con la adaptación al cambio climático y algunos otros de interés de acuerdo con las características que demandan el mercado y los consumidores. Mayor diversidad significa que se posee mayor cantidad de opciones disponibles para la supervivencia o adaptación, no solo de la especie o el cultivo, sino también de quienes los usan, así como mayores son las posibilidades de utilización de los recursos disponibles. Por lo tanto, conocer la diversidad del género *Capsicum*, disponible en el Banco de Germoplasma Vegetal, permite hacer un gran avance en el desarrollo de la agroindustria de este sector de la economía. Por lo anterior, este libro inicia con un capítulo sobre la conservación de los recursos genéticos de *Capsicum*, con el fin de dar a conocer al lector el estado actual del punto de partida para la selección de materiales de ají en Colombia, es decir, la materia prima con la que cuenta el país.



Foto: Esteban Castaño Llanos



Importancia de la conservación de recursos genéticos y su uso

La conservación de los recursos genéticos se promueve en el mundo desde la mitad del siglo XX, cuando las variedades de alto desempeño comenzaron a remplazar a las variedades tradicionales, lo que incrementó el riesgo de erosión genética. Como respuesta, surgieron los bancos de germoplasma, que han desempeñado un papel fundamental en la colecta y conservación de recursos genéticos, lo cual garantiza la disponibilidad de diversidad genética para investigación y el mejoramiento genético (Pinheiro de Carvalho et al., 2013).

La disponibilidad de recursos genéticos destinados a los programas de mejoramiento es esencial para desarrollar nuevos cultivares que aborden los desafíos de la seguridad alimentaria, el cambio climático y la sostenibilidad (Ford et al., 2016; Ceccarelli & Grando, 2022; Muñoz-Amatriaín et al., 2014). La alta diversidad alélica preservada en los bancos de germoplasma, al proporcionar alelos que no existen en materiales élite, permite ampliar la base genética en los programas de fitomejoramiento. Además, esta diversidad incrementa la ganancia genética en estos programas.



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

El uso de los mencionados recursos es considerado un reto, debido a que depende de la disponibilidad de información acerca de caracterizaciones fenotípicas y genotípicas, lo cual es costoso en tiempo y recursos económicos. Hace alrededor de 50 años se evidenció la necesidad de identificar variabilidad genética útil, lo que llevó a realizar la selección de accesiones con base en información generada a partir de evaluaciones sistemáticas para incrementar el uso de los recursos genéticos. Como respuesta a esta necesidad se ha promovido la evaluación de las colecciones núcleo, que contienen un bajo número de accesiones, lo que representa una alta variabilidad de la colección base.

Por otro lado, la caracterización con marcadores moleculares y los análisis de genética de poblaciones han permitido identificar duplicados y direccionar nuevas colectas e intercambio de germoplasma teniendo en cuenta la representatividad de las colecciones (Muñoz-Amatriáin et al., 2014). Sin embargo, actualmente, investigadores, mejoradores y curadores continúan advirtiendo sobre la baja disponibilidad de información fenotípica y resaltando que esta información es indispensable para que los fitomejoradores seleccionen los parentales o el material genético base, de acuerdo con características sobresa-

lientes de los genotipos conservados en los bancos de germoplasma (Pinheiro de Carvalho et al., 2013).

Como insumos para superar la baja disponibilidad de información fenotípica y, por ende, potenciar el uso de los recursos genéticos, se propone recurrir a los datos históricos, la predicción genómica, el análisis de asociación del genoma completo y la reutilización de información.

Los datos históricos de variables de interés agronómico son colectados como parte de la rutina en los bancos de germoplasma. Esta información no suele estar disponible debido a que es almacenada en planillas físicas o en archivos de Excel. Una característica en los conjuntos de datos es el desbalance debido a la dificultad de evaluar todas las accesiones simultáneamente (Pinheiro de Carvalho et al., 2013). Por este motivo, el análisis estadístico se lleva a cabo usando modelos mixtos (Bernardo, 1996). Así mismo, la rutina de análisis incluye la evaluación de la calidad de los datos, que es determinante e interfiere negativamente en parámetros como la heredabilidad y la habilidad de predicción (Estaghevrou et al., 2014; Bernal-Vásquez et al., 2016; González et al., 2018; Philip et al., 2018).



La predicción genómica y el análisis de asociación del genoma completo son metodologías recomendadas para generar información que facilite el uso de los recursos genéticos (Yu et al., 2016; Milner et al., 2019; González et al., 2021; Muñoz-Amatriaín et al., 2014). Estas herramientas permiten estimar el comportamiento de todas las accesiones de una colección, con el fin de ajustar modelos que requieren datos fenotípicos de una porción de la colección y la caracterización genotípica de la colección completa.

La reutilización de la información es uno de los principios base para mejorar la eficiencia en el uso de recursos genéticos; consiste en el manejo de datos bajo parámetros estandarizados que garanticen la reutilización de estos haciendo uso de los repositorios públicos de datos y los principios FAIR (*findable, accessible, interoperable, reusable*) para garantizar que los datos sean fáciles de encontrar, accesibles, interoperables y reutilizables (Wilkinson et al., 2016). La información disponible siguiendo los principios FAIR permitirá que los bancos de germoplasma, además de incrementar y utilizar su propia información, puedan usar información de otros bancos.



Descripción y origen del género *Capsicum*

El género *Capsicum*, perteneciente a la familia *Solanaceae*, es originario del continente americano, con distribución natural desde el sur de los Estados Unidos hasta Argentina, abarcando regiones como Bolivia, Perú, Brasil, el sur de México y Colombia (Arias & Melgarejo, 2000). Comprende aproximadamente 43 especies, de las cuales 5 han sido domesticadas y dado origen a numerosos cultivares de gran importancia económica: *Capsicum chinense*, *Capsicum baccatum*, *Capsicum annuum*, *Capsicum frutescens* y *Capsicum pubescens*.

Estas especies se distinguen por su alta diversidad fenotípica y genotípica, lo que ha dificultado su clasificación exacta y homogénea; sin embargo, características como las morfológicas, físicas y organolépticas permiten acercarse a su

identificación. Por ejemplo, *C. annuum*, especie de amplia distribución, se caracteriza por tener frutos de diversas formas, colores y sabores; *C. baccatum*, cultivada principalmente en Perú y Bolivia, destaca por su aroma, flores amarillas o blanco-amarillas con manchas amarillas o verduzcas hacia la parte basal de los pétalos; *C. chinense*, originaria de la Amazonia, es conocida por su alto contenido de capsaicinoides y por presentar múltiples flores por nudo; *C. frutescens*, distribuida en América, Oceanía y Asia, es una fuente de resistencia a virus, y *C. pubescens*, cultivada a lo largo de la cordillera de los Andes (principalmente en Perú), se distingue por sus semillas negras y flores moradas con base blanca (Costa de Carvalho et al., 2003; Barchenger & Khoury, 2022).



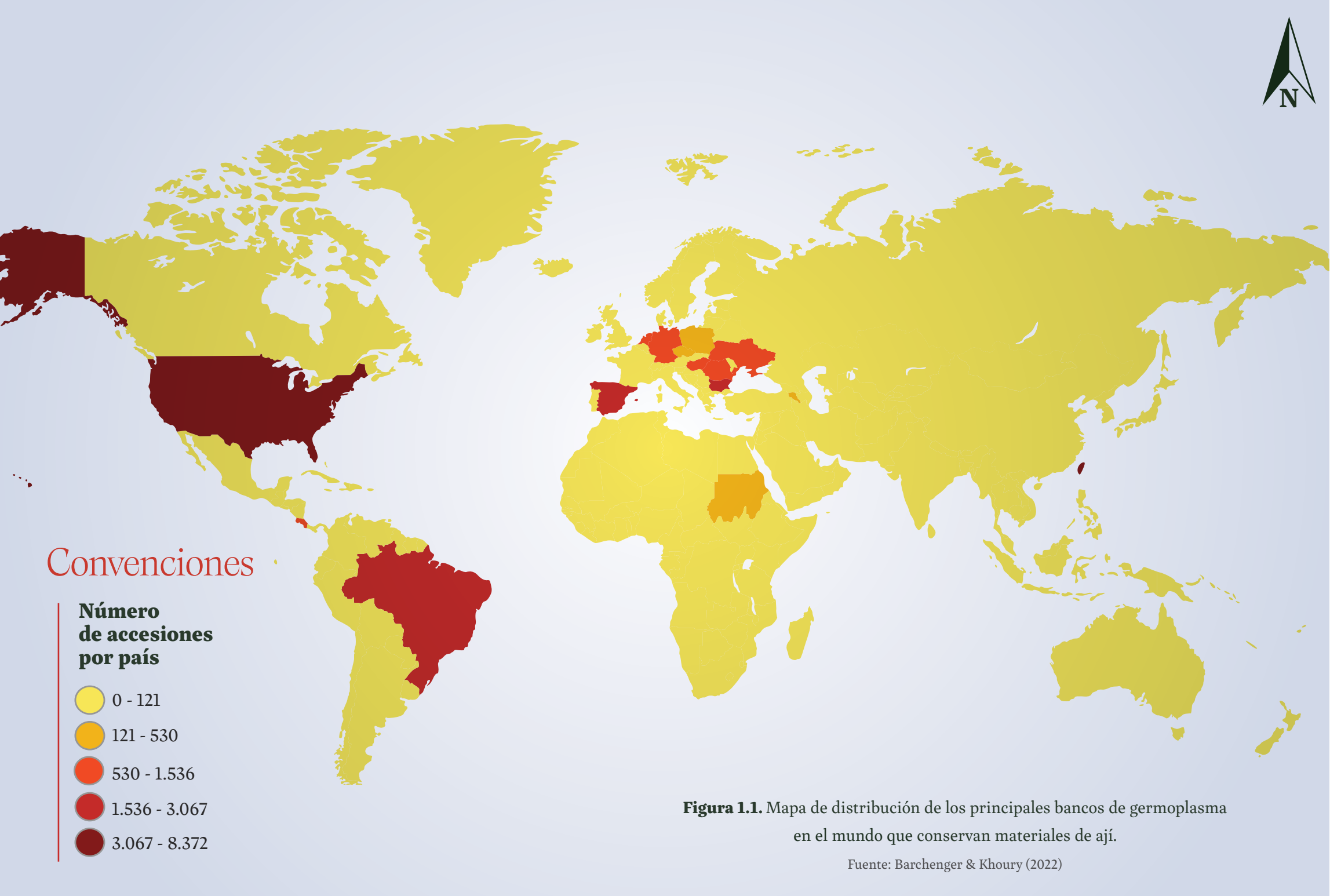
Foto: Esteban Castaño Llanos



Principales colecciones internacionales de Capsicum

El banco de germoplasma más importante del mundo para la conservación de *Capsicum* es el World Vegetable Center (WorldVeg), ubicado en Taiwán; en segundo lugar se encuentra la Unidad de Conservación de Recursos Genéticos Vegetales en la Estación Regional de Introducción de Plantas del Sur, del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), ubicada en Georgia, y en tercer lugar, el Seed Savers Exchange (SSE), localizado en Iowa (Estados Unidos) (Barchenger & Khoury, 2022).

En la figura 1.1 se detallan los bancos de germoplasma formalizados ante el sistema Genesys, una plataforma internacional diseñada para reportar las colecciones de recursos genéticos. Sin embargo, no todos los bancos de germoplasma están relacionados en este sistema. Como se puede observar, los países relacionados son europeos, seguidos por países de Oriente Medio. Por su parte, en el continente americano, los únicos bancos de germoplasma registrados en la plataforma son de Estados Unidos, Brasil y Costa Rica. No obstante, el género *Capsicum* es nativo del continente americano, y algunos de los países con mayor diversidad de especies del género, como México, Perú, Bolivia, Argentina, Ecuador y Colombia, no están referenciados en el listado, lo que hace necesario acudir a otros sistemas de documentación para la conservación de recursos genéticos, como lo son el GRIN Global y el Global Biodiversity Information Facility (GBIF).



Historia de la conformación de los principales bancos de germoplasma de *Capsicum* en Colombia e investigaciones relacionadas

AGROSAVIA - Bancos de Germoplasma Vegetal para la Alimentación y la Agricultura de la Nación Colombiana

En Colombia, las colectas de especies con potencial agrícola iniciaron en 1942, con el propósito de crear colecciones de trabajo que permitieran a los mejoradores del país desarrollar nuevos cruces y obtener variedades mejoradas. Entre 1962 y 1994, estas colecciones estuvieron bajo la administración del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). En 1994, con la creación de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica, ahora AGROSAVIA), se estableció el Sistema Nacional de Bancos de Germoplasma de la Nación Colombiana (SNBGNC), tomando como base las colecciones de trabajo existentes bajo la responsabilidad legal del ICA, quien delegó hasta 2018 esta responsabilidad en AGROSAVIA a través de convenios de cooperación técnica y científica. Desde entonces, la administración del Banco de Germoplasma Vegetal pasó a estar a cargo de AGROSAVIA, con lo que se consolidó su papel en la conservación y gestión de los recursos genéticos del país, gracias a la Ley 1876 de 2017, que creó el Sistema Nacional de Innovación Agropecuaria (SNIA).

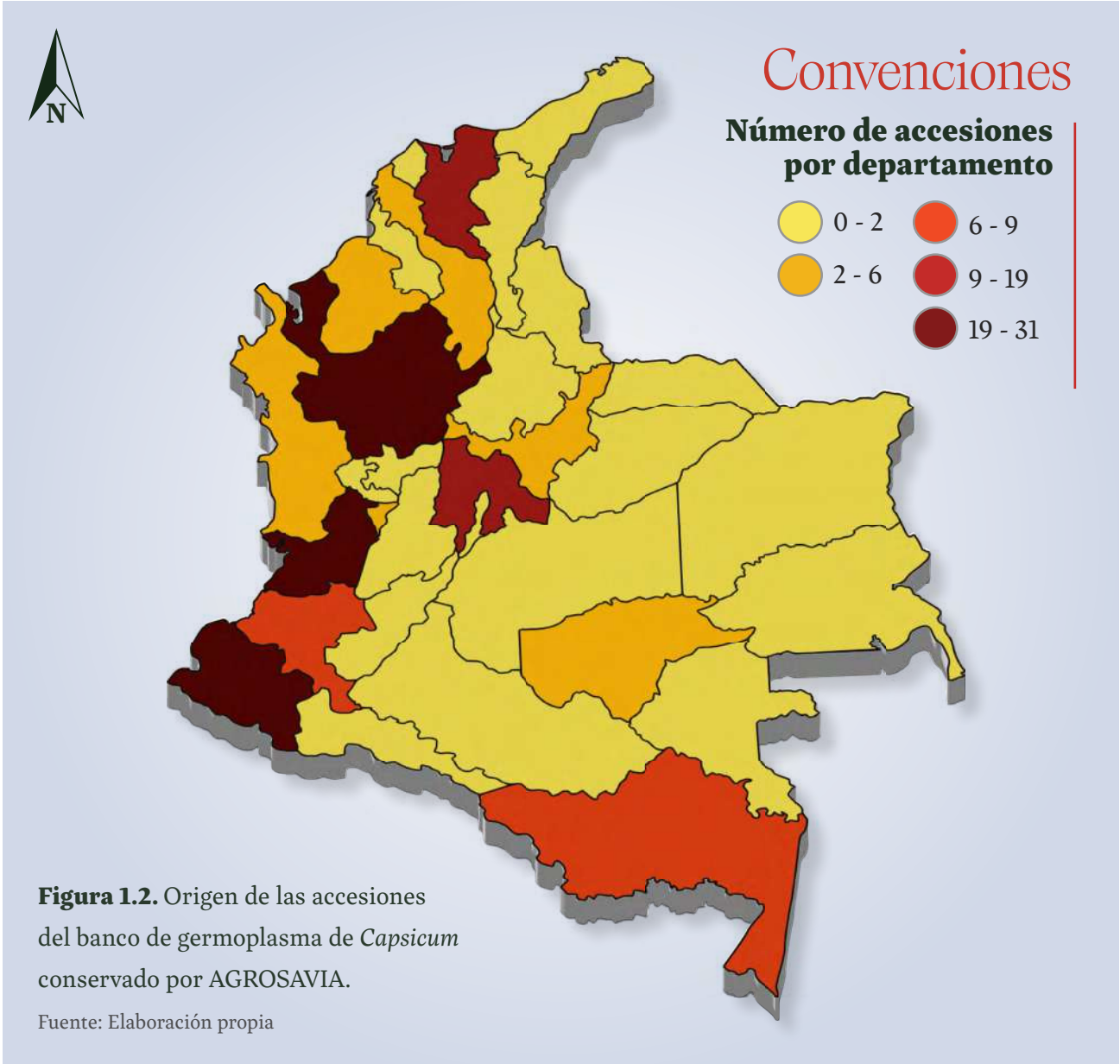
La conformación y el origen del banco de germoplasma de *Capsicum* de Colombia ha contado con la colaboración de entidades como el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira y jardines botánicos como los de Nijmegen (Países Bajos) y Bayreuth (Alemania), entre otras.

Las primeras colectas de ají en Colombia fueron realizadas por el ICA en 1976. Se incrementaron más tarde con la colecta hecha por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por su sigla en inglés) y el Ministerio de Agricultura en 1982, liderada por Juan Jaramillo y Miguel Holle. Posteriormente, la colección se aumentó con el envío de materiales tropicales colectados por Rubén Villareal, investigador del Asian Vegetable Research and Development Center (AVRDC, hoy conocido como World Vegetable Center). La colección fue trasladada al C. I. La Selva de AGROSAVIA, en Rionegro (Antioquia), cuando la investigación en ají pasó del ICA al naciente Corpoica en 1994. En esos primeros esfuerzos se colectaron como nativos materiales de *C. annuum*, *C. frutescens*, *C. pubescens* y *C. chinense* (J. Jaramillo, comunicación personal, 2025).



Las colectas se han realizado en diferentes departamentos del país, como Antioquia, Nariño, Amazonas, Risaralda, Córdoba, Valle del Cauca, Magdalena, Quindío, Cundinamarca, Caldas, Boyacá, Cesar, La Guajira, Santander, Guaviare, Caquetá, Chocó, Cauca y Tolima (figuras 1.2 y 1.3). Gracias a estas colectas, se

ha logrado preservar una amplia diversidad de materiales, incluyendo especies silvestres, variedades domesticadas, semidomesticadas y algunas mejoradas. Sin embargo, gran parte de los materiales obtenidos en mercados municipales carecen de información precisa sobre sus orígenes primarios.





Convenciones

Número de accesiones por especie del género *Capsicum* por departamento de origen (colecta o donación)



-  *C. annuum* var. *annuum*
-  *C. annuum* var. *glabriusculum*
-  *C. annuum*
-  *C. baccatum*
-  *C. baccatum* var. *pendulum*
-  *C. chinense*
-  *C. frutescens*
-  *C. pubescens*
-  *C. spp.*

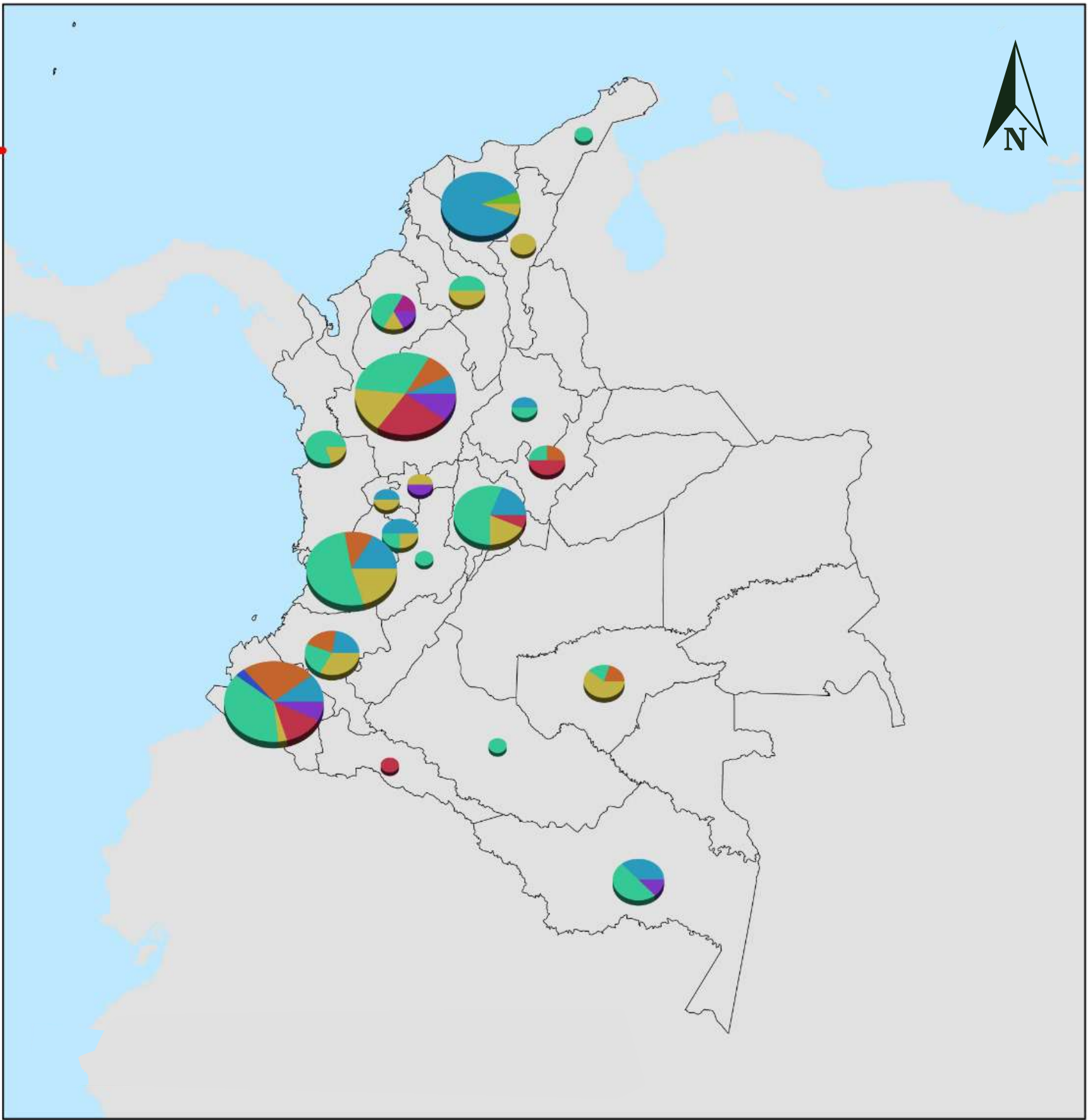


Figura 1.3. Conformación del banco de germoplasma de *Capsicum* de Colombia conservado por AGROSAVIA. Clasificación por especies o grupos taxonómicos de acuerdo con el departamento de procedencia.
Fuente: Elaboración propia

Estas colecciones deben proporcionar a los mejoradores una amplia gama de variantes genéticas que les permitan hacer frente a los desafíos emergentes en los sistemas agroindustriales. Para lograrlo, resulta fundamental conocer las características del germoplasma conservado, como lo indican Peñaloza et al. (2010). La caracterización implica la descripción detallada de las variedades presentes en una colección de germoplasma, centrándose en rasgos morfológicos y fenológicos altamente heredables.

A nivel internacional, el banco también ha incorporado accesiones obtenidas en mercados de diversos países, como Guatemala, México, Costa Rica, Perú, Bolivia, Brasil, Ecuador, Estados Unidos, Zambia, España, Venezuela, Alemania y Países Bajos. Adicionalmente, se han recibido donaciones de instituciones como los jardines botánicos de Nijmegen y Bayreuth, lo que ha enriquecido significativamente la diversidad genética y remarca su importancia global (figura 1.4).



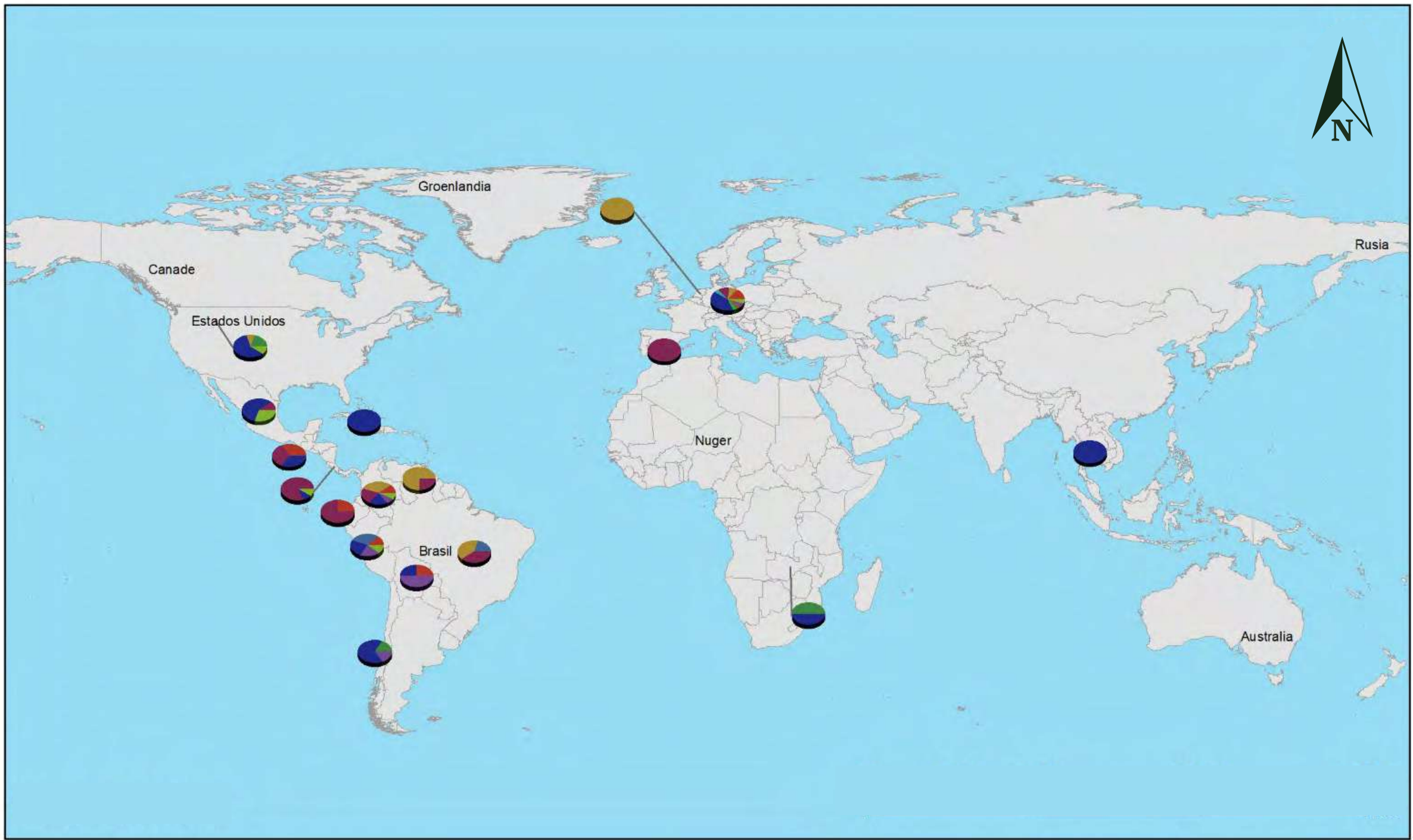


Figura 1.4. Conformación del banco de germoplasma de *Capsicum* de Colombia conservado por AGROSAVIA. Clasificación por especies o grupos taxonómicos de acuerdo con el país de procedencia.
Fuente: Elaboración propia

La colección de germoplasma del género conserva los principales grupos taxonómicos domesticados, tales como *C. annuum*, *C. baccatum*, *C. chinense*, *C. frutescens* y *C. pubescens*, y especies silvestres como *Capsicum praetermissum*, *Capsicum abbreviatum* y *Capsicum flexuosum*.

A la fecha, se desconoce cuáles de estos materiales pueden considerarse de origen colombiano y clasificarse como locales. No obstante, se ha identificado que algunas accesiones presentan características similares a las de aquellas variedades tradicionalmente utilizadas por comunidades amazónicas, como los ajís tipo habanero (*C. chinense*). Uno de los objetivos clave de este trabajo ha sido la identificación de aquellos materiales que podrían tener un carácter local, lo que contribuye al conocimiento y preservación del patrimonio genético del país. En este sentido, el valor de las colecciones de germoplasma radica no solo en su conservación, sino también en su potencial para el desarrollo de nuevos cultivares que beneficien y fomenten las actividades productivas.

Convenciones Número de accesiones por especie del género *Capsicum* por país de origen (colecta o donación)

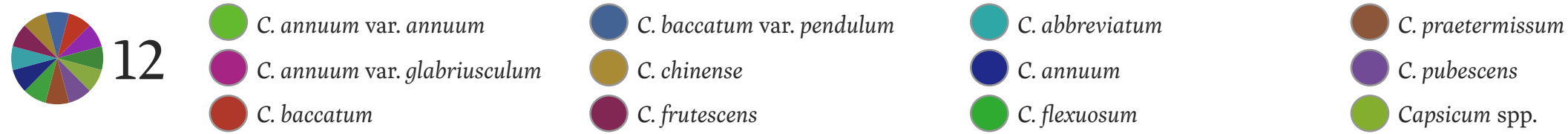




Foto: Esteban Castaño Llanos

La conservación del *Capsicum* en AGROSAVIA se realiza de manera *ex situ* a través de semilla sexual, ya que la especie posee semillas ortodoxas o tolerantes a la desecación. El banco de germoplasma de *Capsicum* es almacenado en el C. I. La Selva a 2.120 m s. n. m. y posee cerca de 338 accesiones. Este banco es activo, por lo cual las semillas son conservadas en un cuarto frío a -10 ± 3 °C, sin embargo, una copia de las accesiones es conservada a -20 ± 3 °C en el banco base, que se ubica en el C. I. Tibaitatá de AGROSAVIA, en Mosquera, Cundinamarca.

Entre los trabajos que se han realizado en AGROSAVIA se destacan los realizados por Medina et al. (2006), quienes caracterizaron 111 accesiones pertenecientes al banco de germoplasma y encontraron un amplio polimorfismo genético y morfológico del género. También se cuenta con los trabajos realizados por Villota-Cerón et al. (2012), quienes caracterizaron 68 accesiones y encontraron que las variables de flor, fruto y arquitectura de planta explicaron la variabilidad existente y reportaron la cercanía filogenética

entre las especies *C. annuum*, *C. chinense* y *C. frutescens*, lo que se conoce como el complejo *annuum*.

Es importante señalar que AGROSAVIA ha realizado diferentes ciclos de caracterización morfológica en el banco de germoplasma de *Capsicum* durante los ciclos de regeneración de las semillas conservadas. Entre estos se destacan las caracterizaciones realizadas en los años 1994, 2004 (Medina et al., 2006) y 2012.

En la figura 1.5 se muestra el esquema del programa de premejoramiento y las perspectivas que se dejan como base para el programa de fitomejoramiento que actualmente está desarrollando AGROSAVIA. El foco de este programa se centra en el aprovechamiento de la diversidad genética como insumo para el desarrollo de variedades para la industria que procesa pasta de ají. Esta industria requiere variedades con frutos de diferentes colores, niveles de capsaicina, diversidad de colores en la pasta, con altos rendimientos y adaptadas a las condiciones agroclimáticas de las zonas productivas de Colombia.

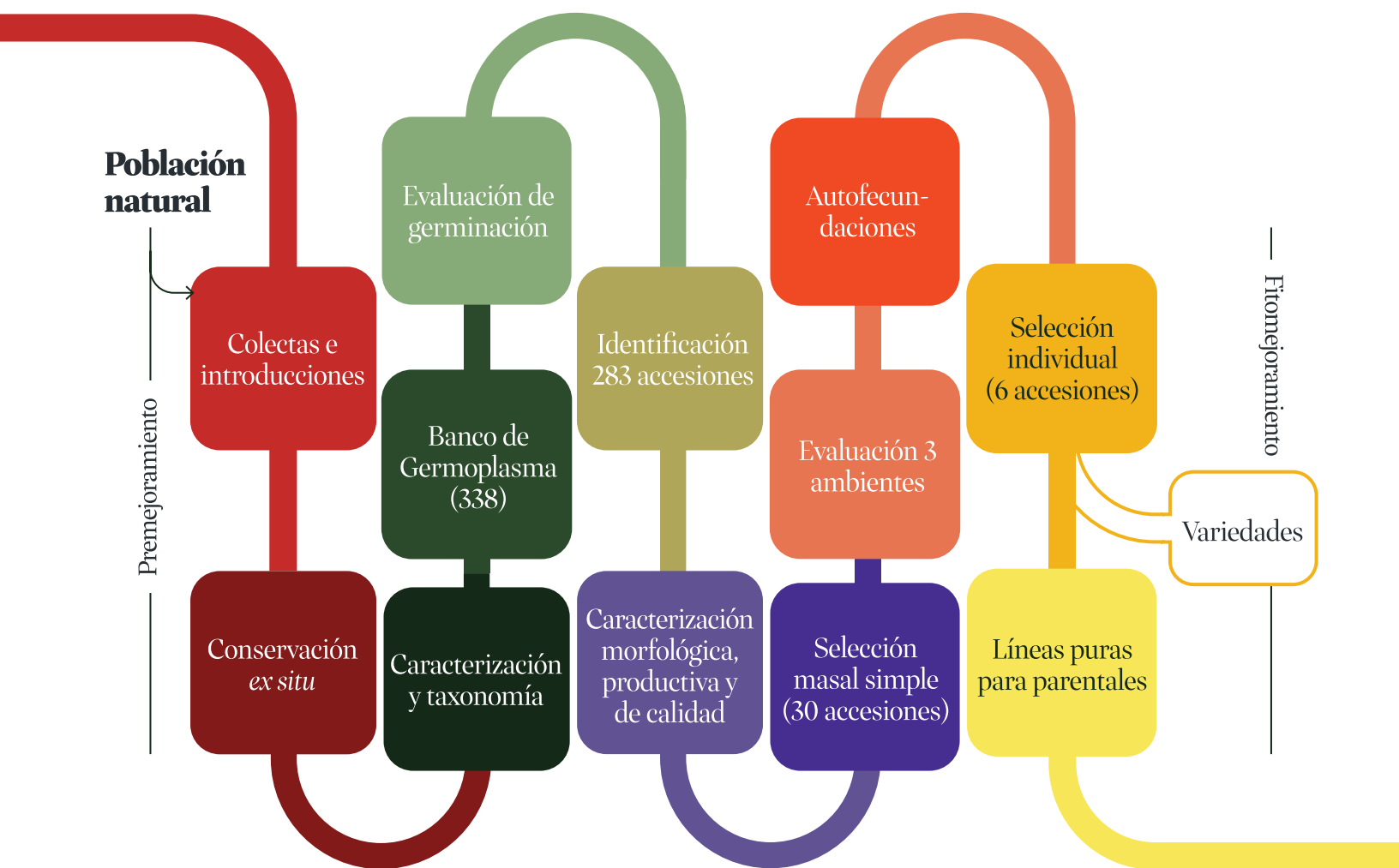


Figura 1.5. Esquema de premejoramiento en *Capsicum* desarrollado por AGROSAVIA.

Fuente: Elaboración propia

En el marco del proyecto, entre 2022 y 2024, en el C. I. La Selva se realizó la caracterización morfológica, genética y de calidad en poscosecha de 283 accesiones pertenecientes a la colección de *Capsicum*. A partir de estos análisis se identificaron 30 accesiones promisorias y la semilla sexual se obtuvo mediante autofecundaciones controladas (para cada ciclo de selección). Las progenies fueron establecidas en tres localidades (Rionegro [Antioquia],

Palmira [Valle] y Timbío [Cauca]) para evaluar su rendimiento y respuesta a plagas y enfermedades. Como resultado de estas evaluaciones fueron seleccionados seis genotipos con mejor adaptación a cada localidad. Posteriormente, en 2025, el rendimiento de estos genotipos se evaluó en cuatro sitios: Rionegro y Campamento (Antioquia), así como en Palmira y Buga (Valle del Cauca). Con base en los resultados obtenidos, entre uno y tres genotipos

promisarios serán seleccionados para continuar en ciclos de evaluación y ser utilizados como variedades comerciales o parentales en el programa de mejoramiento genético en ají de AGROSAVIA.

Universidad Nacional de Colombia (sede Palmira)

La colección de ajís de la Universidad Nacional de Colombia fue formada en 1985, y a partir de ese año se llevaron a cabo misiones de colecta e intercambios con diversas instituciones, lo que permitió la incorporación de material vegetal proveniente de Brasil, México, Costa Rica y Colombia. Como resultado de esta labor, la colección alcanzó un total de 770 introducciones, las cuales fueron establecidas en Palmira (Pardey Rodríguez, 2008).

A través de su programa de investigación “Mejoramiento genético, agronomía y producción de semillas de hortalizas”, la Universidad Nacional ha realizado la colecta, conservación, caracterización y uso de la colección de *Capsicum* spp., compuesta por 720 accesiones (Palacios Castro & García Dávila, 2008). Estas colectas se han realizado en diversas regiones en Colombia, desde la Amazonia hasta la Costa Caribe. La colección ha sido empleada en proyectos de caracterización y mejoramiento genético, enfocándose en la búsqueda de germoplasma con características agronómicas deseables, tales como alta producción, alto contenido de capsaicina y resistencia a *Fusarium* spp., *Phytophthora*

capsici y al virus del mosaico deformante del pimentón (PepDMV, por su sigla en inglés), principalmente, con el fin de obtener variedades mejoradas (Universidad Nacional de Colombia, 2024a, 2024b).

La colección ha sido caracterizada utilizando descriptores que permiten identificar accesiones con potencial en cuanto a producción, arquitectura de planta y rasgos fisicoquímicos deseables. Dentro de los estudios se encuentra la caracterización morfológica de 93 accesiones procedentes de 11 países (Bolivia, Brasil, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, Guatemala, Guyana, México, Perú y El Salvador) y cuatro especies (*C. annuum*, *C. baccatum*, *C. frutescens* y *C. chinense*). Los resultados revelaron una alta variabilidad en los rasgos relacionados con la arquitectura de planta, las estructuras reproductivas y la producción. Este trabajo permitió identificar agrupaciones de accesiones según su lugar de origen, pero no permitió observar agrupación clara por especie (Palacios Castro & García Dávila, 2008).

Pardey et al. (2006) y Pardey Rodríguez (2008) realizaron la caracterización fenotípica y molecular, así como la evaluación de rendimiento de 100 accesiones. Las variables de fruto, flores y forma de la planta representaron una mayor proporción de la variabilidad encontrada y también se identificaron materiales más promisorios respecto a los comerciales.

Por otro lado, en la caracterización de 100 accesiones tomadas al azar de esta colección, los resultados mostraron una correlación negativa entre el contenido de capsaicina y el rendimiento, así como entre el número de frutos y el peso de estos. El trabajo permitió además observar alta variabilidad en las variables producción, número y peso de frutos, tanto entre como dentro de las especies en *C. annuum*, *C. frutescens* y *C. chinense*. La variabilidad observada en el género fue atribuida a características del fruto. Los resultados obtenidos permitieron concluir que en este banco existen accesiones con rasgos atractivos para las industrias alimentaria y farmacéutica, y resaltan las accesiones promisorias para mejorar el contenido de capsaicina (Pardey Rodríguez, 2008; Pardey Rodríguez et al., 2009).

También se realizó la caracterización de 21 accesiones usando 50 descriptores morfológicos del International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI). Las evaluaciones permitieron identificar accesiones de importancia económica a utilizar en la producción de materiales mejorados. Sin embargo, no permitieron diferenciar entre especies (Muñoz, 2016). La colección, además, se ha utilizado en estudios para evaluar *loci* con potencial para diferenciar entre las especies *C. annuum*, *C. chinense*, *C. frutescens* y *C. pubescens* (Vallejo et al., 2012).

La respuesta a enfermedades en esta colección ha sido ampliamente estudiada con el fin de encontrar alelos para la producción de variedades que permitan

responder a los principales problemas fitosanitarios del cultivo. De ahí que se haya realizado la evaluación de la respuesta al PepDMV, con lo que se identificaron 13 accesiones con resistencia a este virus. Además, se ha evidenciado la importancia de los efectos aditivos en la herencia de la resistencia a PepDMV (Pardey Rodríguez, 2008; Pardey Rodríguez et al., 2009).

De esta colección fueron evaluadas 120 accesiones por su respuesta a inoculaciones de *P. capsici* en condiciones de invernadero, de manera que se encontraron 9 accesiones altamente resistentes al patógeno (Hurtado Tenorio, 2010). En un trabajo posterior, se evaluó la resistencia a *P. capsici* (Leonian) y *Fusarium* spp. en 30 accesiones. Como resultado, se identificaron 5 accesiones resistentes a *P. capsici* y 9 a *Fusarium* spp., sumadas a algunas accesiones que presentaron resistencia a ambos patógenos. Cabe resaltar que las plantas resistentes mostraron menores niveles de capsaicina, lo cual se corroboró mediante correlaciones negativas entre las variables (Cardona Arce, 2013).

Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi

Melgarejo et al. (2004) caracterizaron 377 accesiones de *Capsicum* colectadas en la región amazónica colombiana, y hallaron una amplia variabilidad en la colección, sin embargo, el estudio no permitió distinguir características específicas del complejo *annuum*. Estos estudios realizaron caracterizaciones morfológicas a partir de descrip-



tores del IPGRI, caracterizaciones bioquímicas por isoenzimas, y moleculares por polimorfismos en la longitud de fragmentos amplificados (AFLP, por su sigla en inglés), además de estudios fisiológicos a las semillas y etnobotánicos asociados a los materiales colectados (Melgarejo et al., 2004).

La conservación de los recursos genéticos es un pilar fundamental para la sostenibilidad y el desarrollo del mejoramiento genético del ají (*Capsicum* spp.) en Colombia. A lo largo de los años, los bancos de germoplasma han permitido preservar la variabilidad genética de este cultivo para asegurar la disponibilidad de material vegetal con características de interés agronómico, industrial y adaptativo. Sin embargo, para que esta diversidad sea aprovechada

en programas de mejoramiento, es esencial caracterizar fenotípica y genéticamente las accesiones conservadas. En este contexto, el premejoramiento juega un papel clave, ya que permite evaluar y seleccionar materiales con atributos favorables, que respondan a los requerimientos de la industria. En Colombia, instituciones como AGROSAVIA, la Universidad Nacional de Colombia y el Instituto Sinchi han avanzado en la caracterización de colecciones de *Capsicum* spp., con lo que han identificado accesiones promisorias para su incorporación en programas de fitomejoramiento. Este conocimiento es la base para el desarrollo de nuevas variedades con mejor rendimiento, resistencia y calidad, para promover así un uso eficiente y sostenible de la biodiversidad del ají en el país.



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Reflexión

"Usamos lo que conocemos: lo que no se conoce no se usa, lo que no se usa se pierde".

Mario Lobo Arias

Los trabajos de premejoramiento en Colombia han tenido como fin ampliar el conocimiento de la diversidad presente en los bancos de germoplasma y realizar una correcta conservación; se han enfocado en la caracterización morfológica, bioquímica y molecular, además de la evaluación agronómica de las colecciones de trabajo que tienen las instituciones que las conservan (AGROSAVIA, la Universidad Nacional y el Instituto Sinchi). Un común denominador de estos trabajos es la demostración de la amplia variabilidad genética del género, además de la dificultad en diferenciar entre las especies *C. frutescens*, *C. chinense* y *C. annum*.

El conocimiento que se genera sobre el germoplasma disponible es fundamental para realizar un mayor uso y aprovechamiento de los genotipos. Este conocimiento, actualizado de manera continua, permite el desarrollo de variedades más productivas, con resistencia a las principales limitantes fitosanitarias, adaptadas a las condiciones climáticas cada vez más variables y con diferentes atributos de calidad poscosecha, para contar con diversidad de usos en la industria.

Una de las principales conclusiones de este capítulo resalta la importancia de articular los esfuerzos que realizan las instituciones que conservan materiales de germoplasma de *Capsicum* en Colombia, con el propósito de integrar los resultados obtenidos y optimizar la información y los recursos para impactar con mayor eficiencia y a menor costo de oportunidad la cadena de valor del sistema productivo, lo cual se verá reflejado en la calidad de vida de productores, consumidores y transformadores. Adicionalmente, esta articulación permitiría identificar particularidades de interés en las diferentes accesiones y evaluar su comportamiento de acuerdo con las necesidades productivas, culturales y alimentarias propias de cada región y departamento. Una estrategia clave para lograrlo podría ser el intercambio coordinado de material vegetal y la homologación de metodologías, de manera que las colecciones puedan estudiarse de forma conjunta o complementaria. Así, se favorecería el conocimiento recíproco entre instituciones, lo que permitiría que cada una reconociera los recursos genéticos conservados en el país y al servicio de los propósitos nacionales.

Finalmente, se reconoce la importancia de definir líneas de investigación que respondan a intereses comunes y que contribuyan a generar un impacto positivo en los productores. Esto implica considerar las propiedades y requerimientos compartidos entre regiones o departamentos, con el propósito de unificar criterios de evaluación y selección de los materiales existentes a nivel nacional, para fortalecer así su aprovechamiento y la transferencia de beneficios directos al sector productivo.



Referencias

- Arias, J., & Melgarejo, L. M. (2000). *Ají: historia, diversidad y usos*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi; Minambiente; Colciencias.
- Barchenger, D. W., & Khoury, C. K. (2022). *Global strategy for the conservation and use of Capsicum genetic resources*. Global Crop Diversity Trust. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8367264>
- Bernal-Vásquez, A. M., Utz, H. F., Piepho, H. P. (2016). Outlier detection methods for generalized lattices: a case study on the transition from ANOVA to REML. *Theoretical and Applied Genetics*, 129, 787-804. <https://doi.org/10.1007/s00122-016-2666-6>
- Bernardo, R. (1996). Best linear unbiased prediction of maize singlecross performance. *Crop Science*, 36(1), 50-56. <https://doi.org/10.2135/cropsci1996.0011183X003600010009x>
- Cardona Arce, J. (2013). *Evaluación de genotipos de ajíes ('Capsicum' spp.) resistentes a pudriciones radicales causadas por 'Fusarium' sp y 'Phytophthora capsici'* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio UN. <https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/58f49ca7-7d44-4765-9f96-565da0a0150c/content>
- Ceccarelli, S., & Grando, S. (2022). Return to agrobiodiversity: participatory plant breeding. *Diversity*, 14(2), 126. <https://doi.org/10.3390/d14020126>
- Costa de Carvalho, S. I., de Ben Bianchetti, L., Goulart Bustamante, P., & Barbosa da Silva, D. (2003). *Catálogo de germoplasma de pimentas e pimentões (Capsicum spp.) da Embrapa Hortaliças*. Embrapa Hortaliças. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/774690/1/Catalogo-de-Germoplasma2.pdf>
- Estaghvirou, S. B. O., Ogutu, J. O., Piepho, H. P. (2014). Influence of outliers on accuracy estimation in genomic prediction in plant breeding. *G3: Genes, Genomes, Genetics*, 4, 2317-2328. <https://doi.org/10.1534/g3.114.011957>
- Ford, B., Deng, W., Clausen, J., Oliver, S., Boden, S., Hemming, M., & Trevaskis, B. (2016). Barley (*Hordeum vulgare*) circadian clock genes can respond rapidly to temperature in an early flowering 3-dependet manner. *Journal of Experimental Botany*, 67(18), 5517-5528. <https://doi.org/10.1093/jxb/erw317>
- González, M. Y., Philipp, N., Schulthess, A. W., Weise, S., Zhao, Y., Börner, A., Oppermann, M., Graner, A., Reif, J. C. (2018). Unlocking historical phenotypic data from an *ex situ* collection to enhance the informed utilization of genetic resources of barley (*Hordeum* sp.). *Theoretical and Applied Genetics*, 131(9), 2009-2019. <https://doi.org/10.1007/s00122-018-3129-z>
- González, M. Y., Zhao, Y., Jiang, Y., Stein, N., Habekuss, A., Reif, J. C., Schulthess, A. W. (2021). Genomic prediction models trained with historical records enable populating the German *ex situ* genebank bio-digital resource center of barley (*Hordeum* sp.) with information on resistances to soilborne barley mosaic viruses. *Theoretical and Applied Genetics*, 134, 2181-2196. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03815-0>
- Hurtado Tenorio, I. (2010). *Búsqueda de resistencia a 'Phytophthora capsici' Leonian en germoplasma de 'Capsicum' spp.* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira]. Repositorio UN. <https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/04c8b8bf-3383-4b88-8628-d94d82501f79/content>

- Medina, C. I., Lobo, M., & Gómez, A. F. (2006). Variabilidad fenotípica en poblaciones de ají y pimentón de la colección colombiana del género *Capsicum*. *Revista Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 7(2), 25-39. <https://www.redalyc.org/pdf/4499/449945021004.pdf>
- Melgarejo, L. M., Hernández, M. S., Barrera, J. A., Bardales, X. (Eds.) (2004). *Caracterización y usos potenciales del banco de germoplasma de ají amazónico* (pp. 11-12). Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi; Universidad Nacional de Colombia. https://sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/LIBRO_AJIWEB.pdf
- Milner, S. G., Jost, M., Taketa, S., Mazón, E.R., Himmelbach, A., Oppermann, M., Weise, S., Knüpffer, H., Basterrechea, M., König, P., Schüller, D., Sharma, R., Pasam, R. K., Rutten, T., Guo, G., Xu, D., Zhang, J., Herren, G., Müller, T., Krattinger, S. G., ... Stein, N. (2019). Genebank genomics highlights the diversity of a global barley collection. *Nature Genetics*, 51(2), 319-326. <https://doi.org/10.1038/s41588-018-0266-x>
- Muñoz, M. M. (2016). *Caracterización morfológica de 21 accesiones de 'Capsicum' spp. del banco de germoplasma de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira* [Tesis de Maestría]. Repositorio UN. <https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/b109ef89-61ce-45dc-82fc-04f7ec1dbfc5/content>
- Muñoz-Amatriáin, M., Cuesta-Marcos, A., Endelman, J. B., Comadran, J., Bonman, J. M., Bockelman, H. E., Chao, S., Russell, J., Waugh, R., Hayes, P. M., & Muehlbauer, G. J. (2014). The USDA barley core collection: genetic diversity, population structure, and potential for genome-wide association studies. *PloS One*, 9(4), e94688. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094688>
- Palacios Castro, S., & García Dávila, M. A. (2008). Caracterización morfológica de 93 accesiones de *Capsicum* spp. del banco de germoplasma de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Palmira. *Acta Agronómica*, 57(4), 247-252. <https://www.redalyc.org/pdf/1699/169914224005.pdf>
- Pardey R., C., García D., M. A., Vallejo, C., & Franco, A. (2006). Caracterización morfológica de cien introducciones de *Capsicum* del Banco de Germoplasma de la Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira. *Acta Agronómica*, 55(3), 1-9. <https://www.redalyc.org/pdf/1699/169920331001.pdf>
- Pardey Rodríguez, C. (2008). *Caracterización y evaluación de accesiones de 'Capsicum' del Banco de Germoplasma de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira y determinación del modo de herencia de la resistencia a potyvirus (PepDMV)* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira]. Repositorio UN. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2449/9004001.2008.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pardey Rodríguez, C., García Dávila, M. A., & Vallejo Cabrera, F. A. (2009). Evaluación agronómica de accesiones de *Capsicum* del banco de germoplasma de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. *Acta Agronómica*, 58(1), 23-28. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169913326004>
- Peñaloza, A., Valls, J. F. M., Rosso, B., Condón, F. (2010). Caracterización y evaluación de recursos fitogenéticos. En *Estrategia en recursos fitogenéticos para los países del Cono Sur* (pp. 85-96). Procisur. <https://repositorio.iica.int/items/1c67cf64-6508-4674-b443-0f6e9b639f5a>



- Philipp, N., Weise, S., Oppermann, M., Börner, A., Graner, A., Keilwagen, J., & Kilian, B. (2018). Leveraging the use of historical data gathered during seed regeneration of an *ex situ* genebank collection of wheat. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2018.00609/full>
- Pinheiro de Carvalho, M. A., Bebeli, P. J., Bettencourt, E., Costa, G., Dias, S., Dos Santos, T. M., & Slaski, J. J. (2013). Cereal landraces genetic resources in worldwide GeneBanks: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 177-203. <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0090-0>
- Universidad Nacional de Colombia. (2024a). *Obtención de líneas de Capsicum spp. con resistencia a 'Phytophthora capsici' Leonian y al virus del mosaico deformante del pimentón (PepDMV)*. <http://www.hermes.unal.edu.co/pages/Consultas/Proyecto.xhtml?idProyecto=13703&opcion=1>
- Universidad Nacional de Colombia. (2024b). *Búsqueda de resistencia a la pudrición causada por 'Fusarium' spp. en 'Capsicum'*. <http://www.hermes.unal.edu.co/pages/Consultas/Proyecto.xhtml?idProyecto=10201&opcion=1>
- Vallejo, F. A., Muñoz, J. E., & Rojas, R. D. (2012). Códigos de barras para la identificación del complejo *Capsicum*. *Acta Agronómica*, 61(5), 32-33. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/download/41447/43051
- Villota-Cerón, D., Bonilla-Betancourt, M. L., Carmen-Carrillo, H., Jaramillo- Vásquez, J., & García-Dávila, M. A. (2012). Caracterización morfológica de introducciones de *Capsicum* spp. existentes en el Banco de Germoplasma activo de Corpoica C. I. Palmira, Colombia. *Acta Agronómica*. 61(1), 16-26. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122012000100003
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J. W., Da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., González-Beltrán, A., ..., Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 15(3), 160018. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0009-6>
- Yu, X., Li, X., Guo, T., Zhu, C., Wu, Y., Mitchell, S. E., Roozeboom, K. L., Wang, D., Wang, M. L., Pederson, G. A., Tesso, T. T., Schnable, P. S., Bernardo, R., & Yu, J. (2016). Genomic prediction contributing to a promising global strategy to turbocharge gene banks. *Nature Plants*, 2, 16150. <https://doi.org/10.1038/nplants.2016.150>





Título de la obra

Diversidad genética

Técnica

Ilustración digital con tableta, pincel en
textura de carboncillo

Autora

Laura Stefanny López Cortés (Sstefcore)



@sstefcore



Stefanny López

- Capítulo II -

Diversidad y mejoramiento genético del ají (*Capsicum* spp.)

Felipe López-Hernández, Sebastián Parra-Londoño, Manuela Robledo-Gómez, Gustavo Adolfo Ossa-Ossa, Miguel Angel Useche, Andrés Javier Cortés Vera, Juan Camilo Henao-Rojas, Federico Roda, Jaime Andrés Tigreros

El capítulo presenta al ají (*Capsicum* spp.) como un cultivo emblemático cuya diversidad genética, moldeada por la evolución y la domesticación humana, ha dado origen a una extraordinaria riqueza de formas, sabores y compuestos bioactivos. Explica su origen americano, la dinámica de hibridación entre especies y las huellas genómicas de su expansión global. Destaca cómo la genómica, el mejoramiento tradicional y herramientas como la selección asistida

y la edición genética están transformando el desarrollo de nuevas variedades más productivas, resilientes y nutritivas. Asimismo, resalta el valor de los bancos de germoplasma y la necesidad de conservar esta diversidad frente al cambio climático. En conjunto, el capítulo muestra que el futuro del ají no solo depende de su historia evolutiva, sino de nuestra capacidad para integrar ciencia, biodiversidad y agroindustria en una visión sostenible e innovadora.



Introducción

Después de conocer la importancia del género *Capsicum*, su conservación y un poco de historia alrededor de las principales colecciones que existen en Colombia y en el mundo, en este capítulo se abordan las posibilidades de mejoramiento genético a partir de la diversidad disponible y se detallan algunos ejemplos y experiencias relacionados con el mejoramiento genético que son de utilidad desde diferentes ópticas y enfoques.

A nivel mundial, la producción de ají verde fresco alcanzó la cifra de 29,42 millones de toneladas en 2018 (Duranova et al., 2022). Colombia ha experimentado un crecimiento notable en la producción de ají durante los últimos años. Según los datos proporcionados por Agronet (2024), la producción de este cultivo se incrementó un 205 % en el periodo comprendido entre 2009 y 2021, pasando de 13.820,68 a 28.368,92 toneladas. A lo largo de este lapso, la producción acumulada de ají en el país alcanzó la cifra de 262.421,07 toneladas (Agronet, 2024). De esta cantidad, una parte significativa se destinó a la exportación, con un total de 1.074,04 toneladas vendidas en fresco o refrigeradas en los mercados internacionales, lo que generó ingresos por un valor de USD 2.068.982, según los datos reportados por Legis Comex (2024). De acuerdo con reportes comerciales de la empresa Hugo Restrepo

& Cía., se estima que el mercado global de ají para 2024 equivale a USD 5,97 billones y se proyecta un valor de USD 11,25 billones para 2032 (con una tasa de crecimiento anual compuesto [CAGR, por su sigla en inglés] del 7,3 %). Dada la significativa producción de este cultivo a nivel mundial y nacional, diferentes investigaciones se han enfocado en la aplicación de técnicas de mejora genética y en la selección de variedades orientadas a maximizar la concentración de compuestos bioactivos en los híbridos de ají, lo que podría tener impacto en la salud y la economía públicas.

La taxonomía botánica del ají (*Capsicum* spp.)

El conocimiento de la diversidad de especies de *Capsicum* y sus afinidades representa información básica y relevante con referencia al mejoramiento y la conservación de los recursos genéticos, incluyendo especies silvestres, semidomesticadas y domesticadas (tabla 2.1). Las afinidades entre las especies reflejan el grado de parentesco genético y, en consecuencia, también la probabilidad de cruzamiento entre ellas. Este último aspecto es clave en los programas de mejoramiento vegetal, ya que mediante cruzamientos controlados es posible introducir nuevos genes en los cultivares (Barboza et al., 2019).

Tabla 2.1. Especies silvestres, semidomesticadas y domesticadas de *Capsicum*

Silvestres	Semidomesticadas	Domesticadas
<i>Capsicum buforum</i> A.T. Hunz.	<i>Capsicum annuum</i> var. <i>glabriusculum</i>	<i>Capsicum annuum</i> L.
<i>Capsicum campylopodium</i> Sendtn.	<i>Capsicum baccatum</i> var. <i>baccatum</i>	<i>Capsicum baccatum</i> L. var. <i>pendulum</i> (Willd.)
<i>Capsicum chacoense</i> var. <i>tomentosum</i>	<i>Capsicum baccatum</i> var. <i>praetermissum</i>	<i>Capsicum chinense</i> Jacq.
<i>Capsicum ciliatum</i>	<i>Capsicum chinense</i> (forma silvestre)	<i>Capsicum frutescens</i> L.
<i>Capsicum coccineum</i>	<i>Capsicum frutescens</i> (forma silvestre)	<i>Capsicum pubescens</i> Ruiz y Pavón
<i>Capsicum cornutum</i> (Hiern) A.T. Hunz.	<i>Capsicum cardenasii</i> Heiser & Smith	
<i>Capsicum dimorphum</i> (Miers)	<i>Capsicum eximium</i> A.T. Hunz.	
<i>Capsicum flexuosum</i> Sendtn.	<i>Capsicum tovarii</i>	
<i>Capsicum dusenii</i> Bitter	<i>Capsicum chacoense</i> A.T. Hunz.	
<i>Capsicum geminifolium</i> A.T. Hunz.	<i>Capsicum galapagoensis</i> A.T. Hunz.	
<i>Capsicum hookerianum</i> (Miers)	<i>Capsicum annuum</i> var. <i>aviculare</i>	
<i>Capsicum lanceolatum</i> (Morton & Standl.)		
<i>Capsicum minutiflorum</i>		
<i>Capsicum mirabile</i> Mart.		
<i>Capsicum parvifolium</i> Sendtn.		
<i>Capsicum schottianum</i>		
<i>Capsicum scolnikianum</i> A.T. Hunz.		
<i>Capsicum pendulum</i>		
<i>Capsicum villosum</i> Sendtn.		

Fuente: Pickersgill (1983)





Foto: Laura María Restrepo Martínez

Las especies del género *Capsicum* poseen gran variabilidad para la mayoría de los caracteres agronómicos. La especie *C. pubescens* es fácilmente diferenciable por características muy específicas, como son semillas negras y flores moradas o moradas con base blanca, y la especie *C. baccatum* posee flores amarillas o blanco-amarillas con manchas verdizas hacia la parte basal de los pétalos (Melgarejo et al., 2004). Algunos reportes, como el de Pickergsill (1980), sugieren que las especies *C. annum*, *C. chinense* y *C. frutescens* se encuentran estrechamente relacionadas y posiblemente conespecíficas.

A su vez, el estudio de la diversificación filogenética dentro del género *Capsicum* ofrece una perspectiva única para comprender los procesos evolutivos que han dado forma a la biodiversidad vegetal. Una integración de factores ecológicos, genéticos y geográficos ha contribuido a la diversificación filogenética del género *Capsicum*, de modo tal que se ha adaptado a una variedad de climas y condiciones ambientales desde su centro de origen en América, lo que conlleva la evolución de una amplia gama de características morfológicas y bioquímicas. La coevolución con organismos polinizadores y dispersores de semillas también ha jugado un papel importante en la diversificación del género, lo que crea una

red compleja de relaciones ecológicas que han moldeado su evolución.

La hibridación en el género *Capsicum* ha sido un fenómeno recurrente que contribuye significativamente a su diversidad genética y morfológica. Dentro del género, las barreras reproductivas entre especies son volubles, lo que permite el flujo genético entre ellas. Numerosos híbridos naturales han surgido como resultado de este flujo génico, algunos de los cuales pueden tener características únicas y favorables para la agricultura y la horticultura. Además, la hibridación inducida por humanos se ha utilizado ampliamente en programas de mejoramiento genético para desarrollar variedades con rasgos agronómicos distintivos.

Comprender la diversificación filogenética y la dinámica de hibridación del género *Capsicum* clarifica su historia evolutiva y diversidad genética, lo cual a su vez tiene implicaciones prácticas para la conservación *in situ* y *ex situ*, así como para su aprovechamiento en programas de mejoramiento genético. El estudio de la hibridación natural y como parte de la domesticación también puede proporcionar ejemplos útiles para la conservación y el manejo de la diversidad genética en otras especies vegetales importantes económica y culturalmente.





La genética del síndrome de domesticación del ají

La domesticación del ají es un hito en la historia de la agricultura en América. Este proceso ha transformado estas plantas en una variedad de formas y sabores que ha sido fundamental para las dietas y culturas de las civilizaciones precolombinas, y que sigue siendo vital para la gastronomía global actual. Este proceso de domesticación, llevado a cabo por las comunidades indígenas a lo largo de milenios, ha sido impulsado por la selección artificial de características deseables, como el tamaño, la forma y el sabor.

A su vez, la domesticación del ají ha alterado la forma y la bioquímica de las plantas, así como su interacción con los humanos y el medio ambiente (Alam & Purugganan, 2024; Purugganan, 2022). Los genotipos domesticados presentan mayores rangos de adaptación y han logrado configurar a los humanos como agentes de dispersión, lo que mejora su éxito reproductivo y garantiza su supervivencia a largo plazo (Gutaker & Purugganan, 2024). Además, el ají se ha convertido en un símbolo de identidad y tradición en muchas sociedades debido a la coevolución entre el ají y dichas comunidades, lo que ha generado un rico legado genético y cultural.

La selección humana y los procesos naturales de recombinación genética y flujo génico contribuyen a la diversidad genética de las poblaciones de ají domesticado (Cortés et al., 2018). Los programas de mejoramiento modernos han apalancado dicha diversidad local (Cortés & López-Hernández, 2021), lo cual potencia nuevas variedades con rasgos agronómicos y culinarios mejorados.

En últimas, el estudio de la domesticación del ají no solo ayuda a comprender mejor la evolución de las plantas cultivadas, así como los procesos de adaptación, flujo genético y deriva genética subyacentes a la selección mediada por los humanos (Cortés, Cornille et al., 2022), sino que también revela la compleja relación que ha existido a lo largo del tiempo entre las plantas y las comunidades locales (Meyer & Purugganan, 2013). Además, múltiples estudios han demostrado que comprender los procesos de domesticación del ají permite identificar alelos adaptativos y conservar variabilidad genética útil para el mejoramiento y la seguridad alimentaria (McCouch, 2013; Qin et al., 2014).



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Huellas genéticas de la demografía en *Capsicum* spp.

El estudio realizado por Tripodi et al. (2021) describe la expansión global de *Capsicum* spp. mediante el análisis genético de 10.000 accesiones conservadas en los principales bancos de germoplasma del mundo, en combinación con resultados obtenidos mediante secuenciación masiva. Según la procedencia de las diferentes accesiones, se logró identificar que la domesticación inicial de *C. annuum* se presentó en Mesoamérica, como consecuencia del intercambio de materiales y entrecruzamientos realizados por los seres humanos.

En el estudio, los autores desarrollaron un método que denominaron ReMIXTURE, en el cual se reflejan los patrones de migración y las rutas de comercio utilizadas para *C. annuum*, de manera que identificaron rutas marítimas y terrestres que

abarcan regiones de Mesoamérica, África y Asia, y la presencia de centros secundarios de diversificación en Europa del Este y Asia Oriental.

Además, mediante el estudio de asociaciones genómicas, se identificaron regiones del genoma asociadas a rasgos de importancia agronómica, como pungencia, forma del fruto y características deseadas según las preferencias del consumidor. Estos rasgos se seleccionaron en el proceso de domesticación y transporte del cultivo en las diferentes regiones. Es importante resaltar el gran potencial que representa el estudio de la diversidad genética encontrada en los bancos de germoplasma, lo que permite conocer los procesos de domesticación de las diferentes especies vegetales y la diversificación de los cultivos a escala global, lo cual, a su vez, proporciona información que podrá ser aprovechada en planes de mejoramiento.



Base genética de la adaptación ecológica en ají

Colombia presenta condiciones agroecológicas únicas para el cultivo de ají, como la diversidad de pisos térmicos, la variabilidad climática y la posibilidad de establecer siembras continuas durante todo el año. Dentro de los análisis realizados en el Plan Hortícola Nacional, ejecutado por la Corporación Colombia Internacional (CCI), los frutos del género *Capsicum* se destacan por ser los más atractivos, dado que su tasa de crecimiento y valor comercial superan los de otras hortalizas analizadas, como tomate, cebolla y pepino (CCI, 2007). Colombia hace parte de la región considerada centro de origen del género *Capsicum*, razón por la cual existe una importante diversidad de especies y variedades, cuyas características específicas representan gran potencial de estudio (Restrepo Gallego, 2007).

La diversificación adaptativa del género refleja, a su vez, su capacidad para radiar a través de una variedad de entornos y condiciones ambientales (López-Hernández & Cortés, 2019). Las diferentes especies se adaptaron de manera diferente a medida que se extendieron a partir de su origen en América del Sur y se encontraron con una variedad de hábitats, desde selvas tropicales hasta desiertos áridos en Centroamérica. La diversificación adaptativa se manifiesta en adaptaciones morfológicas, fisiológicas y bioquímicas que les permiten a las poblaciones sobrevivir y reproducirse en entornos específicos (Cortés, López-Hernández et al., 2022).

La variación en los niveles de capsaicina, el compuesto que causa el picante en los chiles, es uno de los aspectos más notables de la diversificación adaptativa de los ajís. Los rangos reportados en cultivares de *Capsicum* van desde ~0,02 hasta más de 20 mg g⁻¹ de peso seco (Hamed et al., 2019) y, en tipos ultrapicantes, incluso ~24 mg g⁻¹ o más (Zamljen et al., 2021). A lo largo de su evolución, las diferentes especies han desarrollado niveles variables de capsaicina en sus frutos como una forma de protegerse de los herbívoros y competir por la dispersión de semillas. La ecología de la especie está estrechamente relacionada con esta variación en los niveles de capsaicina y refleja adaptaciones particulares a sus hábitats y nichos ecológicos.

Por otra parte, es necesario reconocer que la domesticación también ha traído consigo una variación importante en el contenido de capsaicina a través de variedades. La evolución de diversas estrategias reproductivas, como la autopolinización y la polinización cruzada, es otro aspecto importante de la diversificación adaptativa de los ajís. Algunas especies han logrado trascender las incompatibilidades genéticas para facilitar la autopolinización, lo que resulta benéfico en entornos donde la polinización por insectos puede ser limitada. La polinización cruzada es fundamental para otras especies, lo que les permite diversificarse y adaptarse a una variedad más amplia de hábitats y condiciones ambientales.



Foto: Esteban Castaño Llanos

El estudio de la diversificación adaptativa de los ajís no solo proporciona información útil sobre los mecanismos evolutivos que han dado forma a la biodiversidad vegetal, sino que también tiene implicaciones significativas para la conservación y el manejo de estos recursos genéticos (Cortés & Barnaby, 2023). Comprender cómo las especies de ají se han adaptado a diferentes entornos puede ayudar a orientar los esfuerzos de conservación *in situ*, así como a informar sobre estrategias de cultivo más sostenibles y resistentes al cambio climático a partir del *standing variation*, tal como se detalla a continuación.

Además de su importancia evolutiva, comprender la diversificación adaptativa de *Capsicum* tiene un impacto significativo en la agricultura y en la seguridad alimentaria en un mundo en constante cambio. Ante desafíos globales como el cambio climático, la contaminación y la pérdida de hábitat y biodiversidad, conocidos colectivamente como la triple crisis planetaria, resulta crucial identificar y conservar las variedades de ají que han desarrollado adaptaciones específicas a condiciones ambientales adversas.

Algunas de estas condiciones adversas tienen impacto en el cultivo de ají y su efecto puede ser aumentado por el cambio climático, como, por ejemplo, estrés por plagas y patógenos (Guevara-Escudero et al., 2021), y estrés por sequía y altas temperaturas (Cortés & Blair, 2018). Las variedades que han evolucionado bajo estas presiones representan recursos genéticos de alto valor para el mejoramiento del

ají, ya que concentran alelos vinculados con la tolerancia a condiciones abióticas y bióticas extremas (Cortés & Du, 2023; Ro et al., 2022; Vega-Muñoz et al., 2025). Su incorporación en programas de fitomejoramiento contribuye al desarrollo de cultivares más resilientes y sostenibles, lo cual favorece la estabilidad productiva y la seguridad alimentaria en regiones vulnerables a los efectos del cambio climático (Vega-Muñoz et al., 2025).

Estrategias modernas de mejoramiento genético en ají

El valor de los recursos fitogenéticos radica en su utilización para la generación de nuevos cultivares con características agronómicas superiores y de interés (atributos de valor). En este sentido, los estudios de caracterización en fase de premejoramiento cumplen el propósito de brindar información sobre las variantes génicas presentes en las colecciones de germoplasma para posteriormente ser empleadas en programas de mejoramiento genético vegetal (Vallejo Cabrera & Estrada, 2002; Vallejo & Hidalgo, 2016). Así, para superar los nuevos desafíos planteados por los sistemas agroindustriales productivos se hace imprescindible conocer las características del germoplasma conservado, incluidas las colecciones locales de *Capsicum*, como la administrada por AGROSAVIA.

Para el desarrollo de nuevos cultivares, los mejoradores deben considerar el grupo de ajís con el cual se está trabajando, y las exigencias y preferencias

del mercado. Normalmente se realizan selecciones para características agronómicas como productividad, grado de desprendimiento (facilidad de desprendimiento) de los frutos durante la cosecha, arquitectura de la planta, precocidad y resistencia a enfermedades. Paralelamente, son realizadas evaluaciones para características de calidad de frutos, como coloración; pungencia; sabor; aroma; formato y tamaño de fruto; espesor de la pared del fruto; pérdida de peso poscosecha, y, en algunos casos, contenido de vitamina C (Pinto-Zapata et al., 2013).

La hibridación dirigida, que implica el cruzamiento selectivo de diferentes variedades y especies para combinar y mejorar rasgos específicos (Burbano-Erazo et al., 2021; López-Hernández et al., 2023), es otra estrategia clave en el mejoramiento genético. Esta técnica se ha utilizado para desarrollar variedades de ají resistentes a enfermedades como el tizón bacteriano y el virus del mosaico, así como para mejorar la calidad del fruto y la adaptabilidad a diferentes condiciones ambientales. El uso de marcadores moleculares y métodos de análisis genómico ha acelerado el proceso de selección y desarrollo de variedades.

La manipulación de la biosíntesis de compuestos bioactivos como la capsaicina y los carotenoides es otra área de investigación prometedora en el mejoramiento genético de ajís. Estos componentes contribuyen al sabor y el picante del fruto, así como a sus propiedades antioxidantes y medicinales. En la actualidad, se pro-

mueve el desarrollo de variedades con perfiles sensoriales y nutricionales mejorados mediante técnicas de ingeniería genética y edición génica.

Estudios realizados por Medina et al. (2006) y Nicolai et al. (2013) mencionan que uno de los efectos que se presentan en la selección artificial de materiales de *Capsicum* es la disminución de su variabilidad genética, ya que los procesos de selección realizados por productores van direccionados a características de interés, lo que genera una reducción de la diversidad en cuanto a rasgos fenotípicos resultante del proceso de domesticación de las especies y derivas genéticas.

En el proceso de generación de híbridos, los fitomejoradores consideran que el factor más importante es la selección adecuada de los parentales según las características deseables (Kaushik et al., 2015). Algunas de las características que deben poseer los parentales son la variabilidad genética y los parámetros de capacidad de combinación que resulten en procesos de heterosis (Chaudhary et al., 2013). Comprender estas variables específicas ayuda a elegir la mejor estrategia de mejoramiento genético para los rasgos cuantitativos (Vijeth et al., 2018).

De las más de 30 especies descritas del género *Capsicum*, solo cinco concentran la mayor parte de la producción y el interés científico: *C. annuum*, *C. chinense*, *C. frutescens*, *C. baccatum* y *C. pubescens* (Bosland & Votava, 2012; Ibiza et al., 2012). Entre



ellas, *C. annuum* destaca por ser la especie más estudiada a nivel molecular y genético, de manera que constituye un modelo clave para programas de mejoramiento (Pereira-Dias et al., 2019). Sin embargo, se ha logrado evidenciar inconvenientes en especies silvestres de *Capsicum* spp. debido, principalmente, al proceso de cosecha que realizan los productores para la comercialización en mercados locales, lo cual ocasiona que no se evalúen de manera adecuada los procesos de conservación de estas especies. Esto genera que cinco taxones de *Capsicum* sean incluidos en la lista de especies en peligro de extinción por parte de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (Khoury et al., 2020).

La diversidad que presenta el género *Capsicum* es resultado de la combinación de factores como la domesticación, los procesos de selección artificiales y naturales, y los procesos evolutivos en los diferentes centros de diversidad. *Capsicum* spp. puede dividirse en tres complejos: i) complejo CA *annuum*, que incluye: *C. annuum*, *C. chinense*, *C. frutescens*, *C. galapagoensis* y parientes silvestres; ii) complejo CB *baccatum*, que incluye: *C. baccatum*, *C. praetermissum* y *C. tovarii*, y iii) complejo CP *pubescens*, que incluye: *C. pubescens*, *C. cardenasii* y *C. eximium*. A pesar de las barreras reproductivas existentes entre estos grupos, se han obtenido híbridos interespecíficos exitosos mediante técnicas de mejoramiento (Manzur et al., 2015; Yoon et al., 2006).

Debido a la amplia diversidad genética, se han implementado con éxito diferentes programas de mejoramiento centrados en características como productividad, rasgos del fruto —incluidos los metabolitos— y la resistencia/tolerancia al estrés biótico y abiótico (figura 2.1). Establecidos los objetivos para realizar el programa de mejoramiento, se debe seleccionar el método más adecuado para la obtención de esos nuevos cultivares mediante técnicas convencionales de mejoramiento, entre las cuales se pueden encontrar:

- » *Selección masal*: se utilizan rasgos de alta heredabilidad, y las mejores plantas se seleccionan para la siguiente generación.
- » *Selección por pedigrí*: se realiza un registro sobre el apareamiento parental y las progenies derivadas.
- » *Método de descendencia de una sola semilla (SSD, por su sigla en inglés)*: se lleva a cabo la selección de una sola semilla por cada planta, la cual se establece para las próximas generaciones.
- » *Selección recurrente*: se seleccionan plantas superiores y se realiza entrecruzamiento en cada generación.
- » *Retrocruzamientos*: se escogen plantas con las características deseadas y se cruzan con progenitores recurrentes en las próximas generaciones.

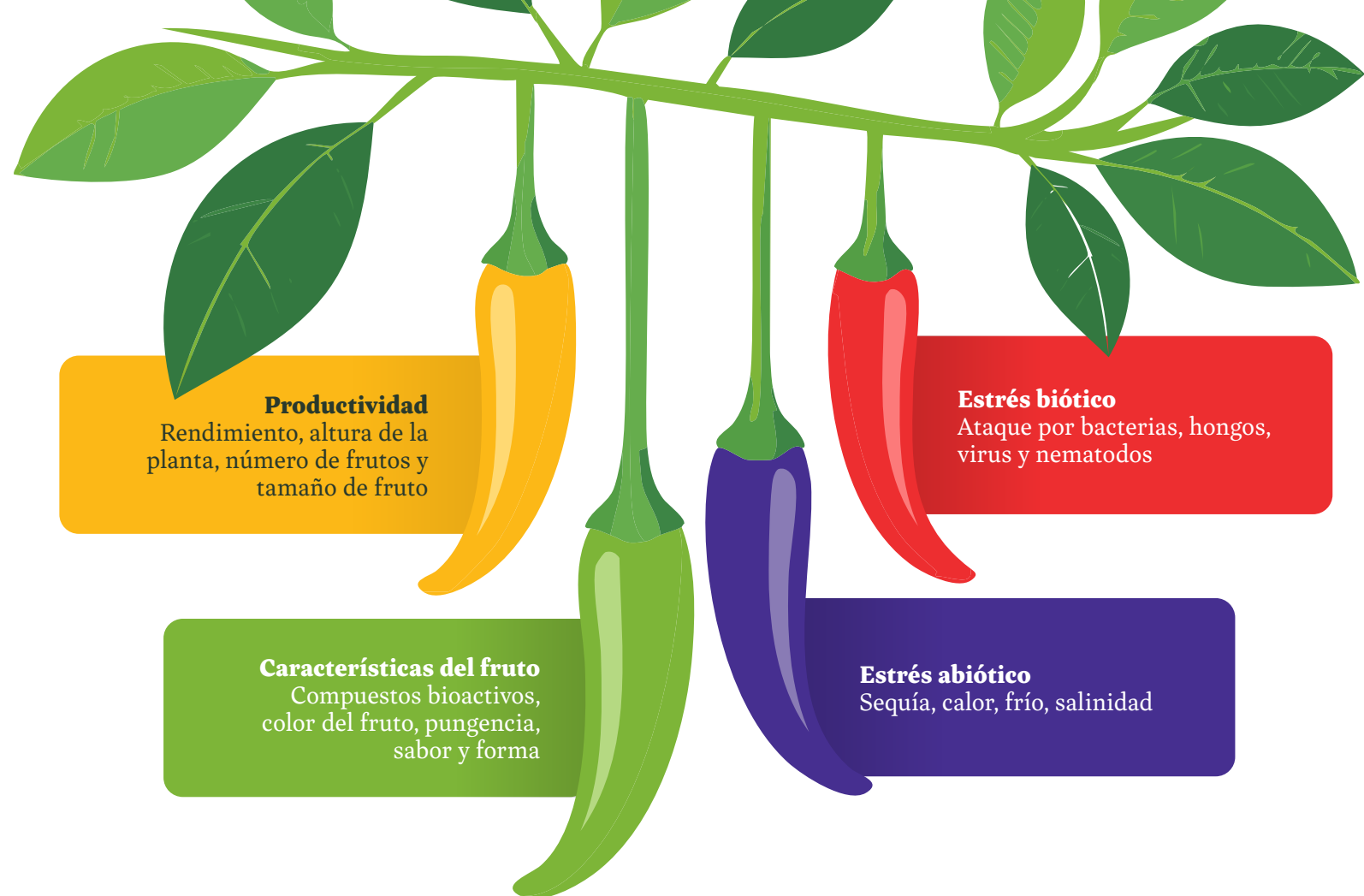


Figura 2.1. Características deseadas en los planes de mejoramiento de *Capsicum*.

Fuente: Elaboración propia

Así, los fitomejoradores han mencionado el desarrollo de variedades mejoradas de cultivos de *Capsicum* empleando dichas técnicas (De Oliveira et al., 2015; Nsabiyera et al., 2013; Singh et al., 2014; Ulhoa et al., 2014).

Por otro lado, la obtención de plantas mediante hibridación interespecífica hace referencia al proceso de cruzamiento entre dos individuos de especies diferentes con el fin de potenciar la heterosis. En *Capsicum* se ha utilizado esta técnica con el objetivo de mejorar rasgos específicos. Sin embargo, la diferencia entre especies para realizar el cruzamiento ha

demostrado respuestas distintas en cuanto a cuajado de semillas, germinación, esterilidad y viabilidad (Visalakshi & Pandiyan, 2018).

Este proceso ha permitido identificar especies con características deseadas. Por ejemplo, *Capsicum frutescens* ha demostrado ser una buena fuente de genes resistentes a enfermedades. Esta característica deseada se ha utilizado con el fin de generar resistencia al virus del mosaico del tabaco y al virus de la marchitez del tabaco en *C. annuum*, mediante la transferencia del gen L de *C. frutescens* (Visalakshi & Pandiyan, 2018).

La era genómica del ají

El genoma del ají tiene una ploidía $2n (= 2x)$ de 24 y un tamaño de genoma de ~3,5 Gb. Este recurso ha proporcionado una gran cantidad de información sobre la estructura genética y la evolución del género *Capsicum* (F. Liu et al., 2023). Los avances en la tecnología genómica han permitido a los investigadores secuenciar y analizar el ADN de varias especies de ají, mediante la técnica de resecuenciación completa del genoma, lo que ha proporcionado una visión detallada de su diversidad y bases genéticas de rasgos de interés (Carrizo García et al., 2022). Por ejemplo, estos estudios han demostrado que la capsaicina y los carotenoides, que son responsables de las características organolépticas y nutricionales de los ajís, involucran numerosos genes como parte de la biosíntesis de estos compuestos bioactivos (Espichán et al., 2022; Loupit et al., 2022).

El rendimiento del cultivo, la resistencia a enfermedades y la tolerancia al estrés abiótico son otros de los rasgos agronómicos importantes que el análisis del genoma del ají ha revelado. Los científicos pueden desarrollar estrategias de mejoramiento genético más eficientes y precisas (*e. g.*, selección indirecta, predicción genómica y edición génica) para generar variedades de ají con características agronómicas mejora-

das, al identificar y modular los genes y las vías metabólicas asociadas a estos rasgos. Además, la comparación del genoma entre las especies de ají (*i. e.*, reconstrucción pangénomica) ha revelado la presencia de regiones genómicas divergentes, lo que sugiere la existencia de genes candidatos para adaptarse a diferentes ambientes y condiciones climáticas.

El acceso a secuencias genómicas de alta calidad (tabla 2.2) también ha facilitado la identificación y caracterización de marcadores moleculares útiles para la mejora y la conservación de los recursos genéticos del ají (McLeod et al., 2023). Estos marcadores pueden utilizarse en la selección asistida por marcadores, que permite a los mejoradores moleculares identificar y seleccionar individuos con rasgos deseables de manera más rápida y precisa. Además, los datos genómicos también pueden usarse para diseñar métodos de conservación *ex situ* (mediante la priorización de colecciones de germoplasma en función de la duplicidad/redundancia genética), así como para encontrar genes importantes para la conservación *in situ* de especies de ají localmente amenazadas, a partir del cómputo de sus valores de adaptación genómicamente estimados.



Foto: Esteban Castaño Llanos

Tabla 2.2. Número de polimorfismos de un solo nucleótido (SNP, por su sigla en inglés) detectados entre las especies de *Capsicum* utilizando diferentes plataformas de genotipado

Tecnología empleada	Especie + número genotipos	Número de SNP	Objetivos	Conclusiones	Citación
Matriz de ADN/chip					
Affymetrix GeneChip	<i>C. annuum</i> (40), <i>C. frutescens</i> (1), <i>C. chinense</i> (1) y <i>C. pubescens</i> (1).	33.401.	Desarrollo de la matriz Pepper GeneChip® de Affymetrix para la detección de polimorfismos y el análisis de la expresión en <i>Capsicum</i> .	Validación de marcadores de transcripción del genoma completo para evaluar características genéticas en <i>Capsicum annuum</i> .	Hill et al. (2013).
Chip genético Affymetrix	<i>C. annuum</i> (40).	6.426.	Diseño de una matriz con una redundancia de 13 sondas por posición de par de bases para integrar múltiples valores de hibridación y detectar polimorfismos de posición única (SPP, por su sigla en inglés).	Se identificaron 6.426 SPP abarcando 3.818 unigenes en líneas de <i>C. annuum</i> , y el análisis genético y de diversidad mostró una agrupación del germoplasma confirmada por ACP y análisis filogenético.	Hill et al. (2013).
Matriz Illumina Infinium (PepperSNP16K)	Una población de mapeo interespecífica (90).	5.546.	Resecuenciación de líneas endogámicas para completar el mapa de haplotipos (HapMap) para el genoma de <i>Capsicum</i> basado en SNP.	Construcción de la herramienta estandarizada PepperSNP16K para análisis genéticos, con el fin de facilitar el intercambio de hallazgos y el análisis de locus de rasgo cuantitativo (QTL, por su sigla en inglés) para mejorar continuamente el pimiento a nivel mundial.	Hulse-Kemp et al. (2016).
Matriz Illumina Infinium (CapSNP15K)	Una población de mapeo interespecífica (297).	5.569.	Identificación SSR en todo el genoma del pimiento (<i>Capsicum</i>) y su evaluación para desarrollar marcadores genéticos.	Es el primer informe sobre la caracterización exhaustiva de los motivos SSR en los genomas de pimientos.	Cheng et al. (2016).

Continúa en la siguiente página ▼





Tecnología empleada	Especie + número genotipos	Número de SNP	Objetivos	Conclusiones	Citación
Secuenciación de nueva generación					
Genotipado por secuenciación (<i>genotyping by sequencing</i> [GBS])	<i>C. annuum</i> (222).	108.591.	Implementación del enfoque GBS para identificar SNP en todo el genoma de <i>Capsicum</i> y evaluación de la diversidad genética en un subconjunto de 222 genotipos de <i>Capsicum annuum</i> cultivados.	Evaluación de la diversidad genética en accesiones de <i>C. annuum</i> mediante GBS.	Taranto et al. (2016).
GBS.	<i>C. annuum</i> (94).	66.960.	GWAS para identificar regiones genómicas y genes candidatos asociados con el contenido de capsaicinoides y el peso del fruto en una colección diversa de accesiones de <i>Capsicum annuum</i> .	Identificación de 16 SNP fuertemente asociados al tamaño del fruto y de 14 SNP comunes asociados a capsaicina y dihidrocapsaicina.	Nimmakayala et al. (2016).
GBS.	<i>C. baccatum</i> (283) y <i>C. annuum</i> (94).	77.407.	Estudio de estructura de la población y de domesticación de dos especies de pimientos cultivados incompatibles.	El mapeo de SNP al genoma de referencia de <i>C. annuum</i> identificó SNP homólogos entre dos genomas incompatibles de pimientos cultivados.	Nimmakayala, Abburi, Saminathan, Almeida et al. (2016).
WGRS.	<i>C. baccatum</i> (1) y <i>C. annuum</i> (1).	4.887.031.	Identificación de marcadores SNP en todo el genoma relacionados con la resistencia al oídio (PM) en dos variedades de pimiento.	SNP asociados a la resistencia a PM.	Ahn et al. (2018).
GBS.	<i>C. annuum</i> (145), <i>C. chinense</i> (42) y <i>C. frutescens</i> (21).	109.610.	Implementación de un mapeo de QTL y GWAS para el contenido de capsaicinoides en pimientos mediante resecuenciación del genoma completo y GBS.	Identificación de un conjunto de 99 SNP como potenciales marcadores genéticos que influyen específicamente en los niveles de capsaicina en <i>Capsicum</i> , pero no se obtuvieron asociaciones significativas para dihidrocapsaicina o capsaicinoides.	Han et al. (2018).
WGRS.	Una población de mapeo intraespecífica (120).	1.431.214.	Resecuenciación de las líneas parentales y las líneas recombinantes endogámicas (RIL) de <i>Capsicum</i> con coberturas de 18x y 1x, respectivamente, utilizando un mapa de alta densidad y 120 RIL derivadas de un cruce entre <i>C. annuum</i> Perennial y <i>C. annuum</i> Dempsey para el mapeo QTL de rasgos hortícolas.	Identificación de QTL para rasgos de fruto, arquitectura de la planta y hoja, e informaron por primera vez de QTL que controlan rasgos relacionados con la flor en <i>Capsicum</i> .	Han et al. (2016).

Continúa en la siguiente página ▼



Tecnología empleada	Especie + número genotipos	Número de SNP	Objetivos	Conclusiones	Citación
Secuenciación de nueva generación					
Secuenciación de fragmentos amplificados de locus específico (SLAF-seq., por su sigla en inglés).	<i>C. annuum</i> (249).	106.848.	Desarrollo de 249 plantas F2 derivadas de un cruce intraespecífico entre las líneas endogámicas de pimiento Z4 y Z5.	Línea base para la mejora asistida por marcadores moleculares, y para la clonación y análisis funcional de genes clave que controlan el primer nudo floral (FFN, por su sigla en inglés) usando marcadores SNP.	Zhang et al. (2018).
GBS.	<i>Capsicum</i> (220), <i>C. chinense</i> (62), <i>C. frutescens</i> (14), <i>C. pubescens</i> (13), entre otras.	746.450.	Estudio de la variación genómica y confirmación de la subdivisión en clados y especies, para mostrar que en <i>C. annuum</i> la principal subdivisión separa frutos grandes y voluminosos de los pequeños.	Identificación de un conjunto de marcadores útiles para estudios genéticos de poblaciones y análisis de asociación genética en <i>C. annuum</i> .	Colonna et al. (2019).
SLAF-seq.	<i>Capsicum</i> (287).	594.429.	Análisis de la diversidad genética, la distribución de SLAF y SNP, la diferenciación de poblaciones y determinación del modelo estadístico óptimo.	Señales de GWAS eran altamente consistentes con el gen restaurador de la fertilidad (Rf) para la esterilidad masculina citoplasmática (CMS, por su sigla en inglés).	Wu et al. (2019).
WGRS.	<i>C. annuum</i> (229), <i>C. baccatum</i> (48), <i>C. chinense</i> (48) y <i>C. frutescens</i> (25).	18.663.	Selección genómica para predecir rasgos relacionados con la fruta en pimiento usando datos genotípicos y fenotípicos de una población de entrenamiento para predecir fenotipos en una población de prueba solo con datos genotípicos.	Efecto de la cantidad de marcadores, los métodos de predicción y la estructura poblacional en la predicción de rasgos relacionados con la fruta a partir de datos genotípicos.	Hong et al. (2020).
GBS.	<i>Capsicum</i> spp. (10.138).	527.474.	Genotipificación de más de 10.000 muestras de pimiento (<i>Capsicum</i> spp.) mediante GBS de SNP de bancos de germoplasma mundial e investigación de la historia reciente de este cultivo.	Asociaciones de marcadores y barridos selectivos que afectan rasgos como la pungencia.	Tripodi et al. (2021).

Fuente: Elaboración propia con base en Shirasawa et al. (2005)

El conocimiento de la diversidad genómica de una especie o género puede ser de gran utilidad para el entendimiento de la variabilidad en características agronómicas de un cultivo y para la identificación de sus componentes genéticos. El análisis de la diversidad de un cultivo, con la caracterización genética de los genotipos que lo componen y de sus variaciones morfológicas, permite identificar adaptaciones a condiciones de estrés y aclarar los componentes genéticos tras dicha adaptación (Morris et al., 2013). En los últimos años, la metodología de GWAS ha sido aplicada en el género *Capsicum* para el estudio de la variabilidad en diferentes características agronómicas de interés. Por ejemplo, se ha evaluado el contenido de capsaicinoides (Nimmakayala, Abburi, Saminathan, Alaparthi et al., 2016), la morfología del fruto (Colonna et al., 2019) y otros caracteres relacionados con el crecimiento de la planta (Wu et al., 2019). La investigación realizada por Tripodi et al. (2021), empleando 10.000 accesiones originarias de diferentes continentes, encontró variaciones en la pungencia del fruto y en el número de pedicelos por axis de la planta, lo que muestra componentes genéticos asociados a estos caracteres en los cromosomas 2 y 6, respectivamente. En los estudios realizados para entender la variabilidad en el contenido de capsaicinoides, se empleó una colección de *Capsicum* conformada por 94 accesiones obtenidas de distintas zonas geográficas del mundo.

Implementando la técnica de GBS, se obtuvieron 66.960 SNP, con los cuales se identificaron QTL asociados tanto al contenido de estos compuestos en el

fruto como al tamaño. En zonas cercanas a los QTL, se encontró la presencia de genes cuya función está relacionada con la producción de capsaicina y dihidrocapsaicina, tales como proteína ankirina y proteína IKI3, entre otros (Nimmakayala, Abburi, Saminathan, Alaparthi et al., 2016). Para el análisis de la variabilidad en la morfología del fruto de ají se empleó una colección de 373 genotipos pertenecientes a 11 especies distintas, con los cuales se generaron 746.000 SNP. Empleando estos volúmenes de información, se logró determinar la amplia variabilidad en las formas de los frutos en especies comerciales de este cultivo. Adicionalmente, se encontraron ocho QTL en los cromosomas 3, 10 y 11, los cuales estarían determinando la morfología del fruto (Colonna et al., 2019).

Por otra parte, el estudio realizado por Wu et al. (2019) permitió la caracterización morfológica y genética de 287 accesiones empleando 9.000.000 de SNP. Con esta información se logró determinar la relación entre caracteres morfológicos tales como forma de la hoja, color del fruto y pungencia, con los marcadores moleculares obtenidos. Asociados a estos caracteres, se encontraron QTL en los cromosomas 6, 10 y 11 de *Capsicum*. La identificación de asociaciones significativas parámetro-marcador permite el descubrimiento de QTL candidatos que podrían ser utilizados para la selección de genotipos útiles en programas de fitomejoramiento (Voss-Fels & Snowdon, 2016). Adicionalmente, el posterior análisis de dichos QTL mediante anotación genómica facilita la identificación de genes relacionados con rasgos de interés.

A nivel global existe una amplia diversidad morfológica y genética en el género *Capsicum*, la cual se alberga en las diferentes colecciones de germoplasma ubicadas alrededor del mundo. Hay diversos estudios en los que esa diversidad se ha caracterizado ampliamente, lo que evidencia el potencial agroindustrial de los frutos de este cultivo. Por otra parte, la variabilidad ambiental producto del cambio climático podría resultar en condiciones de estrés. Por tales razones, es importante que las investigaciones se enfoquen en el mejoramiento de caracteres útiles para la agroindustria y que permitan la adaptabilidad y el incremento de la productividad en condiciones subóptimas de crecimiento (tabla 2.3). Los primeros cruzamientos realizados para la domesticación del género *Capsicum* permitieron la generación de una amplia diversidad en los frutos,

con lo que se logró la obtención de variedades actuales tipo jalapeño, serrano y ancho (Ramalho do Rêgo & Monteiro do Rêgo, 2016). Hasta la fecha, la principal metodología empleada para el fitomejoramiento en este género ha sido la selección en masa, sin embargo, recientemente se viene empleando el método de hibridación. Debido a que el mejoramiento de una especie perenne puede tomar mínimo alrededor de una década, desde los primeros cruces hasta la obtención de una nueva variedad, conocer la diversidad morfológica, fisiológica, bioquímica y genómica de los genotipos disponibles de la especie o género es una alternativa para lograr avances a mayor escala. Las metodologías establecidas para el fitomejoramiento se han enfocado en aumentar la productividad y la calidad básica de un cultivo.

Tabla 2.3. Rasgos agroindustriales y agronómicos empleados en programas de fitomejoramiento

Característica de interés	Referencia
Precocidad, productividad total, cantidad de frutos por planta, longitud del fruto, altura de la planta.	Singh et al. (2014).
Precocidad, composición química del fruto.	Banga y Banga (1998).
Peso seco de los frutos, calidad del fruto, alta productividad.	Rohini y Lakshmanan (2016).
Días para floración, humedad del fruto, ramificaciones secundarias por planta, longitud del pedicelo, forma del fruto, número de semillas por fruto.	Patel et al. (2015).

Continúa en la siguiente página ▼





Característica de interés	Referencia
Contenido de materia seca, contenido de ácido ascórbico, contenido de capsaicina, contenido de oleorresina.	---
Amplitud de follaje.	Nagaraja et al. (2016).
Número de ramificaciones primarias por planta, perímetro del fruto, peso de semillas, contenido de vitamina C, contenido de betacaroteno, índice de enfermedad en la planta causado por virus, heterobeltosis por fruto.	Bhutia et al. (2015).
Pungencia (contenido de capsaicina y dihidrocapsaicina).	Naresh et al. (2016).
Días para aparición de la primera flor, días para maduración del fruto, rendimiento.	Sharma et al. (2013).
Diámetro ecuatorial del fruto.	---
Grosor del pericarpio.	Payakhapaab et al. (2012).
Días para maduración del primer fruto, días para cosechar, longitud del peciolo, peso fresco.	Tembhurne & Rao (2012).
Tiempo de floración y fructificación.	Silva et al. (2017).
Contenido de vitamina E.	Wu (2017).
Resistencia a <i>Phytophthora</i> .	Lee et al. (2012).
Resistencia a antracnosis.	Mishra et al. (2019).
Tolerancia a altas temperaturas.	Usman et al. (2018).
Tolerancia a sequía.	Lakshmi Sahitya et al. (2018).
Tolerancia a salinidad.	Balasankar et al. (2017).

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, hoy en día los consumidores buscan otras características sensoriales, las cuales deben ser consideradas por los fitomejoradores. Por lo tanto, los investigadores en esta área deben conocer las problemáticas asociadas a la producción, mercadeo y consumo de *Capsicum*, al igual que las tendencias a mediano y largo plazo. Por ejemplo, en la actualidad los consumidores son conscientes del daño ambiental provocado por prácticas agrícolas equivocadas, reconocen la importancia de una agricultura sostenible e identifican el potencial nutricional de las frutas gracias a la gran cantidad de metabolitos secundarios que producen (Byrne, 2012).

Un factor importante para considerar en programas de fitomejoramiento es la disponibilidad de germoplasma y su variabilidad genética. Recientemente, un estudio evaluó la diversidad de 10.000 accesiones localizadas en bancos de germoplasma a nivel mundial, e identificaron una amplia variación en la pungencia de los frutos, la cual se ha visto influenciada por las preferencias locales. Adicionalmente, la facilidad con la cual pueden ser transportados los frutos y la viabilidad de las semillas permitieron su amplia dispersión en diferentes continentes (Tripodi et al., 2021). Uno de los métodos más usados para incrementar la variabilidad e introducir características deseables en un cultivo es la hibridación, la cual facilita la combinación genética y la especiación. Sin embargo, en el género *Capsicum*

el cruzamiento entre diferentes especies no se ha explorado lo suficiente, debido a la dificultad para manejar las flores y a la poca cantidad de semillas viables por fruto (Ramalho do Rêgo & Monteiro do Rêgo, 2016). Por otra parte, los cruzamientos entre diferentes variedades de la misma especie alcanzan una suficiente cantidad de semillas por fruto, aunque estos se producen en menor cantidad (Nascimento et al., 2015).

Debido a la gran cantidad de usos a partir del fruto de *Capsicum*, los esfuerzos de los investigadores por mejorar la utilidad agroindustrial de este cultivo se han enfocado en distintas características agronómicas. La mayoría de trabajos de fitomejoramiento se ha concentrado en ajís dulces pertenecientes a la especie *C. annuum*, con lo que se ha logrado incrementar el rendimiento, disminuir la pungencia e intensificar la coloración del fruto. También se ha conseguido mejorar la tolerancia a estrés biótico, como *Phytophthora*, antracnosis, marchitamiento, mildew polvoso y virus, y a factores abióticos, como altas y bajas temperaturas, sequía y salinidad. Por otra parte, en chiles picantes la investigación se ha concentrado en la especie *C. frutescens*, la cual es considerada fuente de genes de resistencia a enfermedades (Jaiswal et al., 2021). Empleando esta especie y la hibridación interespecífica, se ha logrado generar resistencia contra virus en genotipos de *C. annuum* (Visalakshi & Pandiyan, 2018). Adicionalmente, el contenido



de capsinoides y capsaicinoides se ha incrementado usando genotipos tipo habanero y jolokia de la especie *C. chinense*, lo cual ha generado líneas de mayor pungencia debido a la acumulación de estos metabolitos en la placenta y en el pericarpio del fruto (Jang et al., 2021).

En Colombia, como se mencionó anteriormente, se cuenta con una amplia diversidad de ají, representada en los bancos de germoplasma nacionales. Recientemente, se evaluaron 22 genotipos para identificar líneas con mayor contenido de capsaicina que las variedades comerciales, con lo que se logró identificar seis líneas con mayor pungencia pertenecientes a las especies *C. annum*, *C. chinense* y *C. frutescens*. Entre otros caracteres deseables en estos genotipos, se encontró mayor rendimiento y peso del fruto, de forma similar a los testigos comerciales (Zúñiga-Daza, 2021).

El uso de métodos convencionales y moleculares para el fitomejoramiento se considera una aproximación adecuada para la generación de nuevos cultivares en el género *Capsicum* y para la explotación del amplio potencial nutricional y comercial del fruto alrededor del mundo (Rezaul Karim et al., 2021). Recientemente, el método de mejoramiento de la heterosis ha sido aplicado exitosamente para el incremento de la productividad y para alcanzar caracteres con importancia económica. Esta metodología em-

plea diversas líneas genéticamente endogámicas con buena habilidad de combinación, con el fin de explotar el efecto dominante del carácter deseado. Así, aplicando este método se han logrado mejorar el número de frutos por planta, y la longitud y el volumen del fruto (Herath et al., 2021). Por otra parte, el uso de la selección genómica es una alternativa para lograr mayores avances en la generación de nuevas variedades con caracteres agronómicos de interés, ya que las características relacionadas con el fruto son controladas cuantitativamente por los genes heredados. Empleando la diversidad morfológica y genética de 351 accesiones de las especies *C. annum*, *C. baccatum*, *C. chinense*, *C. frutescens* y *C. chacoense*, se logró predecir con alta precisión los caracteres de tamaño, forma y peso del fruto, así como grosor del pericarpio, lo cual demuestra el amplio potencial de la selección genómica y la diversidad de un cultivo en el inicio de un programa de fitomejoramiento, debido a la comprensión de la arquitectura de los frutos (Hong et al., 2020). Gracias a la gran cantidad de información morfológica y genética disponible en los bancos de germoplasma de *Capsicum*, los investigadores han logrado predecir el comportamiento de genotipos bajo diferentes condiciones ambientales. Empleando 300 accesiones representativas de la colección global de *Capsicum*, se identificaron 33 genotipos promisorios para ser empleados como líneas parentales en el mejoramiento de la tolerancia a temperaturas elevadas (Fumia et al., 2023).

Arquitectura genómica de los biocompuestos en frutos de ají

Los resultados alcanzados hasta el momento utilizando las diferentes estrategias de mejoramiento clásico podrían acelerarse combinando las estrategias de mejoramiento genómicamente asistidas y las metodologías multiómicas (transcriptómica, metabolómica, proteómica y epigenómica). Esto facilitaría el descubrimiento de genes de interés, así como de vías biológicas complejas controladas por mecanismos genéticos y epigenéticos, con el fin de desarrollar líneas elite en *Capsicum* (Lozada et al., 2022), incluso para biocompuestos.

Los frutos de ají pueden variar en su forma, color y tamaño; también pueden ser dulces, como el pimentón (*C. annuum*) verde, o picantes, como los chiles (*C. frutescens*) y las cayenas. El color puede ser verde, amarillo, naranja o rojo, correspondiendo a diferentes etapas de maduración y a la capacidad de sintetizar carotenoides (Buckenhüskes, 2003). Así como la variación morfológica en frutos es sobresaliente, también lo es en términos de compuestos bioactivos. Entre los compuestos más importantes del ají se encuentran los capsaicinoides, pues se ha determinado que aproximadamente el 90 % de estos está representado por la capsaicina y la dihidrocapsaicina. Dichos compuestos son los que dan la sensación de picante o ardor, la cual es una de las principales características que hacen atractivo el fruto del ají (Giuffrida et al., 2013; Osorio-Barraza et al., 2021; Saleh et al., 2018) entre las especies del género.

C. annuum es la especie más variable en pungencia, las especies *C. chinense* y *C. frutescens* son las que presentan niveles de pungencia más altos, mientras que *C. baccatum* presenta el nivel más bajo de pungencia, y *C. pubescens* un nivel leve (Saleh et al., 2018). La composición nutricional y los compuestos bioactivos, como fenoles, flavonoides, carotenoides, capsaicinoides y vitaminas, pueden variar dependiendo de la especie y la variedad de ají. Otros factores que influyen sobre estas cualidades son la etapa de maduración, el ambiente, el manejo del cultivo, el genotipo o la localización geográfica del cultivar, así como la época de cosecha, y las condiciones de almacenamiento y procesamiento poscosecha (Osorio-Barraza et al., 2021). Algunas investigaciones han mostrado que se encuentran mayores contenidos de vitamina C en frutos rojos de ají en estado maduro, en comparación con los de color verde (Marín et al., 2004).

También vale la pena explorar la diversidad genética intrínseca a las especies para usos gastronómicos y bioeconómicos innovadores. Los ajís son consumidos en polvo, en crudo o como colorante, siendo usados en la industria de la pasta, en la producción de especias o como acompañantes en la preparación de guisos y sopas. También se emplean en la elaboración de platillos gastronómicos de alto valor, en asados, salsas y encurtidos (Dhamodharan et al., 2022; Osorio-Barraza et al., 2021). Varios de estos rasgos culinarios podrían ser objeto de selección genética.



Actualmente, los ajís también se usan como planta medicinal debido a sus componentes benéficos para la salud. Así, se usan para enfermedades como cáncer, en procesos antiinflamatorios y en otras dolencias no transmisibles. Concretamente, se utilizan en la producción de extractos en la industria farmacéutica y cosmética; en áreas agrícolas, para la producción de bioinsumos, y en la agroindustria alimentaria, en la preparación de diferentes derivados para la generación de valor agregado en calidades de la fruta que no puedan ser comercializadas por su bajo estándar de calidad (Baenas et al., 2019; Saleh et al., 2018). Explorar la variación genética subyacente a esta diversidad de fenotipos

y usos no convencionales es una vía de investigación promisorio. Por ejemplo, si bien los compuestos defensivos capsianósidos son producidos en tejidos vegetativos, pueden tener funciones importantes para la resistencia a plagas y enfermedades, y también como agentes citotóxicos.

Híbridos de ají (*Capsicum* spp.) con perfiles mejorados de compuestos bioactivos y su impacto en la agroindustria

El desarrollo de nuevos híbridos de ají (*Capsicum* spp.) puede tener un impacto significativo en la agroindustria, al permitir el desarrollo de nuevos



productos con características mejoradas en términos de compuestos bioactivos, calidad nutricional y atributos sensoriales (Pinar et al., 2023). Estas innovaciones pueden generar nuevas oportunidades para impulsar productividad y competitividad. Karaman et al. (2023) realizaron un estudio utilizando 104 poblaciones de RIL derivadas de un cruce entre *C. annuum* (pimiento largo) como progenitor femenino y *C. frutescens* (PI 281420) como progenitor masculino, junto con los padres y dos cultivares estándar de pimiento de la región de Kahramanmaraş (Turquía) (Bozok KM1 y Maraş 1 KM2), con el objetivo de estudiar la herencia de caracteres de interés e identificar genes o regiones

genómicas importantes. Los hallazgos de este estudio (tabla 2.4) destacan el éxito del enfoque de hibridación para generar genotipos con propiedades bioactivas mejoradas. Las RIL desarrolladas en esta investigación representan una valiosa fuente de compuestos biofuncionales con una importante capacidad antioxidante, lo cual los convierte en una materia prima atractiva para la creación de productos funcionales. Estos resultados indican la posibilidad de generar híbridos con perfiles bioquímicos mejorados en relación con los progenitores, lo que podría tener implicaciones importantes para la selección y el desarrollo de variedades con características nutricionales y funcionales mejoradas.



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Tabla 2.4. Genotipos con propiedades bioactivas mejoradas

Compuestos bioactivos	Genotipos	Cantidad	Parental femenino	Parental masculino
CFT (mg GAE/g)	6	17,15	14,29	9,79
	17	16,32		
	54	16,54		
CTF (mg CE/g)	19	5,36	3,73	3,76
	43	5,46		
TC (mg CE/g)	11	1,53	1,17	0,59
	25	1,48		
	67	1,49		
TH (mg TAE/g)	6	58,83	5,84	3,74
	85	52,57		
	90	63,67		
CTA (mg/kg)	83	364,6	74,9	159,5
	90	516,6		
Capsaicina (mg/100 g)	71	1405,9	570,9	674,9
	43	1346		
	34	1321,2		
Dihidrocapsaicina (mg/100 g)	43	640,4	138,3	297,5
	71	597,9		
	38	538,5		

CFT: contenido fenólico total; CTF: contenido total de flavonoides; TC: tanino condensado; TH: tanino hidrolizable; CTA: contenido total de antocianinas. Cuantificaciones en peso seco.

Fuente: Elaboración propia con base en Karaman et al. (2023)

Por otro lado, Souza et al. (2022) estudiaron la estabilidad de los compuestos bioactivos sometidos a diferentes métodos de secado de los híbridos Hetényi (*C. frutescens*), Unikal (*C. annuum*) y Unijol (*C. annuum* x *C. chinense*) desarrollados por la compañía Univer Product Enterprise, ubicada en Hungría, a través de un programa de mejoramiento que involucró el cruce de genotipos húngaros tradicionales con el habanero. Los resultados (tabla 2.5) demostraron que el genotipo Unijol presentó una retención mayor tanto de capsaicina como de carotenoides, en comparación con Hetényi y Unikal, lo que sugiere una mayor resistencia al calor y al estrés oxidativo. Además, el secado natural resultó

en una mejor retención de carotenoides y capsaicoides, en comparación con los métodos de secado térmico para todos los híbridos, lo cual resalta la importancia de las condiciones de procesamiento suaves para preservar los compuestos beneficiosos. Es importante destacar que los carotenoides, al formar micelas con la fase lipídica, aumentan su estabilidad frente a la enzima lipoxigenasa, lo que conduce a una conservación más duradera del color en los productos (Pinar et al., 2023). Estos hallazgos reflejan la importancia de la adecuada selección de genotipos y métodos de secado para el desarrollo de productos agroindustriales secos de alta calidad.

Tabla 2.5. Contenido de compuestos bioactivos en los diferentes híbridos

Híbrido	Compuesto bioactivo	Contenido inicial (mg/g)	Retención de secado natural (%)	Retención de secado térmico (%)
Hetényi	Carotenoides totales	6,05	53	43-46
	Capsaicinoides totales	4,56	86	58-78
Unikal	Carotenoides totales	4,46	77	52-59
	Capsaicinoides totales	3,54	46	35-40
Unijol	Carotenoides totales	4,10	138	76-82
	Capsaicinoides totales	31,47	93	67-71

Fuente: Elaboración propia con base en Souza et al. (2022)





Otro estudio, realizado por Bal et al. (2024), revela una variabilidad genética sustancial entre los padres y los híbridos para los caracteres de ácido ascórbico, contenido de capsaicina, contenido de oleorresina y β -caroteno, en el cruce medio dialélico 6×6 de ají. La presencia de interacciones significativas entre padres e híbridos sugiere que los efectos genéticos no aditivos desempeñan un papel en la expresión de estos rasgos, lo que brinda oportunidades para explorar la heterosis y seleccionar híbridos superiores con altos niveles de compuestos.

Estos avances en el desarrollo de híbridos de ají con perfiles mejorados de compuestos bioactivos tienen implicaciones significativas para la agroindustria (tabla 2.4). La disponibilidad de va-

riedades con mayor valor nutricional y funcional puede impulsar la creación de nuevos productos alimenticios y nutracéuticos, así como mejorar la calidad y la competitividad de los productos existentes. Además, la incorporación de características de resistencia a enfermedades y tolerancia al estrés en estos híbridos puede contribuir a una mayor sostenibilidad y rentabilidad en la producción de este material.

En conclusión, la continua investigación y colaboración entre fitomejoradores, científicos y la industria será fundamental para capitalizar estos avances y desarrollar variedades de ají que combinen altos rendimientos, calidad superior y beneficios para la salud, lo que a su vez impulsará la innovación y el crecimiento en este sector.

Rutas biosintéticas de los principales biocompuestos en los frutos de ají

El género *Capsicum* es conocido por su rica composición química, que incluye capsaicinoides, carotenoides, flavonoides y compuestos volátiles, que contribuyen a la pungencia, el color y el aroma característicos de los frutos de ají y, además, les confieren propiedades destacables en lo relacionado con la salud preventiva. A continuación, se detallan algunas de las rutas biosintéticas de las principales familias de compuestos reportados en *Capsicum*.



Foto: Esteban Castaño Llanos

Capsaicinoides

La biosíntesis de los capsaicinoides, principalmente capsaicina y dihidrocapsaicina, ocurre predominantemente en la placenta del fruto, a través de la ruta de los fenilpropanoides. Este proceso implica la condensación de vanillina, derivada de la vía del ácido cinámico, con precursores acílicos provenientes de ácidos grasos. Los pasos clave en su biosíntesis incluyen transaminación, descarboxilación, elongación y reducción de los compuestos intermediarios. La elongación, promovida por la malonil-CoA, puede ocurrir en dos o hasta cuatro ciclos, dependiendo del capsaicinoide que se esté sintetizando. Así, la capsaicina se forma a partir del ácido 8-metil-trans-6-nonenóico, mientras que la dihidrocapsaicina proviene del ácido 8-metilnonanoico (Cheok et al., 2017; Fujiwake et al., 1982).



Carotenoides

Los carotenoides son una clase de compuestos tetraterpenoides que proporcionan los colores amarillos y naranjados de los frutos de *Capsicum*. Su biosíntesis comienza con la ruta del ácido mevalónico, que se convierte en los precursores de C₅, difosfato de isopentenilo y pirofosfato de dimetilalilo. Estos precursores se condensan para formar geranilgeranil difosfato, el precursor del fitoeno, que luego se desatura e isomeriza para producir licopeno (rojo) y, posteriormente, α -caroteno y β -caroteno (naranja) (Valduga et al., 2009). En algunos casos, estos carotenos pueden hidroxilarse para formar xantofilas de color amarillo, como la luteína y la zeaxantina. Es de resaltar que la regulación de la síntesis de carotenoides está influenciada por factores genéticos y ambientales, y que la maduración del fruto juega un papel crucial en la acumulación de estos compuestos (Gómez-García & Ochoa-Alejo, 2013).



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza



Foto: Esteban Castaño Llanos

Flavonoides

Los flavonoides en los frutos de *Capsicum* contribuyen a sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y a algunas de sus coloraciones particulares. La biosíntesis de flavonoides se inicia con el catabolismo de la fenilalanina, el cual es catalizado por la fenilalanina liasa (PAL), la hidroxilasa del ácido cinámico (C4H) y la cumaril-CoA ligasa (4CL), para formar el sustrato inicial para la síntesis de flavonoides: la p-cumaroil-CoA. Tras las reacciones de desaturación e isomerización catalizadas por la chalcona sintasa (CHS) y la chalcona isomerasa (CHI), se produce naringenina a partir de p-cumaroil-CoA y 3 malonil-CoA. La naringenina es un intermediario central para la biosíntesis de flavonoides, y es catalizada para formar diferentes tipos de flavonoides mediante una serie de enzimas, como flavonoide 3-hidroxilasa (F3H), flavonoide

3'-hidroxilasa (F3'H), flavonoide 3'5'-hidroxilasa (F3'5'H), flavonoide sintasa (FNS), flavonol sintasa (FLS), dihidroflavonol 4-reductasa (DFR), antocianidina sintasa (ANS) y antocianina reductasa (ANR). Sin embargo, las antocianinas producidas en el citoplasma son inestables y requieren una modificación adicional de la glucosilación por parte de la UDP-glucosiltransferasa (UGT), y, finalmente, se transfieren a la vacuola para su almacenamiento por la glutatión S-transferasa (GST) (Jaakola, 2013). Los flavonoides están ampliamente involucrados en los procesos fisiológicos de las plantas, incluyendo la atracción de polinizadores; la interacción entre plantas, microorganismos y animales; la protección de las plantas contra el daño de los rayos UV (Ferrer et al., 2008), y la formación de colores en flores, frutos y semillas (Y. Liu et al., 2023).



Foto: Esteban Castaño Llanos

Compuestos volátiles

Los componentes orgánicos volátiles (COV, por su sigla en inglés) son metabolitos secundarios que se producen principalmente por vías metabólicas de ácidos grasos y terpenos (Liu et al., 2021). En particular, los aldehídos, alcoholes y ésteres se sintetizan a partir de vías metabólicas de ácidos grasos. Primero, los glicéridos son catalizados por lipasas para formar el sustrato de partida, es decir, ácidos grasos libres. A las reacciones de oxidación, craqueo y deshidrogenación catalizadas por la desaturasa de ácidos grasos (FAD), la lipoxigenasa (LOX), la hidroperóxido liasa (HPL) y la alcohol deshidrogenasa (ADH), les sigue la producción de aldehídos y alcoholes a partir de ácidos grasos insaturados. Los alcoholes pueden ser catalizados aún más por la alcohol aciltransferasa (AAT), para formar ésteres de cadena ramificada (Beekwilder et al., 2004). Sin embargo, la síntesis de lactonas es más complicada que la de los ésteres de cadena ramificada. Primero, los ácidos grasos necesitan formar cuatro o cinco intermedios de hidroxiácidos grasos mediante β -oxidación y, posteriormente, formar lactonas mediante autociclación o catálisis con AAT (Sánchez et al., 2013). Sardé et al. (2018) identificaron ocho genes LOX potenciales, de los cuales se predijo que CaLOX6 y CaLOX7 estarían involucrados en la biosíntesis de volátiles de hojas verdes. Experimentos previos de análisis de expresión génica indican que la alta expresión de ADH, HPL y LOX inducida por jasmonato de metilo y hexanal promovió la producción de α -farneseno y ácido hexanoico en la fruta (Padmanabhan et al., 2020; Magalhães et

al., 2021). Además de regular la producción de COV, también se ha informado que la LOX participa en el estrés abiótico, la defensa de patógenos microbianos y las reacciones de muerte celular (Y. Liu et al., 2023). Particularmente en *Capsicum* spp., la biosíntesis de compuestos volátiles está estrechamente relacionada con las vías metabólicas de los ácidos grasos y los terpenoides. La alta expresión de genes en estas vías metabólicas es clave para determinar la acumulación de volátiles en el fruto del pimiento. Además, Liu et al. (2023) han referenciado una red reguladora de la biosíntesis de volátiles, identificando genes candidatos potenciales que pueden estar involucrados en la biosíntesis de estos compuestos, con lo que han descubierto que las auxinas pueden regular la acumulación de volátiles en los frutos de pimiento, al inducir la alta expresión de proteínas sensibles a estas auxinas u otros factores.

Es así que comprender la arquitectura genómica y los mecanismos biosintéticos de los principales biocompuestos presentes en los frutos de *Capsicum* es importante para entender, optimizar y materializar sus aplicaciones agroindustriales y nutricionales. Así, la diversidad genética y las condiciones ambientales que condicionan su expresión desempeñan roles críticos para la diversidad metabólica, la concentración y las vocaciones de uso de estos materiales. Entre estos factores destaca la necesidad de enfoques específicos basados en el mercado para el cultivo y procesamiento de los frutos de ají



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza



Biotecnología y edición genética en ajís

La edición genética y la biotecnología han revolucionado el campo del mejoramiento de los ajís, ofreciendo herramientas poderosas para modificar de manera precisa el genoma de *Capsicum*, y así mejorar sus características agronómicas y nutricionales. CRISPR-Cas9, una de las técnicas más revolucionarias de los últimos años, permite a los investigadores modificar o eliminar genes que causan rasgos no deseados, así como editar genes beneficiosos a partir de otros genotipos y especies de ají.

De este modo, la generación de variedades es más rápida y eficiente que mediante métodos clásicos de selección e hibridación. El proceso de desarrollo de nuevas variedades de ají se ha acelerado significativamente gracias a la precisión sin precedentes de la edición genética. Por otro lado, la producción de plantas transgénicas con características mejo-

radas es otro ejemplo de la aplicación de la biotecnología en el cultivo de *Capsicum*. Por ejemplo, mediante la introducción de genes de resistencia provenientes de otras especies, se han desarrollado variedades de ají transgénicas con resistencia a enfermedades como el virus del mosaico y el tizón bacteriano. Además, se están utilizando técnicas transgénicas para introducir genes específicos relacionados con otros rasgos de interés, como la calidad del fruto y la tolerancia a estrés abiótico. A pesar de los avances prometedores en la edición genética y la biotecnología de los ajís, también hay problemas éticos que deben abordarse. En el caso de este fruto, es fundamental evaluar los riesgos ambientales y socioeconómicos asociados a la liberación de variedades transgénicas, especialmente por la posibilidad de flujo génico hacia poblaciones silvestres de *Capsicum*, y el eventual impacto sobre la diversidad genética local y los sistemas produc-



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

tivos tradicionales. Dichos riesgos deben analizarse a la luz de la realidad agrícola colombiana —en la que predomina el cultivo de variedades nativas y criollas—, así como de los marcos regulatorios nacionales sobre organismos genéticamente modificados. Además, se requiere una regulación adecuada para garantizar la seguridad de los alimentos derivados de plantas transgénicas y para preservar la diversidad genética de los ajís, tanto cultivados como silvestres. Afortunadamente, la tecnología CRISPR-Cas9 (Doudna & Charpentier, 2014) trasciende este dilema al estar libre de transgén, con lo que perpetúa únicamente, en las líneas germinales, modificaciones intra e interespecíficas que también podrían obtenerse mediante esquemas de selección, hibridación y retrocruzamiento clásicos. En términos de cultivo de tejidos, la utilización de esta técnica para la propagación masiva de plantas es posible gracias a que las células vegetales son

totipotentes, lo que permite que una planta se pueda desarrollar a partir de una sola célula. La aplicación de esta técnica de cultivo es ampliamente usada para la producción de metabolitos secundarios (Kehie et al., 2016). En el caso particular de *Capsicum*, dicha técnica ha sido utilizada con el fin de producir metabolitos secundarios, como capsaicina y dihidrocapsaicina (Gutiérrez-Carbajal et al., 2010; Haque & Ghosh, 2018; Kehie et al., 2012, 2014, 2016; Sudha & Ravishankar, 2002). La producción *in vitro* de capsaicina se ha logrado mediante inducción de estrés osmótico (Kehie et al., 2012) y estrés de pH (Kehie et al., 2014), siendo estos componentes controlados directamente en el medio de cultivo. Por otra parte, la técnica de cultivo *in vitro* es ampliamente utilizada en procesos de mejoramiento no convencionales, como la transferencia de genes y la edición de genomas, lo que permite acelerar los resultados alcanzados.



Reflexión

Como se ha mostrado a lo largo de este capítulo, la amplia diversidad genética presente en el banco de germoplasma de *Capsicum* representa una base estratégica para el fitomejoramiento orientado a las condiciones agroecológicas y las demandas del mercado colombiano. Los retos actuales del mejoramiento genético en ají incluyen la integración de información genómica y fenotípica para acelerar la identificación de alelos asociados con resistencia a enfermedades, tolerancia a estrés abiótico, y atributos de calidad sensorial y nutricional. La adopción de enfoques de selección asistida por marcadores, modelamiento predictivo y edición génica ofrece oportunidades para desarrollar variedades adaptadas y competitivas, siempre en articulación con los productores y el sector agroindustrial. En este contexto, la investigación, el desarrollo y la innovación deben enfocarse en traducir el conocimiento científico en soluciones aplicables que fortalezcan la productividad y la sostenibilidad del sistema productivo de ají en Colombia. En el capítulo III se complementará esta información con la caracterización fenotípica de los materiales del banco de germoplasma, destacando los rasgos morfológicos de mayor interés para los programas de mejoramiento.



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Referencias

- Ahn, Y. K., Manivannan, A., Karna, S., Jun, T. H., Yang, E. Y., Choi, S., Kim, J. H., Kim, D. S., & Lee, E. S. (2018). Whole genome resequencing of *Capsicum baccatum* and *Capsicum annuum* to discover single nucleotide polymorphism related to powdery mildew resistance. *Scientific Reports*, 8(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23279-5>
- Agronet (2024). *Estadísticas - Participación departamental en la producción de ají*. https://agronet.gov.co/estadisticas/agricola?producto_nacional=07030101&anio_inicio_nacional=2015&anio_fin_nacional=2024&ciclo_nacional_filter=
- Alam, O., & Purugganan, M. D. (2024). Domestication and the evolution of crops: variable syndromes, complex genetic architectures, and ecological entanglements. *The Plant Cell*, 36(5), 1227-1241. <https://doi.org/10.1093/plcell/koae013>
- Baenas, N., Belović, M., Ilic, N., Moreno, D. A., & García-Viguera, C. (2019). Industrial use of pepper (*Capsicum annuum* L.) derived products: technological benefits and biological advantages. *Food Chemistry*, 274, 872-885. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.047>
- Bal, S., Karak, C., Mandal, A. K., & Chattopadhyay, A. (2024). Breeding chili pepper for simultaneous improvement in leaf curl virus and anthracnose disease tolerance and commercially important traits. *International Journal of Vegetable Science*, 30(1), 91-109. <https://doi.org/10.1080/19315260.2023.2301348>
- Balasankar, D., Praneetha, S., Arumugam, T., Manivannan, N., Jeyakumar, P., & Arulmozhiselvan, K. (2017). Assessment of salinity tolerance in chilli (*Capsicum annuum* L.) genotypes. *International Journal of Chemical Studies*, 5(6), 1194-1198. <https://www.chemijournal.com/archives/?year=2017&vol=5&issue=6&ArticleId=1446&si=false>
- Banga, S. S., & Banga, S. K. (Eds.). (1998). *Hybrid cultivar development*. Springer.
- Barboza, G. E., Carrizo García, C., Leiva González, S., Scaldaferro, M., & Reyes, X. (2019). Four new species of *Capsicum* (Solanaceae) from the tropical Andes and an update on the phylogeny of the genus. *PLoS One*, 14(1), 1-26. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209792>
- Beekwilder, J., Álvarez-Huerta, M., Neef, E., Verstappen, F. W., Bouwmeester, H. J., & Aharoni, A. (2004). Functional characterization of enzymes forming volatile esters from strawberry and banana. *Plant Physiology*, 135(4), 1865-1878. <https://doi.org/doi:10.1104/pp.104.042580>
- Bhutia, N. D., Seth, T., Shende, V. D., Dutta, S., & Chattopadhyay, A. (2015). Estimation of heterosis, dominance effect and genetic control of fresh fruit yield, quality and leaf curl disease severity traits of chilli pepper (*Capsicum annuum* L.). *Scientia Horticulturae*, 182, 47-55. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.11.017>
- Bosland, P. W., & Votava, E. J., (2012). *Peppers: vegetable and spice capsicums*. CABI.
- Buckenhüskes, H. J. (2003). Current requirements on paprika powder for food industry. En A. K. De (Ed.), *Capsicum: the genus 'Capsicum'* (pp. 223-230). Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1201/9780203381151>



- Burbano-Erazo, E., León-Pacheco, R. I., Cordero-Cordero, C. C., López-Hernández, F., Cortés, A. J., & Tofiño-Rivera, A. P. (2021). Multi-environment yield components in advanced common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) × tepary bean (*P. Acutifolius* A. Gray) interspecific lines for heat and drought tolerance. *Agronomy*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy11101978>
- Byrne, D. H. (2012). Trends in fruit breeding. En M. L. Badenes, & D. H. Byrne, *Fruit Breeding* (pp. 3-36). Springer. <https://avys.omu.edu.tr/storage/app/public/userdar/120378/Fruit%20Breeding%20M.L.%20Badenes,%20D.H.%20Byrne%202012.pdf>
- Carrizo García, C., Barboza, G. E., Palombo, N., & Weiss-Schneeweiss, H. (2022). Diversification of chiles (*Capsicum*, Solanaceae) through time and space: new insights from genome-wide RAD-seq data. *Frontiers in Genetics*, 13, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.1030536>
- Chaudhary, A., Kumar, R., & Solankey, S. S. (2013). Estimation of heterosis for yield and quality components in chilli (*Capsicum annum* L.). *African Journal of Biotechnology*, 12(47), 6605-6610. <https://doi.org/10.5897/ajb2013.13069>
- Cheng, J., Zhao, Z., Li, B., Qin, C., Wu, Z., Trejo-Saavedra, D. L., Luo, X., Cui, J., Rivera-Bustamante, R. F., Li, S., & Hu, K. (2016). A comprehensive characterization of simple sequence repeats in pepper genomes provides valuable resources for marker development in *Capsicum*. *Scientific Reports*, 6, 1-12. <https://doi.org/10.1038/srep18919>
- Cheok, C. Y., Sobhi, B., Adzahan, N. M., Bakar, J., Rahman, R. A., Karim, M. S. A., & Ghazali, Z. (2017). Physicochemical properties and volatile profile of chili shrimp paste as affected by irradiation and heat. *Food Chemistry*, 216, 10-18. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.011>
- Colonna, V., D'Agostino, N., Garrison, E., Albrechtsen, A., Meisner, J., Facchiano, A., Cardi, T., & Tripodi, P. (2019). Genomic diversity and novel genome-wide association with fruit morphology in *Capsicum*, from 746k polymorphic sites. *Scientific Reports*, 9(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46136-5>
- Cortés, A. J., & Barnaby, J. Y. (2023). Editorial: harnessing genebanks: high-throughput phenotyping and genotyping of crop wild relatives and landraces. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1-6. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1149469>
- Cortés, A. J., & Blair, M. W. (2018). Genotyping by sequencing and genome-environment associations in wild common bean predict widespread divergent adaptation to drought. *Frontiers in Plant Science*, 9, 128. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00128>
- Cortés, A. J., Cornille, A., & Yockteng, R. (2022). Evolutionary genetics of crop-wild complexes. *Genes*, 13(1), 1-5. <https://doi.org/10.3390/genes13010001>
- Cortés, A. J., & Du, H. (2023). Molecular genetics enhances plant breeding. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(12), 1-9. <https://doi.org/10.3390/ijms24129977>
- Cortés, A. J., & López-Hernández, F. (2021). Harnessing crop wild diversity for climate change adaptation. *Genes*, 12(5), 783. <https://doi.org/10.3390/genes12050783>
- Cortés, A. J., López-Hernández, F., & Blair, M. W. (2022). Genome-environment associations, an innovative tool for studying heritable evolutionary adaptation in orphan crops and wild relatives. *Frontiers in Genetics*, 13, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.910386>

- Cortés, A. J., Skeen, P., Blair, M. W., & Chacón-Sánchez, M. I. (2018). Does the genomic landscape of species divergence in phaseolus beans coerce parallel signatures of adaptation and domestication? *Frontiers in Plant Science*, 871, 1-18. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01816>
- De Oliveira, F. de A., Duarte, S. N., De Medeiros, J. F., Aroucha, E. M. M., & Dias, N. da S. (2015). Quality in the pepper under different fertigation managements and levels of nitrogen and potassium. *Revista Ciência Agronômica*, 46(4), 764-773. <https://scite.ai/reports/quality-in-the-pepper-under-PGWR5k>
- Dhamodharan, K., Vengaimaran, M., & Sankaran, M. (2022). Pharmacological properties and health benefits of *Capsicum* species: a comprehensive review. En O. B. Baylen Yllano (Ed.), *Capsicum: current trends and perspectives* (pp. 1-21). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.104906>
- Doudna, J. A., & Charpentier, E. (2014). The new frontier of genome engineering with CRISPR-Cas9. *Science*, 346(6213). <https://doi.org/10.1126/science.1258096>
- Duranova, H., Valkova, V., & Gabriny, L. (2022). Chili peppers (*Capsicum* spp.): the spice not only for cuisine purposes: an update on current knowledge. *Phytochemistry Reviews*, 21(4), 1379-1413. <https://doi.org/10.1007/s11101-021-09789-7>
- Espichán, F., Rojas, R., Quispe, F., Cabanac, G., & Marti, G. (2022). Metabolomic characterization of 5 native Peruvian chili peppers (*Capsicum* spp.) as a tool for species discrimination. *Food Chemistry*, 386. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132704>
- Ferrer, J.-L., Austin, M. B., Stewart Jr., C., & Noel, J. P. (2008). Structure and function of enzymes involved in the biosynthesis of phenylpropanoids. *Plant Physiology and Biochemistry*, 46(3), 356-370. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2007.12.009>
- Fujiwake, H., Suzuki, T., & Iwai, K. (1982). Capsaicinoid formation in the protoplast from the placenta of *Capsicum* Fruits. *Agricultural and Biological Chemistry*, 46(10), 2591-2592. <https://doi.org/10.1271/bbb1961.46.2591>
- Fumia, N., Kantar, M., Lin, Y. P., Schafleitner, R., Lefebvre, V., Paran, I., Börner, A., Diez, M. J., Prohens, J., Bovy, A., Boyaci, F., Pasev, G., Tripodi, P., Barchi, L., Giuliano, G., & Barchenger, D. W. (2023). Exploration of high-throughput data for heat tolerance selection in *Capsicum annuum*. *Plant Phenome Journal*, 6(1), e20071. <https://doi.org/10.1002/ppj2.20071>
- Giuffrida, D., Dugo, P., Torre, G., Bignardi, C., Cavazza, A., Corradini, C., & Dugo, G. (2013). Characterization of 12 *Capsicum* varieties by evaluation of their carotenoid profile and pungency determination. *Food Chemistry*, 140(4), 794-802. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.060>
- Gómez-García, M. del R., & Ochoa-Alejo, N. (2013). Biochemistry and molecular biology of carotenoid biosynthesis in chili peppers (*Capsicum* spp.). *International Journal of Molecular Sciences*, 14(9), 19025-19053. <https://doi.org/10.3390/ijms140919025>
- Guevara-Escudero, M., Osorio, A. N., & Cortés, A. J. (2021). Integrative pre-breeding for biotic resistance in forest trees. *Plants*, 10(10), 1-13. <https://doi.org/10.3390/plants10102022>
- Gutaker, R. M., & Purugganan, M. D. (2024). Adaptation and the geographic spread of crop species. *Annual Review of Plant Biology*, 75, 679-706. <https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-060223-030954>



- Gutiérrez-Carbajal, M. G., Monforte-González, M., Miranda-Ham, M. de L., Godoy-Hernández, G., & Vázquez-Flota, F. (2010). Induction of capsaicinoid synthesis in *Capsicum chinense* cell cultures by salicylic acid or methyl jasmonate. *Biologia Plantarum*, 54, 430-434. <https://doi.org/10.1007/s10535-010-0078-z>
- Han, K., Jeong, H. J., Yang, H. B., Kang, S. M., Kwon, J. K., Kim, S., Choi, D., & Kang, B. C. (2016). An ultra-high-density bin map facilitates high-throughput QTL mapping of horticultural traits in pepper (*Capsicum annuum*). *DNA Research*, 23(2), 81-91. <https://doi.org/10.1093/dnares/dsv038>
- Han, K., Lee, H.-Y., Ro, N.-Y., Hur, O.-S., Lee, J.-H., Kwon, J.-K., & Kang, B.-C. (2018). QTL mapping and GWAS reveal candidate genes controlling capsaicinoid content in *Capsicum*. *Plant Biotechnology Journal*, 16(9), 1546-1558. <https://doi.org/10.1111/pbi.12894>
- Haque, S. M., & Ghosh, B. (2018). An improved micropropagation protocol for the recalcitrant plant *Capsicum* - a study with ten cultivars of *Capsicum* spp. (*C. annuum*, *C. chinense*, and *C. frutescens*) collected from diverse geographical regions of India and Mexico. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 93(1), 91-99. <https://doi.org/10.1080/14620316.2017.1345331>
- Herath, H. M. S. N., Rafii, M. Y., Ismail, S. I., Nakasha, J. J., & Ramlee, S. I. (2021). Improvement of important economic traits in chilli through heterosis breeding: a review. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 96(1), 14-23. <https://doi.org/10.1080/14620316.2020.1780162>
- Hill, T. A., Ashrafi, H., Reyes-Chin-Wo, S., Yao, J. Q., Stoffel, K., Truco, M. J., Kozik, A., Michelmore, R. W., & Van Deynze, A. (2013). Characterization of *Capsicum annuum* genetic diversity and population structure based on parallel polymorphism discovery with a 30K unigene pepper GeneChip. *PLoS ONE*, 8(2), e56200. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056200>
- Hong, J.-P., Ro, N., Lee, H.-Y., Kim, G. W., Kwon, J.-K., Yamamoto, E., & Kang, B.-C. (2020). Genomic selection for prediction of fruit-related traits in pepper (*Capsicum* spp.). *Frontiers in Plant Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.570871>
- Hulse-Kemp, A. M., Ashrafi, H., Plieske, J., Lemm, J., Stoffel, K., Hill, T., Luerssen, H., Pethiyagoda, C. L., Lawley, C. T., Ganai, M. W., & Van Deynze, A. (2016). A HapMap leads to a *Capsicum annuum* SNP Infinium array: a new tool for pepper breeding. *Horticulture Research*, 3, 16036. <https://doi.org/10.1038/hortres.2016.36>
- Ibiza, V. P., Blanca, J., Cañizares, J., & Nuez, F. (2012). Taxonomy and genetic diversity of domesticated *Capsicum* species in the Andean region. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 59(6), 1077-1088. <https://doi.org/10.1007/s10722-011-9744-z>
- Jaakola, L. (2013). New insights into the regulation of anthocyanin biosynthesis in fruits. *Trends in Plant Science*, 18(9), 477-483. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23870661/>
- Jaiswal, V., Gahlaut, V., Kumar, N., & Ramchiary, N. (2021). Genetics, genomics and breeding of chili pepper *Capsicum frutescens* L. and Other *Capsicum* Species. En J. M. Al-Khayri, S. Mohan Jain, & D. V. Johnson (Eds.), *Advances in Plant Breeding Strategies: Vegetable Crops* (pp. 59-86). Springer <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-66961-4>
- Jang, S., Park, M., Lee, D.-G., Lim, J.-H., Jung, J.-W., & Kang, B.-C. (2021). Breeding *Capsicum chinense* lines with high levels of capsaicinoids and capsinoids in the fruit. *Agriculture (Switzerland)*, 11(9), 819. <https://doi.org/10.3390/agriculture11090819>

- Karaman, K., Pinar, H., Ciftci, B., & Kaplan, M. (2023). Characterization of phenolics and tocopherol profile, capsaicinoid composition and bioactive properties of fruits in interspecies (*Capsicum annuum* x *Capsicum frutescens*) recombinant inbred pepper lines (RIL). *Food Chemistry*, 423, 136173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136173>
- Kaushik, P., Dhaliwal, M. S., Jindal, S. K., Srivastava, A., Tyagi, V., Brar, N. S., & Rana, M. K. (2015). Heterosis and leaf curl virus resistance in rainy season tomato under North Indian conditions. *African Journal of Agricultural Research*, 10(29), 2763-2772. <https://academicjournals.org/journal/AJAR/article-full-text-pdf/36B0B2954173>
- Kehie, M., Kumaria, S., & Tandon, P. (2012). Osmotic stress induced-capsaicin production in suspension cultures of *Capsicum chinense* Jacq. cv. Naga King Chili. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34(5), 2039-2044. <https://doi.org/10.1007/s11738-012-0991-1>
- Kehie, M., Kumaria, S., & Tandon, P. (2014). Manipulation of culture strategies to enhance capsaicin biosynthesis in suspension and immobilized cell cultures of *Capsicum chinense* Jacq. cv. Naga King Chili. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 37(6), 1055-1063. <https://doi.org/10.1007/s00449-013-1076-2>
- Kehie, M., Kumaria, S., & Tandon, P. (2016). Biotechnological enhancement of capsaicin biosynthesis in cell suspension cultures of Naga King Chili (*Capsicum chinense* Jacq.). *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 39(1), 205-210. <https://doi.org/10.1007/s00449-015-1504-6>
- Khoury, C. K., Carver, D., Barchenger, D. W., Barboza, G. E., Van Zonneveld, M., Jarret, R., Bohs, L., Kantar, M., Uchanski, M., Mercer, K., Nabhan, G. P., Bosland, P. W., & Greene, S. L. (2020). Modelled distributions and conservation status of the wild relatives of chile peppers (*Capsicum* L.). *Diversity and Distributions*, 26(2), 209-225. <https://doi.org/10.1111/ddi.13008>
- Lakshmi Sahitya, U., Krishna, M. S. R., Sri Deepthi, R., Shiva Prasad, G., & Peda Kasim, D. (2018). Seed antioxidants interplay with drought stress tolerance indices in chilli (*Capsicum annuum* L.) seedlings. *BioMed Research International*, 2018, 605096. <https://doi.org/10.1155/2018/1605096>
- Liu, F., Zhao, J., Sun, H., Xiong, C., Sun, X., Wang, X., Wang, Z., Jarret, R., Wang, J., Tang, B., Xu, H., Hu, B., Suo, H., Yang, B., Ou, L., Li, X., Zhou, S., Yang, S., Liu, Z., ... Zou, X. (2023). Genomes of cultivated and wild *Capsicum* species provide insights into pepper domestication and population differentiation. *Nature Communications*, 14(1), 5487. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41251-4>
- Liu, X., Hao, N., Feng, R., Meng, Z., Li, Y., & Zhao, Z. (2021). Transcriptome and metabolite profiling analyses provide insight into volatile compounds of the apple cultivar 'Ruixue' and its parents during fruit development. *BMC Plant Biology*, 21(1), 231. <https://doi.org/10.1186/s12870-021-03032-3>
- Liu, Y., Zhou, J., Yi, C., Chen, F., Liu, Y., Liao, Y., Zhang, Z., Liu, W., & Lv, J. (2023). Integrative analysis of non-targeted metabolome and transcriptome reveals the mechanism of volatile formation in pepper fruit. *Frontiers in Genetics*, 14, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fgene.2023.1290492>
- López-Hernández, F., Burbano-Erazo, E., León-Pacheco, R. I., Cordero-Cordero, C. C., Villanueva-Mejía, D. F., Tofiño-Rivera, A. P., & Cortés, A. J. (2023). Multi-environment genome-wide association studies of yield traits in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) × Tepary bean (*P. acutifolius* A. Gray) interspecific advanced lines in humid and dry Colombian Caribbean subregions. *Agronomy*, 13(5), 1396. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13051396>



- López-Hernández, F., & Cortés, A. J. (2019). Last-generation genome-environment associations reveal the genetic basis of heat tolerance in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Frontiers in Genetics*, 10, 1-22. <https://doi.org/10.3389/fgene.2019.00954>
- Loupit, G., Valls Fonayet, J., Prigent, S., Prodhomme, D., Spilmont, A. S., Hilbert, G., Franc, C., De Revel, G., Richard, T., Ollat, N., & Cookson, S. J. (2022). Identifying early metabolite markers of successful graft union formation in grapevine. *Horticulture Research*, 9. <https://doi.org/10.1093/hr/uhab070>
- Lozada, D. N., Bosland, P. W., Barchenger, D. W., Haghshenas-Jaryani, M., Sanogo, S., & Walker, S. (2022). Chile pepper (*Capsicum*) breeding and improvement in the “Multi-Omics” era. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.879182>
- Manzur, J. P., Fita, A., Prohens, J., & Rodríguez-Burruezo, A. (2015). Successful wide hybridization and introgression breeding in a diverse set of common peppers (*Capsicum annuum*) using different cultivated ají (*C. baccatum*) accessions as donor parents. *PLoS One*, 10(12), e0144142. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144142>
- Marín, A., Ferreres, F., Tomás-Barberán, F. A., & Gil, M. I. (2004). Characterization and quantitation of antioxidant constituents of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52(12), 3861-3869. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/jf0497915>
- McCouch, S., Baute, G. J., Bradeen, J., Bramel, P., Bretting, P. K., Buckler, E., Burke, J. M., Charest, D., Cloutier, S., Cole, G., Dempewolf, H., Dingkuhn, M., Feuillet, C., Gepts, P., Grattapaglia, D., Guarino, L., Jackson, S., Knapp, S., Langridge, P., ..., Zamir, D. (2013). Agriculture: feeding the future. *Nature*, 499(7456), 23-24. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23823779/>
- McLeod, L., Barchi, L., Tumino, G., Tripodi, P., Salinier, J., Gros, C., Boyaci, H. F., Ozalp, R., Borovsky, Y., Schafleitner, R., Barchenger, D., Finkers, R., Brouwer, M., Stein, N., Rabanus-Wallace, M. T., Giuliano, G., Voorrips, R., Paran, I., & Lefebvre, V. (2023). Multi-environment association study highlights candidate genes for robust agronomic quantitative trait loci in a novel worldwide *Capsicum* core collection. *The Plant Journal*, 116(5), 1508-1528. <https://doi.org/10.1111/tpj.16425>
- Medina, C. I., Lobo, M., & Farley Gómez, A. (2006). Variabilidad fenotípica en poblaciones de ají y pimentón de la colección colombiana del género *Capsicum*. *Revista Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 7(2), 25-39. <https://www.redalyc.org/pdf/4499/449945021004.pdf>
- Meyer, R. S., & Purugganan, M. D. (2013). Evolution of crop species: genetics of domestication and diversification. *Nature Reviews Genetics*, 14, 840-852. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/nrg3605>
- Mishra, R., Rout, E., & Joshi, R. K. (2019). Identification of resistant sources against anthracnose disease caused by *Colletotrichum truncatum* and *Colletotrichum gloeosporioides* in *Capsicum annuum* L. *Proceedings of the National Academy of Sciences India Section B: Biological Sciences*, 89(2), 517-524. <https://doi.org/10.1007/s40011-018-0965-1>
- Morris, G. P., Ramu, P., Deshpande, S. P., Hash, C. T., Shah, T., Upadhyaya, H. D., Riera-Lizarazu, O., Brown, P. J., Acharya, C. B., Mitchell, S. E., Harriman, J., Glaubitz, J. C., Buckler, E. S., & Kresovich, S. (2013). Population genomic and genome-wide association studies of agroclimatic traits in sorghum. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(2), 453-458. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215985110>

- Nagaraja, C., Gokulakrishnan, J., & Ramakrishna, S. (2016). Magnitude of heterosis for quantitative characters in chilli (*Capsicum Annuum* L.) in multi-location trials. *Plant Archives*, 16(2), 607-616. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20173082986>
- Naresh, P., Rao, V. K., Lavanya Reddy, B., Anand Reddy, C., Venkatachalapathi, V., & Madhavi Reddy, K. (2016). Genetic analysis for fruit biochemical traits (capsaicinoids and carotenoids) and dry fruit yield in chilli (*Capsicum annuum* L.). *Industrial Crops and Products*, 94, 920-931. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.006>
- Nascimento, N. F. F., Nascimento, M. F., Rêgo, E. R., Lima, J. A. M., Rêgo, M. M., Finger, F. L., & Bruckner, C. H. (2015). Intraspecific cross-compatibility in ornamental pepper. *Acta Horticulturae*, (1087) (XXV International EUCARPIA Symposium Section Ornamentals: Crossing Borders), 339-344. https://www.ishs.org/ishs-article/1087_44
- Nicolai, M., Cantet, M., Lefebvre, V., Sage-Palloix, A.-M., & Palloix, A. (2013). Genotyping a large collection of pepper (*Capsicum* spp.) with SSR loci brings new evidence for the wild origin of cultivated *C. annuum* and the structuring of genetic diversity by human selection of cultivar types. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 60, 2375-2390. <https://doi.org/10.1007/s10722-013-0006-0>
- Nimmakayala, P., Abburi, V. L., Saminathan, T., Alaparthi, S. B., Almeida, A., Davenport, B., Nadimi, M., Davidson, J., Tonapi, K., Yadav, L., Malkaram, S., Vajja, G., Hankins, G., Harris, R., Park, M., Choi, D., Stommel, J., & Reddy, U. K. (2016). Genome-wide diversity and association mapping for capsaicinoids and fruit weight in *Capsicum annuum* L. *Scientific Reports*, 6, 38081. <https://doi.org/10.1038/srep38081>
- Nimmakayala, P., Abburi, V. L., Saminathan, T., Almeida, A., Davenport, B., Davidson, J., Chandra Mohan Reddy, C. V., Hankins, G., Ebert, A., Choi, D., Stommel, J., & Reddy, U. K. (2016). Genome-wide divergence and linkage disequilibrium analyses for *Capsicum baccatum* revealed by genome-anchored single nucleotide polymorphisms. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1-12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01646>
- Nsabiya, V., Ochwo-ssemakula, M., Sseruwagi, P., Ojewo, C., & Gibson, P. (2013). Combining ability for field resistance to disease, fruit yield and yield factors among hot pepper (*Capsicum annuum* L.) genotypes in Uganda. *International Journal of Plant Breeding*, 7(1), 12-21. <https://oar.icrisat.org/6368/>
- Osorio-Barraza, L. M., Manzur-Valdespino, S., Zafra-Rojas, Q. Y., Delgado-Olivares, L., Calderón-Ramos, Z. G., & Cruz Cansino, N. del S. (2021). Composición y aplicaciones clínicas de especies de chiles (*Capsicum* spp.) domesticados. *Educación y Salud*, 10(19), 249-257. <https://doi.org/10.29057/icsa.v10i19.7183>
- Padmanabhan, P., Cheema, A. S., Todd, J. F., Lim, L.-T., & Paliyath, G. (2020). Ripening responses, fruit quality and phospholipase D gene expression in bell peppers exposed to hexanal vapor. *Postharvest Biology and Technology*, 170, 111317. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111317>
- Patel, D. K., Patel, B., Patel, J. R., & Kuchhadiya, G. V. (2015). Genetic variability and character association studies for green fruit yield and quality component traits in chilli (*Capsicum annuum* var. longum (dc.) sendt.). *Electronic Journal of Plant Breeding*, 6, 472-478. <https://www.semanticscholar.org/paper/Genetic-variability-and-character-association-for-Patel-Patel/9a192eclae95527d914198c7e5946b2b6f36fbc>
- Payakhapaab, S., Boonyakiat, D., & Nikornpun, M. (2012). Evaluation of heterosis and combining ability of yield components in chillies. *Journal of Agricultural Science*, 4(11), 154-161. <https://doi.org/10.5539/jas.v4n11p154>



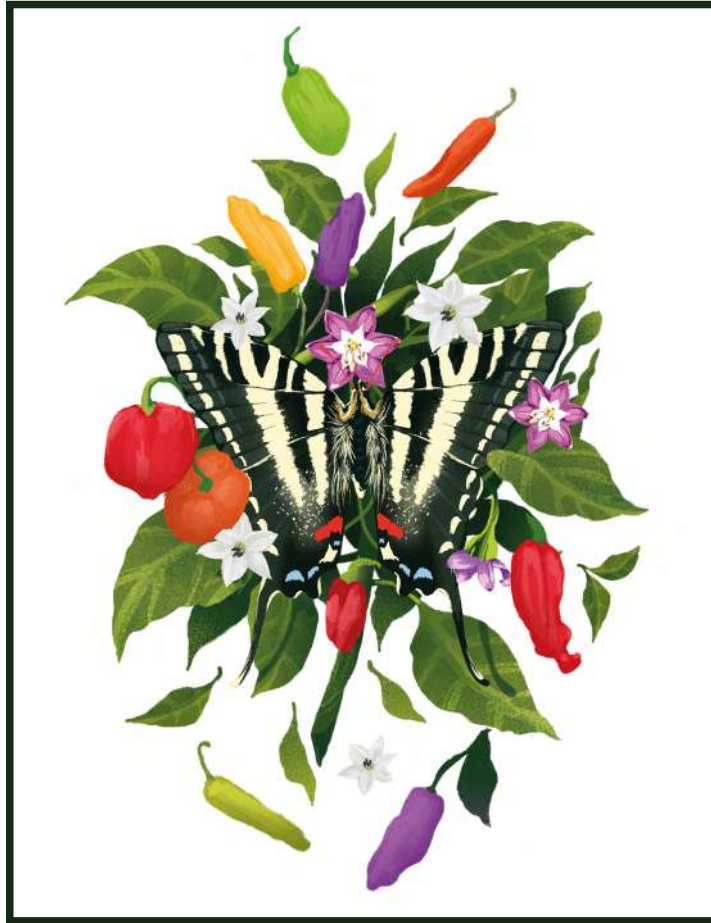
- Pereira-Dias, L., Vilanova, S., Fita, A., Prohens, J., & Rodríguez-Burruezo, A. (2019). Genetic diversity, population structure, and relationships in a collection of pepper (*Capsicum* spp.) landraces from the Spanish centre of diversity revealed by genotyping-by-sequencing (GBS). *Horticulture Research*, 6, 54. <https://doi.org/10.1038/s41438-019-0132-8>
- Pickersgill, B. (1980). *Some aspects of interespecific hibritación in Capsicum IV Euocarpia Capsicum meeting*. Wageningen.
- Pickersgill, B. (1983). Dispersal and distribution in crop plants. *Naturwiss ver Hamburg*, 7, 285-301.
- Pinar, H., Kaplan, M., Karaman, K., & Ciftci, B. (2023). Assessment of interspecies (*Capsicum annuum* x *Capsicum frutescens*) recombinant inbreed lines (RIL) for fruit nutritional traits. *Journal of Food Composition and Analysis*, 115, 104848. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104848>
- Pinto-Zapata, M. J., Correa-Álvarez, E. M., Jiménez-Mass, N., Páez-Redondo, A. R., Guzmán-Rozo, N., & Baquero-Maestre, C. (2013). *Modelo productivo del cultivo del ají topito (Capsicum spp.) para la región Caribe*. Corpoica. <https://repository.agrosavia.co/items/11aee5fc-ce10-4db6-842c-2bb6765cafda>
- Purugganan, M. D. (2022). What is domestication? *Trends in Ecology and Evolution*, 37(8), 663-671. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2022.04.006>
- Ramalho do Rêgo, E., & Monteiro do Rêgo, M. (2016). Genetics and breeding of chili pepper *Capsicum* spp. En E. Ramalho do Rêgo, M. Monteiro do Rêgo, & F. L. Finger (Eds.), *Production and breeding of chilli peppers ('Capsicum' spp.)* (pp. 57-80). Springer International. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06532-8_4
- Restrepo Gallego, M. (2007). Oleorresinas de *Capsicum* en la industria alimentaria. *Revista Lasallista de Investigacion*, 3(2), 43-47. <https://www.redalyc.org/pdf/695/69530208.pdf>
- Rezaul Karim, K. M., Rafii, M. Y., Misran, A. B., Ismail, M. F. B., Harun, A. R., Khan, M. M. H., & Chowdhury, M. F. N. (2021). Current and prospective strategies in the varietal improvement of chilli (*Capsicum annuum* L.) specially heterosis breeding. *Agronomy*, 11(11), 2217. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112217>
- Rohini, N., & Lakshmanan, V. (2016). Heterobeltiosis and inbreeding depression for fruit yield and its components in hot pepper (*Capsicum annuum* var. *annuum*). *The Asian Journal of Horticulture*, 11(1), 86-92. <https://doi.org/10.15740/HAS/TAJH/11.1/86-92>
- Saleh, B. K., Omer, A., & Teweldemedhin, B. (2018). Medicinal uses and health benefits of chili pepper (*Capsicum* spp.): a review. *MOJ Food Processing & Technology*, 6(4), 325-328. <https://doi.org/10.15406/mojfpt.2018.06.00183>
- Sánchez, G., Venegas-Calcrón, M., Salas, J. J., Monforte, A., Badenes, M. L., & Granell, A. (2013). An integrative “omics” approach identifies new candidate genes to impact aroma volatiles in peach fruit. *BMC Genomics*, 14, 343. <https://doi.org/10.1186/1471-2164-14-343>
- Sharma, V. K., Punetha, S., & Sharma, B. B. (2013). Heterosis studies for earliness, fruit yield and yield attributing traits in bell pepper. *African Journal of Agricultural Research*, 8(29), 4088-4098. https://academicjournals.org/article/article1380883122_Sharma%20et%20al.pdf
- Shirasawa, K., Ban, T., Nagata, N., & Murakana, T. (2005). Impact of genomics on *Capsicum* breeding. En N. Ramchiary, & C. Kole (Eds.), *The Capsicum genome* (pp. 209-219). Springer. <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-12167977-daccc6f3f4.pdf>

- Silva, C. Q., Rodrigues, R., Bento, C. S., & Pimenta, S. (2017). Heterosis and combining ability for ornamental chili pepper. *Horticultura Brasileira*, 35(3), 349-357. <https://www.scienceopen.com/document?vid=3c1f8c09-2e7b-4edc-b111-a8a1312062b9>
- Singh, P., Cheema, D. S., Dhaliwal, M. S., & Garg, N. (2014). Heterosis and combining ability for earliness, plant growth, yield and fruit attributes in hot pepper (*Capsicum annuum* L.) involving genetic and cytoplasmic-genetic male sterile lines. *Scientia Horticulturae*, 168, 175-188. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2013.12.031>
- Souza, C. S., Daoood, H. G., Duah, S. A., Vinogradov, S., Palotás, G., Neményi, A., Helyes, L., & Pék, Z. (2022). Stability of carotenoids, carotenoid esters, tocopherols and capsaicinoids in new chili pepper hybrids during natural and thermal drying. *LWT*, 163, 113520. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113520>
- Sudha, G., & Ravishankar, G. A. (2002). Influence of calcium channel modulators in capsaicin production by cell suspension cultures of *Capsicum frutescens* Mill. *Current Science*, 83(4), 480-484. <https://www.jstor.org/stable/24106850>
- Taranto, F., D'Agostino, N., Greco, B., Cardi, T., & Tripodi, P. (2016). Genome-wide SNP discovery and population structure analysis in pepper (*Capsicum annuum*) using genotyping by sequencing. *BMC Genomics*, 17, 943. <https://doi.org/10.1186/s12864-016-3297-7>
- Tembhurne, B. V., & Rao, S. K. (2012). Heterosis and combining ability in CMS based hybrid chilli (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Agricultural Science*, 4(10). <https://doi.org/10.5539/jas.v4n10p89>
- Tripodi, P., Rabanus-Wallace, M. T., Barchi, L., Kale, S., Esposito, S., Acquadro, A., Schafleitner, R., Van Zonneveld, M., Prohens, J., Diez, M. J., Börner, A., Salinier, J., Caromel, B., Bovy, A., Boyaci, F., Pasev, G., Brandt, R., Himmelbach, A., Portis, E., ... Stein, N. (2021). Global range expansion history of pepper (*Capsicum* spp.) revealed by over 10,000 genebank accessions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(34), e2104315118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2104315118>
- Ulhoa, A. B., Pereira, T. N., Silva, R. N., Ragassi, C. F., Rodrigues, R., Pereira, M. G., & Reifschneider, F. J. B. (2014). Caracterização molecular de linhagens de pimenta do tipo Jalapeño amarelo. *Horticultura Brasileira*, 32(1), 35-40. <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/985191>
- Usman, M. G., Rafii, M. Y., Martini, M. Y., Yusuff, O. A., Ismail, M. R., & Miah, G. (2018). Introgression of heat shock protein (Hsp70 and sHsp) genes into the Malaysian elite chilli variety Kulai (*Capsicum annuum* L.) through the application of marker-assisted backcrossing (MAB). *Cell Stress and Chaperones*, 23(2), 223-234. <https://doi.org/10.1007/s12192-017-0836-3>
- Valduga, E., Tatsch, P. O., Tiggemann, L., Treichel, H., Toniazzo, G. B., Zeni, J., & Di Luccio, M. D. (2009). Produção de carotenoides: microrganismos como fonte de pigmentos naturais. *Química Nova*, 32, 2429-2436. <https://www.semanticscholar.org/paper/Produ%C3%A7%C3%A3o-de-carotenoides%3A-microrganismos-como-fonte-Valduga-Tatsch/4f6bbf676d5ca52e0294e8fab89c2e4275b2f541>
- Vallejo Cabrera, F. A., & Estrada, E. I. (2002). *Mejoramiento genético de plantas*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/items/53a9a4c7-91fd-480f-980c-4c9d649ed8bc>
- Vallejo Cabrera, F. A., & Estrada Salazar, E. I. (2004). *Producción de hortalizas de clima cálido*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/items/f92b5a9a-30f0-48ad-b748-15fde75b1690>



- Vallejo, F. A., & Hidalgo, R. (2016). *Bases para el estudio de los recursos genéticos*. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78071>
- Vega-Muñoz, M. A., López-Hernández, L. F., Cortés, A. J., Roda, F., Castaño, E., Montoya, G., & Henao-Rojas, J. C. (2025). Pangenomic and phenotypic characterization of colombian *Capsicum* germplasm reveals the genetic basis of fruit quality traits. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(17), 8205. <https://doi.org/10.3390/ijms26178205>
- Vijeth, S., Dhaliwal, M. S., Jindal, S. K., & Sharma, A. (2018). Evaluation of tomato hybrids for resistance to leaf curl virus disease and for high-yield production. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 59, 699-709. <https://doi.org/10.1007/s13580-018-0080-5>
- Visalakshi, M., & Pandiyan, M. (2018). Crop improvement in chillies: an overview. *International Journal of Chemical Studies*, 6(4) 1736-1744. <https://www.chemijournal.com/archives/2018/vol6issue4/PartAB/6-4-226-622.pdf>
- Voss-Fels, K., & Snowden, R. J. (2016). Understanding and utilizing crop genome diversity via high-resolution genotyping. *Plant Biotechnology Journal*, 14(4), 1086-1094. <https://doi.org/10.1111/pbi.12456>
- Wu, L., Wang, P., Wang, Y., Cheng, Q., Lu, Q., Liu, J., Li, T., Ai, Y., Yang, W., Sun, L., & Shen, H. (2019). Genome-wide correlation of 36 agronomic traits in the 287 pepper (*Capsicum*) accessions obtained from the SLAF-seq-based GWAS. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(22), 5675. <https://doi.org/10.3390/ijms20225675>
- Wu, Y. (2017). *QTL analysis of vitamin E trait in Capsicum F2 population*. Wageningen. <https://edepot.wur.nl/423313>
- Yoon, J. B., Yang, D. C., Do, J. W., & Park, H. G. (2006). Overcoming two post-fertilization genetic barriers in interspecific hybridization between *Capsicum annuum* and *C. baccatum* for introgression of anthracnose resistance. *Breeding Science*, 56(1), 31-38. <https://doi.org/10.1270/jsbbs.56.31>
- Zhang, X., Wang, G., Chen, B., Du, H., Zhang, F., Zhang, H., Wang, Q., & Geng, S. (2018). Candidate genes for first flower node identified in pepper using combined SLAF-seq and BSA. *PLoS One*, 13(3), e0194071. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194071>
- Zúñiga-Daza, N. F. (2021). *Evaluación agromorfológica de líneas avanzadas de ají picante 'Capsicum' spp. para la agroindustria* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia sede Palmira]. Repositorio AGROSAVIA. <https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/212b55df-8808-4bfc-9263-6283a8b76b89/content>





Título de la obra

Diversidad morfológica

Técnica

Ilustración digital con tableta, pincel en
textura de carboncillo

Autora

Laura Stefanny López Cortés (Sstefcore)



@sstefcore



Stefanny López

- Capítulo III -

Diversidad fenotípica de accesiones de *Capsicum* del Banco de Germoplasma Vegetal para la Alimentación y la Agricultura de la Nación Colombiana

Luz Fanny Orozco-Orozco, Laura Beatriz Espitia-Negrete,
Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza, Nancy Yohana Grisales-Vásquez,
Jaime Horacio López-Hoyos, Clara Inés Medina-Cano

Este capítulo muestra la diversidad fenotípica de 281 accesiones del género *Capsicum* conservadas por AGROSAVIA en el Centro de Investigación La Selva. El estudio abarca ocho especies, incluyendo cinco domesticadas y tres silvestres (*C. praetermissum*, *C. flexuosum* y *C. abbreviatum*), las cuales representan una reserva genética estratégica frente al auge de usos industriales y medicinales. La caracterización empleó el descriptor para *Capsicum* del Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos, para evaluar variables cualitativas y cuantitativas en plántula, tallo, hojas, flor y fruto. Mediante el método UPGMA y la distancia de

Gower, se identificaron cinco grupos principales con un umbral de similitud de 0,4 y un coeficiente de correlación cofenético de 0,71, lo que valida la precisión del agrupamiento. Los resultados evidencian una alta variabilidad inter e intraespecífica. *C. pubescens* y *C. baccatum* formaron conglomerados únicos y divergentes, y se observó una alta mezcla entre *C. annuum*, *C. chinense* y *C. frutescens*, confirmando la existencia del complejo *annuum* en proceso de diferenciación. Esta caracterización es fundamental para el conocimiento del germoplasma y el desarrollo de nuevas variedades con alto potencial agroindustrial.



Introducción

El género *Capsicum* está conformado por 43 especies, de las cuales 5 han sido domesticadas (*Capsicum annuum* L., *Capsicum chinense* Jacq., *Capsicum frutescens* L., *Capsicum pubescens* R. y *Capsicum baccatum* L.) y 38 son silvestres (Royal Botanic Gardens, 2024). El género presenta una amplia variabilidad de formas, colores, aromas, sabores y tamaños, que contribuyen a la alimentación y gastronomía del mundo desde épocas prehispánicas (Bosland & Votava, 2012), con gran relevancia en la cocina mexicana, situándose allí como principal especia (Zegbe et al., 2012).

En el C. I. La Selva se conserva la colección de *Capsicum* spp., conformada por 338 accesiones entre especies domesticadas y silvestres. El valor de estas colecciones se enmarca en el conocimiento de los recursos genéticos que las componen, lo que permite la identificación de características deseables, y fomentar su uso y explotación. No obstante, es necesario conocer en detalle la colección para determinar con mayor precisión los posibles usos y desarrollos a partir de los recursos genéticos disponibles. A continuación, se describe la metodología empleada para la caracterización morfológica y se presentan los principales resultados.



Foto: Nancy Johana Grisales-Vásquez

Caracterización morfológica

Con el propósito de conocer la diversidad de la colección, se realizó la caracterización morfológica mediante el descriptor para *Capsicum* del Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos (IPGRI, AVRDC y CATIE, 1995). Se registraron variables cuantitativas y cualitativas (tabla 3.1) y, posteriormente, se realizó una agrupación de las accesiones para registrar las variables morfológicas y agronómicas.

Tabla 3.1. Variables morfológicas y agronómicas usadas en la caracterización de las accesiones de *Capsicum* spp. evaluadas en el C. I. La Selva de AGROSAVIA durante 2022

Grupo de variables	Variable/código	Unidad/escala	Descripción o categorías (niveles)
Plántulas	Días a emergencia (DE)	Escala de razón	Días desde la siembra hasta la emergencia de los cotiledones
	Color de hipocótilo (Chipo)	Escala nominal	1. Blanco; 2. Verde; 3. Morado; 4. morado con verde
	Pubescencia hipocótila (Phipo)	Escala ordinal	3. Escasa; 5. Intermedia; 7. Densa
	Color hoja cotiledónea (Chcoti)	Escala nominal	1. verde claro; 2. Verde; 3. Verde oscuro; 4. Morado claro. 5. Morado; 6. Morado oscuro; 7. Jaspeado; 8. Amarillo
	Longitud de la hoja cotiledónea (Lhcoti)	Escala de razón	Medida en mm
	Ancho hoja cotiledónea (Ahcoti)	Escala de razón	Medida en mm
	Forma de hoja cotiledónea (Fhcoti)	Escala nominal	1. Deltoide; 2. Oval; 3. Lanceolada; 4. Elongada; 5. Estrechamente lanceolada

Continúa en la siguiente página ▼



Grupo de variables	Variable/código	Unidad/escala	Descripción o categorías (niveles)
Tallos	Color del tallo (Ctallo)	Escala nominal	1. Verde; 2. Verde con rayas púrpura; 3. Morado; 4. Verde claro con manchas verde oscuro; 5. Verde oscuro
	Antocianina del nudo (Anudo)	Escala nominal	0. Sin antocianinas; 1. Verde; 3. Morado claro; 5. Morado; 7. Morado oscuro
	Forma del tallo (Ftallo)	Escala nominal	1. Cilíndrico; 2. Angular; 3. Achatado
	Pubescencia tallo (Pt)	Escala ordinal	3. Escaso; 5. Intermedio; 7. denso.
Plantas de campo	Altura de la planta (Aplanta) en cm	Escala ordinal	1. < 25; 2. 25-45; 3. 46-65; 4. 66-85; 5. > 85
	Habito de crecimiento (HC)	Escala nominal	3. Postrado; 5. Intermedio; 7. Erecto; 9. Otro
	Macollamiento (Maco)	Escala ordinal	3. Escaso; 5. Intermedio; 7. Denso
	Densidad ramificación (Drama)	Escala ordinal	3. Escaso; 5. Intermedio; 7. Denso
	Color de hojas (Choja)	Escala nominal	1. Amarillo; 2. Verde claro; 3. Verde; 4. Verde oscuro; 5. Morado claro; 6. Morado; 7. Variegado; 8. Verde con nervadura morada
	Densidad de hoja (Dhoja)	Escala ordinal	3. Escaso; 5. Intermedio; 7. Denso
	Forma de hoja (Fhoja)	Escala nominal	1. Deltoide; 2. Ovada; 3. Lanceolada
	Margen de lámina foliar (MLF)	Escala nominal	1. Entera; 2. Ondulada; 3. Ciliada
	Pubescencia de hojas (Phoja)	Escala ordinal	3. Escaso; 5. Intermedio; 7. Denso
	Longitud de hoja madura (LHM) en mm	Escala de razón	Medida en mm
	Ancho de hoja madura (AHM) en mm	Escala de razón	Medida en mm

Continúa en la siguiente página ▼



Grupo de variables	Variable/código	Unidad/escala	Descripción o categorías (niveles)
Flores	Número de flores por axila (NFA)	Escala nominal	1. Uno; 2. Dos; 3. Tres o más; 4. Muchas flores en racimo, pero cada una en una axila individual; 5. Otros
	Posición de flor (Pflor)	Escala nominal	3. Pendiente; 5. Intermedia; 7. Erecta
	Color de corola (CC)	Escala nominal	1. Blanco; 2. Amarillo claro; 3. Amarillo. 4. Amarillo verdoso; 5. Púrpura con blanco en la base; 6. Blanco con púrpura en la base; 7. Blanco con púrpura en el margen; 8. Púrpura; 9. Morado claro; 10. Verde claro
	Color de anteras (CA)	Escala nominal	1. Blanco; 2. Amarillo; 3. Azul claro; 4. Azul; 5. Púrpura; 6. Verde; 7. Amarillo con morado; 8. Café; 9. Amarillo con naranja; 10. Morado con amarillo; 11. Morado con blanco; 12. Blanco con morado; 13. Amarillo con azul
	Color de filamento (Cfila)	Escala nominal	1. Blanco; 2. Amarillo; 3. Verde; 4. Azul; 5. Púrpura claro; 6. Púrpura; 7. Blanco con ápice morado
	Color de mancha de la corola (CMC)	Escala nominal	0. Sin manchas; 1. Blanco; 2. Amarillo; 3. Verde amarilloso; 4. Verde; 5. Púrpura; 7. Amarillo verdoso
	Días a floración (DF)	Escala de razón	Días desde la siembra hasta que el 50 % de las plantas inician formación de botones florales
	Exserción del estigma (EE)	Escala nominal	Observada previamente a la antesis: 3. Inserto; 5. Levemente excerto. 7. Excerto
	Forma de la corola (FC)	Escala nominal	1. Rotada; 2. Campanulada; 3. Estrellada; 4. Rotada; 5. Pentada
	Longitud de anteras (LA) en mm	Escala de razón	Valor promedio tomado en 5 flores

Continúa en la siguiente página ▼



Grupo de variables	Variable/código	Unidad/escala	Descripción o categorías (niveles)
Flores	Longitud de corola (LC) promedio en mm de 5 flores	Escala ordinal	1. < 15; 2. 15-25; 3. > 25
	Longitud de filamento (Lfila)	Escala de razón	Promedio en mm de 5 flores, observada previamente a la antesis
	Margen de cáliz (Mcaliz)	Escala nominal	1. Entera; 2. Intermedia; 3. Dentada; 4. Otros
Frutos	Pigmentación de cáliz (Pcaliz)	Escala nominal	0. Ausencia; 1. Presencia
	Presencia de flores (Pflores)	Escala nominal	0. Ausencia; 1. Presencia
	Constricción anular de cáliz (CAC)	Escala nominal	0. Ausencia; 1. Presencia
	Apéndice de fruto (AF)	Escala nominal	0. Ausencia; 1. Presencia
	Longitud de fruto (Lfruto)	Escala de razón	Promedio en cm de 5 frutos maduros
	Ancho de fruto (Afruto)	Escala de razón	Promedio en cm de 5 frutos maduros
	Presencia de antocianinas en fruto inmaduro (AfrutoI)	Escala nominal	0. Ausencia; 1. Presencia
	Arrugamiento transversal de fruto (Atfruto)	Escala nominal	3. Ligeramente arrugado; 5. Intermedio; 7. Arrugado
	Cuello en la base de fruto (Cbfruto)	Escala nominal	0. Ausencia; 1. Presencia
	Color fruto en estado inmaduro (CfrutoI)	Escala nominal	1. Blanco; 2. Amarillo; 3. Verde; 4. Naranja; 5. Púrpura; 6. Púrpura intenso; 7. Verde claro
	Color fruto maduro (CfrutoM)	Escala nominal	1. Blanco; 2. Amarillo limón; 3. Amarillo naranja claro; 4. Naranja amarilloso; 5. Naranja claro; 6. Naranja; 7. Rojo claro; 8. Rojo; 9. Rojo oscuro; 10. Púrpura; 11. Marrón; 12. Negro
	Días a cosecha (DC)	Escala de razón	Días desde la siembra hasta la primera cosecha

Continúa en la siguiente página ▼



Grupo de variables	Variable/código	Unidad/escala	Descripción o categorías (niveles)
Frutos	Espesor de pared del fruto (Epfuto)	Escala de razón	Promedio en mm de 5 frutos maduros
	Forma de ápice del fruto (Fapunto)	Escala nominal	1. Puntigudo; 2. Romo; 3. Hundido; 4. Hundido y puntigudo; 5. Otro
	Forma de fruto (Ffruto)	Escala nominal	1. Elongado; 2. Casi redondo; 3. Triangular; 4. Campaniforme; 5. Cuadrado
	Forma de fruto en la unión con el pedicelo (FFUP)	Escala nominal	1. Agudo; 2. Obtuso; 3. Truncado; 4. Cordiforme; 5. Lobulado
	Longitud placenta (LP)	Escala de razón	1. < 1/4 de la longitud del fruto; 2. 1/4 a 1/2 de la longitud del fruto; 3. > 1/2 de la longitud del fruto
	Longitud de pedicelo (Lpedi)	Escala de razón	Longitud promedio de 5 frutos en cm
	Número de lóculos (NL)	Escala de razón	Registrado en 5 frutos
	Peso del fruto (Pfruto)	Escala de razón	Promedio de 5 frutos
	Presencia de frutos (Pfrutos)	Escala de razón	0. Ausencia; 1. Presencia
	Persistencia de pedicelo con el fruto (PPF)	Escala ordinal	3. Ligera; 5. Intermedia; 7. Persistente
	Persistencia de pedicelo con el tallo (PPT)	Escala ordinal	3. Ligera; 5. Intermedia; 7. Persistente
	Rendimiento (REN)	Escala de razón	Peso en gramos de los frutos por cosecha
	Rendimiento frutos sanos (Rentotal)	Escala de razón	Peso en gramos de los frutos sanos por cosecha
	Tipo de epidermis de fruto (TEF)	Escala nominal	1. Lisa; 2. Semiarrugada; 3. Arrugada

Fuente: Elaboración propia



Con el propósito de agrupar las accesiones con características morfológicas similares, se construyó un dendrograma de disimilitud mediante el método de *unweighted pair group method with arithmetic mean* (UPGMA), o método de grupo de pares no ponderados con media aritmética, utilizando la distancia genética propuesta por Gower (1971). Para validar el dendrograma, se empleó el coeficiente de correlación cofenético (Sokal & Rohlf, 1962). Además, para describir los grupos formados a partir del agrupamiento, se llevó a cabo un análisis descriptivo.

Resultados

Las accesiones estudiadas pertenecen a ocho especies: *C. pubescens*, *C. annuum*, *C. chinense*, *C. frutescens*, *C. baccatum*, *C. praetermissum*, *C. flexuosum* y *C. abbreviatum*. En estas se presenta una amplia variabilidad inter e intraespecífica (figura 3.1). La amplia variabilidad morfológica de los genotipos evaluados está relacionada con el origen de las accesiones, ya que en su gran mayoría provienen de poblaciones locales dispersas, sembradas por pequeños productores en zonas incluidas en áreas de domesticación de las especies del género. En

este contexto, Votava et al. (2005) señalaron que los materiales locales de *Capsicum* han sido seleccionados por los agricultores teniendo en cuenta características hortícolas y agronómicas importantes para ellos, como son: nivel de pungencia, y tamaño y color del fruto. Al respecto, Pickersgill (1997) afirma que la variabilidad genética disponible en los materiales domesticados ha sido poco explotada y que esta es mucho más fácil de utilizar si se compara con las metodologías de transferencia interespecífica de genes.



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

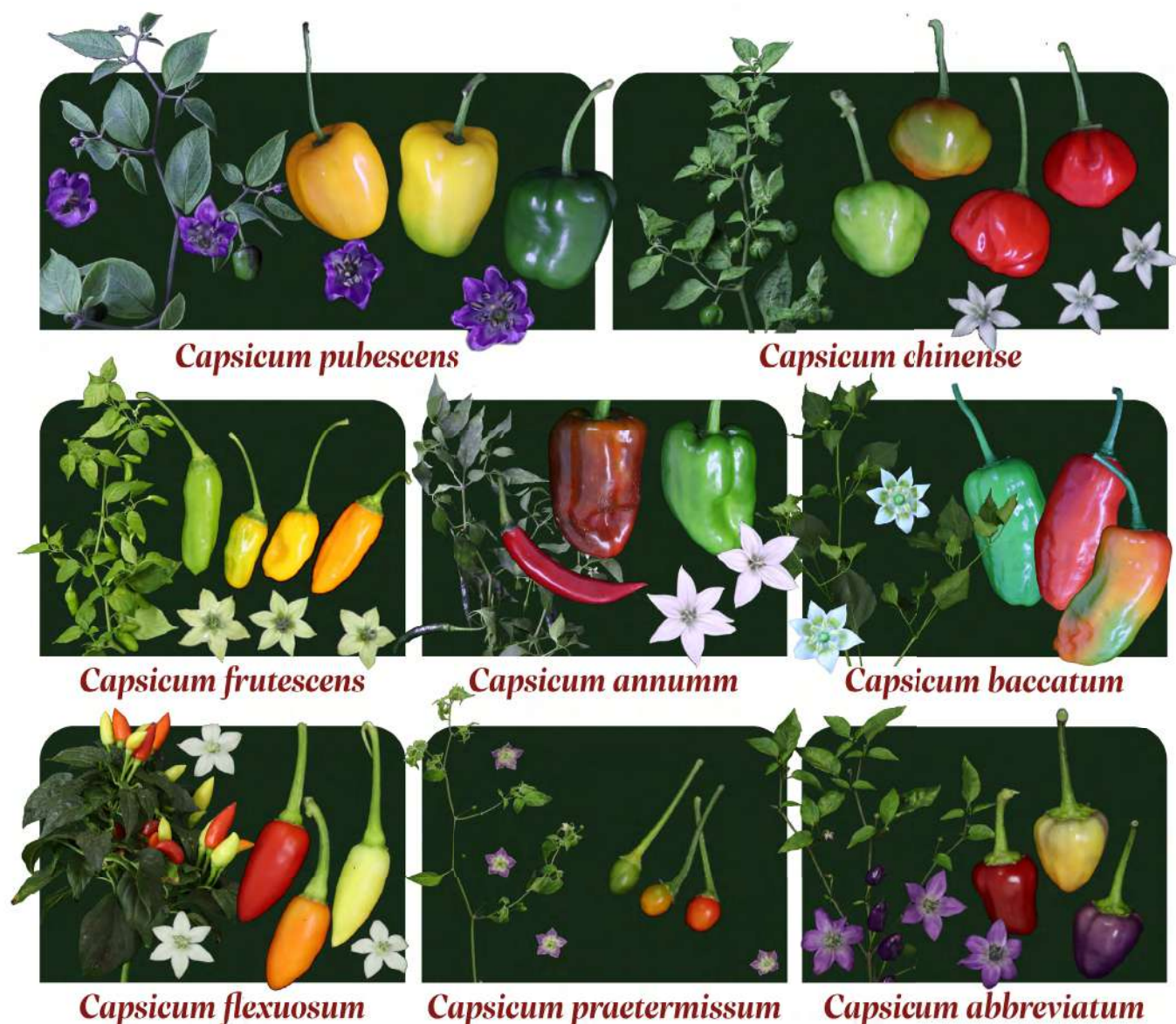


Figura 3.1. Diversidad de especies de *Capsicum* presentes en la colección del banco de germoplasma de AGROSAVIA.

Fotos: Nancy Yohana Grisales-Vásquez

Con el análisis conjunto de variables cuantitativas y cualitativas se estableció un umbral de similitud de Gower de 0,4, bajo el cual se encontraron 5 grupos, lo cual indica que las accesiones comparten aproximadamente el 60 % de sus características

(figura 3.2). El dendrograma presentó un coeficiente de correlación cofenético de 0,74, lo que sugiere que este proporciona una representación precisa de las distancias fenotípicas originales obtenidas entre las accesiones evaluadas.

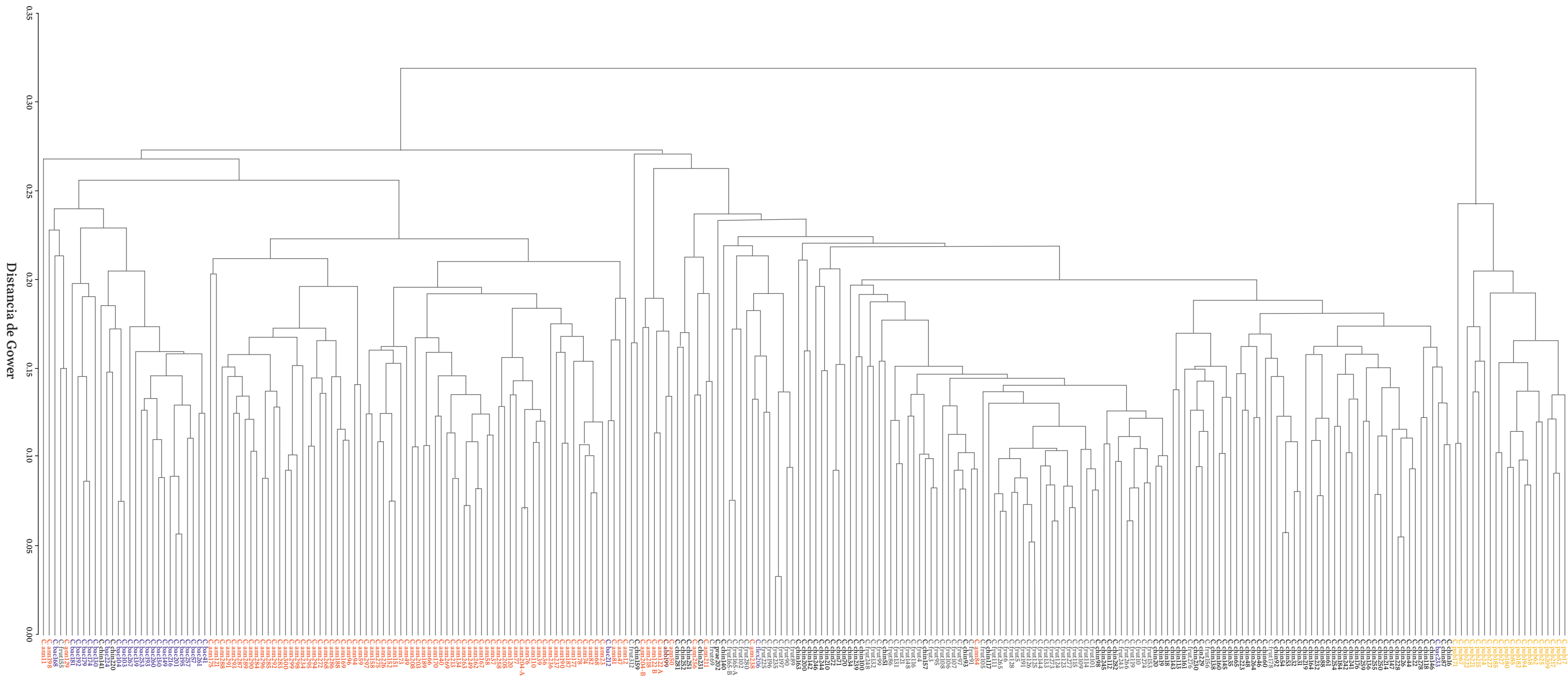


Figura 3.2. Agrupamiento de las accesiones de *Capsicum* establecidas en el C. I. La Selva de AGROSAVIA (coeficiente de correlación cofenético = 0,7384).
Fuente: Elaboración propia

El agrupamiento logró discriminar claramente las accesiones pertenecientes a *C. pubescens* y las ubicó en el extremo opuesto a las accesiones de *C. baccatum*, en las cuales se encontró también una alta concentración de los genotipos. Esto refleja, tal como plantean Medina et al. (2006), conglomerados únicos, lo cual muestra la significativa separación taxonómica de estas dos entidades biológicas.

C. pubescens (figura 3.3) es conocida comúnmente como rocoto o locoto; se caracteriza por presentar

pubescencia densa en tallo, ramas, hojas, peciolo y pedicelo; la posición de la flor, mayormente erecta; color de la corola morada o morada con base blanca, y presencia de antocianina color morado a morado oscuro en los nudos y entrenudos. Los frutos, de diferentes formas y colores, variaron entre amarillo-naranja, naranja, rojo claro, rojo y rojo oscuro, con forma acampanulada y en bloque, y semillas de color negro. Estas características son típicas de esta especie y se utilizan como criterio taxonómico de clasificación (Barboza et al., 2022, Melgarejo et al., 2004).

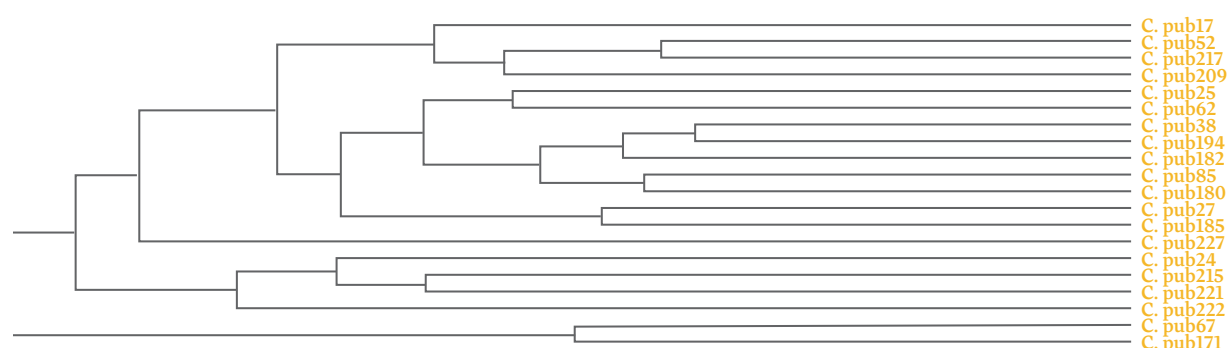


Figura 3.3. Agrupamiento de accesiones de *C. pubescens* basado en caracteres morfológicos.

Fuente: Elaboración propia

Las demás accesiones se mezclaron, siendo mayor el porcentaje de mezcla entre las accesiones de las especies *C. frutescens*, *C. chinense* y *C. annuum*. Este hallazgo continúa respaldando la idea de que estas tres especies hacen parte del complejo *annuum*, el cual está en proceso de diferenciación (Pickersgill, 1997), por lo tanto, no se logran discriminar de manera clara los grupos de dichas especies (Melgarejo et al., 2004). Entre ellas se han

reportado un alto grado de cruzamiento, siendo mayor la cercanía entre *C. frutescens* y *C. chinense*.

C. chinense (figura 3.4) se conoce comúnmente como chile habanero; es originaria de la península de Yucatán (México), y es reconocida en el mercado por su alta pungencia (López-Espinosa et al., 2018). Entre las características principales del chile habanero se encuentran: hipocótilo con antocianinas

y pubescencia; antocianinas en los nudos; altura de la planta mayor de 85 cm; corola de color amarillo-verdoso o blanco, y dos o más flores por axila. Esta especie presenta múltiples frutos por nudo, acampanulados, con terminación en punta. En es-

tado inmaduro son de color verde y maduros pueden ser de color amarillo, naranja, rojo, morado o café, con arrugamiento trasversal, y las semillas normalmente son rugosas (Chiquini-Medina et al., 2019, González et al., 2006).

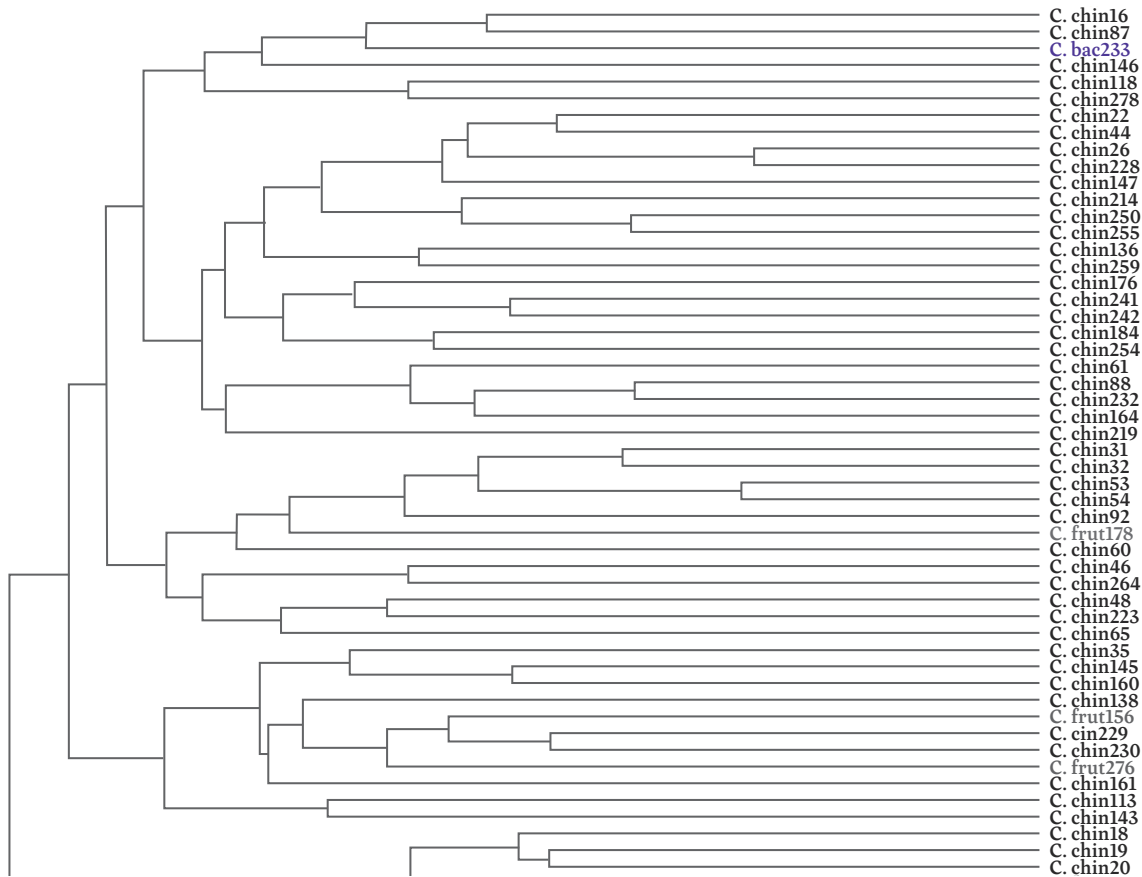


Figura 3.4. Agrupamiento de accesiones de *C. chinense* basado en caracteres morfológicos.

Fuente: Elaboración propia

C. frutescens (figura 3.5) es una especie con importancia comercial en América, Oceanía y en el su-deste y este de Asia. Es conocida también con los nombres comunes de cayena y tabasco. Las plantas presentan ramificación desde la base, y se caracte-rizan por tener múltiples flores de color verde (dos

a cuatro, raramente solitarias) y varios frutos por nudo, los cuales típicamente presentan posición erecta y cáliz estrecho. En los estados inmaduros son de color verde y verde amarillento, y cuando maduran hacen transición a amarillo, naranja-rojo o naranja-amarillo (Barboza et al., 2022).

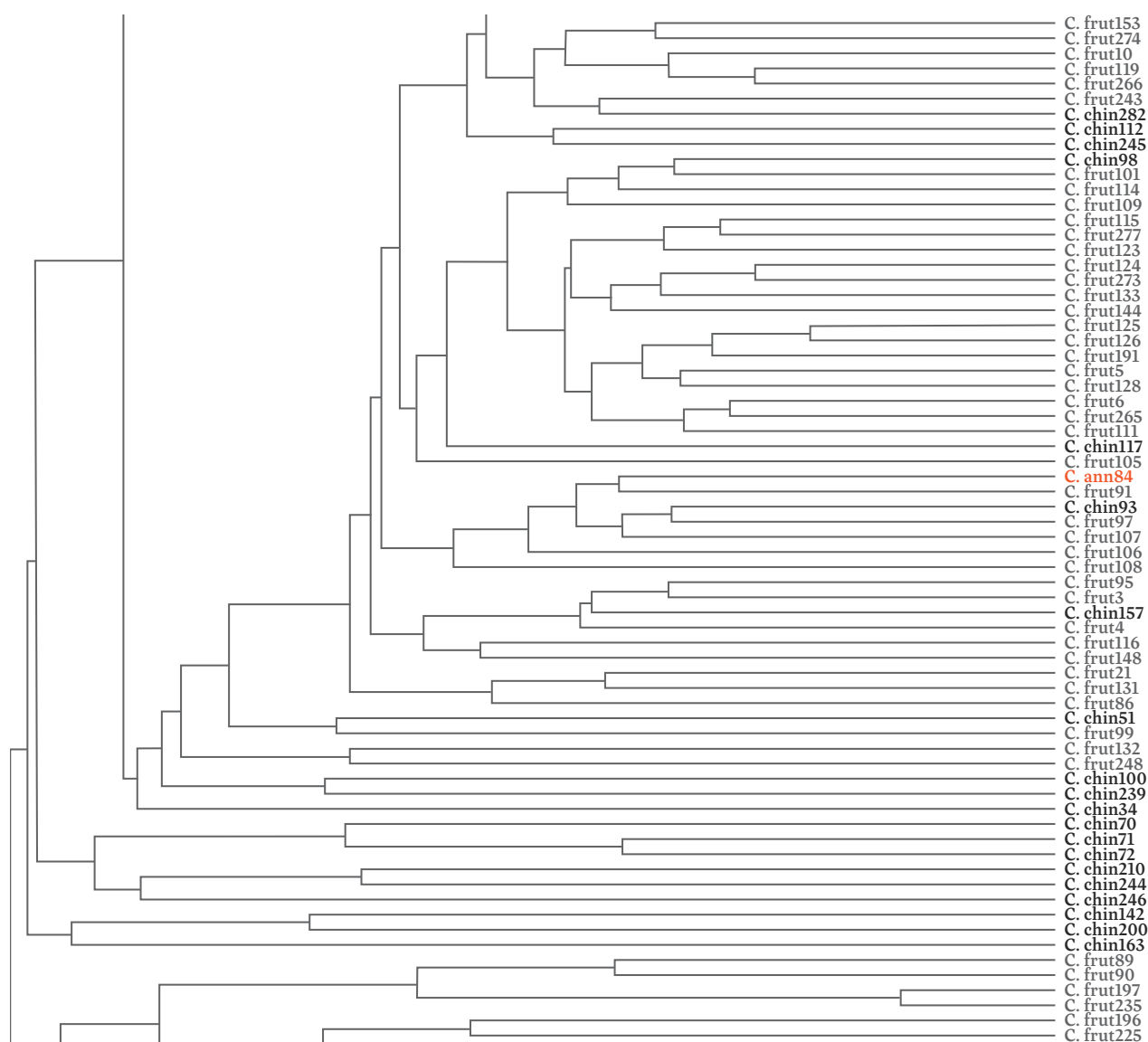


Figura 3.5. Agrupamiento de accesiones de *C. frutescens* basado en caracteres morfológicos.

Fuente: Elaboración propia

C. annuum es la especie más cultivada y consumida del género, pues en casi todos los países tiene algún tipo de producción y consumo; presenta alta diversidad, que se expresa en los colores de hojas, flores y frutos, además de los sabores, que van desde el no picante hasta muy picante (figu-

ra 3.6). Son hierbas anuales o arbustos de corta duración, que se ramifican cerca a la base del tallo. Las plantas normalmente desarrollan una flor por axila, con posición colgante y color blanco en la corola, sin mancha y con el estigma exerto (Barboza et al., 2022).

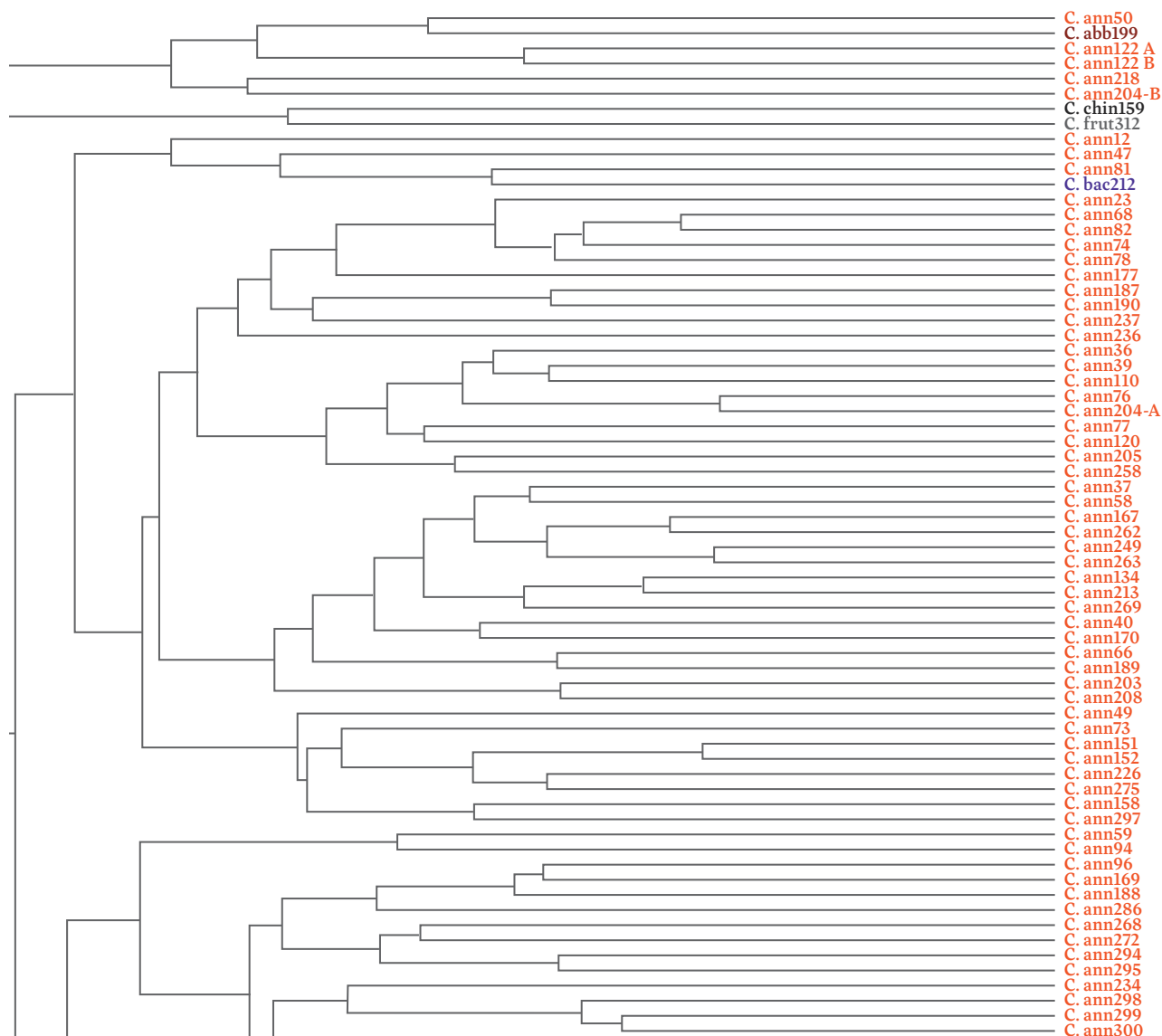


Figura 3.6. Agrupamiento de accesiones de *C. annuum* basado en caracteres morfológicos.

Fuente: Elaboración propia

C. baccatum (Figura 3.7) es una especie ampliamente cultivada y consumida en Suramérica. En el mercado se le conoce por su rico sabor y aroma, además de ser fuente de resistencia a virus y a enfermedades como oídio y antracnosis. Son arbustos erectos o hierbas perennes de hasta 3,5 m de altura, muy ramificados desde cerca de la

base del tallo. Los nudos son generalmente púrpura y las flores, blanco-amarillas con manchas verduzcas hacia la parte basal de los pétalos. Desarrollan dos a tres flores por axila, y raramente presentan flores solitarias (Barboza et al., 2022, Melgarejo et al., 2004).



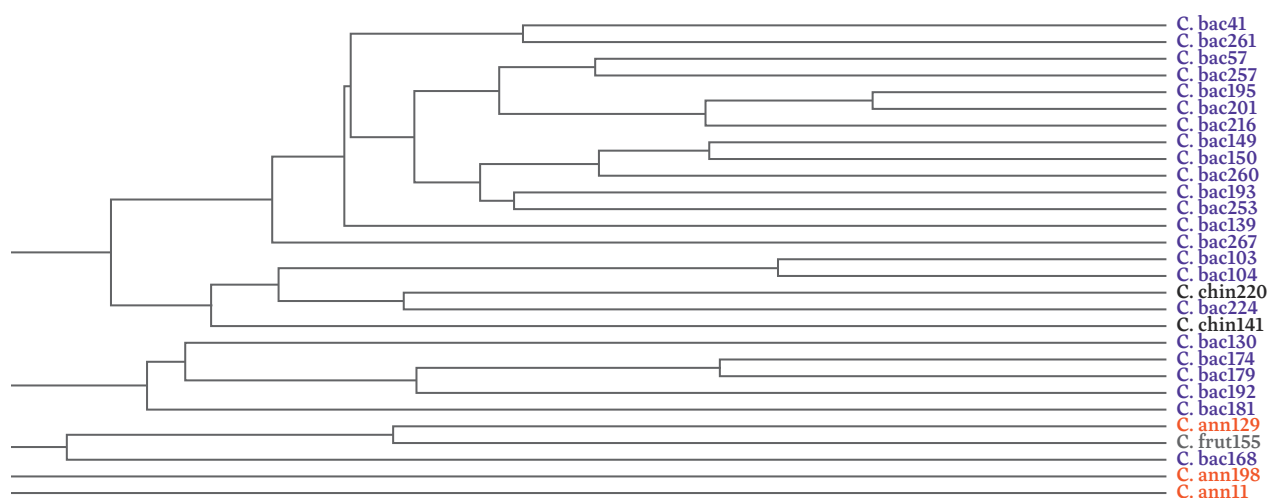


Figura 3.7. Agrupamiento de accesiones de *Capsicum* basado en caracteres morfológicos.

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

» Las especies *C. baccatum* y *C. pubescens* formaron conglomerados únicos, lo cual refleja la significativa separación taxonómica de estas dos entidades biológicas con relación a los otros taxones domesticados del complejo *C. annuum*, *C. chinensis* y *C. frutescens*.

» Es importante comprender la diversidad morfológica presente en el banco de germoplasma de *Capsicum*. Esta diversidad sirve como base para conservar la especie y para llevar a cabo investigaciones de mercado, con el fin de identificar las variedades más atractivas y prometedoras para la industria del ají.

Reflexión

La diversidad fenotípica del grupo *Capsicum* es amplia. En los resultados se observa cómo se diferencian algunas accesiones y se agrupan por especie, de acuerdo con sus características fenotípicas. No obstante, también es claro cómo algunas accesiones comparten características, hecho que hace difícil distinguir entre ellas por los rasgos fenotípicos.



Foto: Esteban Castaño Llanos

Referencias

- Barboza, G. E., Carrizo García, C., Bianchetti, L. B., Romero, M. V., & Scaldaferrro, M. (2022) Monograph of wild and cultivated chili peppers (*Capsicum* L., Solanaceae). *PhytoKeys*, 200, 1-423. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.200.71667>
- Bosland, P. W., & Votava, E. J., (2012). *Peppers: vegetable and spice capsicums*. CABI.
- Chiquini-Medina, R. A., Castillo-Aguilar, C. d. La C., López-Castilla, L. del C., & Quej-Chi, V. H. (2019). Caracterización varietal del chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) var. Rosita. *Agro Productividad*, 12(4). <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.543>
- González, T., Gutiérrez, L., & Contreras, F. (2006). El chile habanero de Yucatán. *Ciencia y Desarrollo*, 32(195), 8-15. <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/archivo/195/Articulos/Chilehabanero/Habanero04.html>
- Gower J.C. (1971). A general coefficient of similarity and some of its properties. *Biometrics*, 7(27), 857-871. <https://doi.org/10.2307/2528823>
- International Plant Genetic Resources Institute [IPGRI]. (1995) *Descriptors for 'Capsicum' ('Capsicum' spp.)*. <https://cgspace.cgiar.org/items/ef0f3bcd-4878-4025-90ed-098a4c1b2918>
- López-Espinosa, S. T., Latournerie-Moreno, L., Castañón-Nájera, G., Ruiz-Sánchez, Esaú, Gómez-Leyva, J. F., Andueza-Noh, R. H., & Mijangos-Cortés, J. O. (2018). Diversidad genética de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.) mediante ISSR. *Revista Fitotecnica Mexicana*, 41(3), 227-236. https://www.redalyc.org/pdf/610/Resumenes/Resumen_61059021002_1.pdf
- Medina, C. I., Lobo, M., & Farley Gómez, A. (2007). Variabilidad fenotípica en poblaciones de ají y pimentón de la colección colombiana del género *Capsicum*. *Revista Corpoica. Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 7(2), 25-39. <https://www.redalyc.org/pdf/4499/449945021004.pdf>
- Melgarejo, L. M., Hernández, M. S., Barrera, J. A., Bardales, X. (Eds.) (2004). *Caracterización y usos potenciales del banco de germoplasma de ají amazónico*. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi; Universidad Nacional de Colombia. https://sinchi.org.co/files/publicaciones/publicaciones/pdf/LIBRO_AJIWEB.pdf
- Pickersgill, B. (1997). Genetic resources and breeding of *Capsicum* spp. *Euphytica*, 96, 129-133. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1002913228101>
- Royal Botanic Gardens (2024). *Plants of the World Online*. <http://www.plantsoftheworldonline.org/>
- Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (1962). Comparación de dendrogramas mediante métodos objetivos. *Taxon*, 11(1), 33-40.
- Votava, E.J., Baral, J. B., & Bosland, P. W. (2005). Genetic diversity of Chile (*Capsicum annuum* var. *annuum* L.) landraces from Northern New Mexico, Colorado, and Mexico. *Economic Botany*, 59, 8-17. [https://doi.org/10.1663/0013-0001\(2005\)059\[0008:GDOCCA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1663/0013-0001(2005)059[0008:GDOCCA]2.0.CO;2)
- Zegbe, D. J. A., Valdez C., R. D., & Lara H., A. (Eds.). (2012). *Cultivo de chile en México: tendencias de producción y problemas fitosanitarios actuales*. Universidad Autónoma de Zacatecas.





Título de la obra

Contexto agronómico

Técnica

Ilustración digital con tableta, pincel en
textura de carboncillo

Autora

Laura Stefanny López Cortés (Sstefcore)



@sstefcore



Stefanny López

- Capítulo IV -

Contexto agronómico de la evaluación de materiales de *Capsicum* spp.

Cristian Dominguez Pulgarin, Carolina Zuluaga Mejía, Jaime Horacio López-Hoyos,
Jorge Eliécer Jaramillo Noreña

El capítulo presenta el contexto agronómico bajo el cual se desarrolló la evaluación de materiales de *Capsicum* spp. para el uso potencial en la agroindustria. Su propósito es describir de manera estructurada las condiciones edáficas, ambientales y de manejo que enmarcaron la expresión productiva de los genotipos evaluados. Se detalla el proceso de adecuación del suelo con base en el análisis fisicoquímico previo, orientado al ajuste del balance nutricional y a la optimización de la funcionalidad biológica. Asimismo, se describe la implementación de cobertura plástica, el establecimiento del cultivo y el sistema de tutorado, como

prácticas dirigidas a mejorar la arquitectura vegetal y la eficiencia en las labores agronómicas. El manejo hídrico se fundamentó en la caracterización de las propiedades hidrofísicas del suelo, el monitoreo climático y el cálculo técnico de láminas de riego por etapa fenológica, mediante un sistema de goteo. La nutrición se estructuró bajo un esquema de fertirriego ajustado a los requerimientos del cultivo y a las condiciones del suelo y del agua. En conjunto, estas prácticas garantizaron condiciones experimentales homogéneas y técnicamente controladas, necesarias para una evaluación objetiva del desempeño agronómico y productivo de los materiales.





Foto: Esteban Castaño Llanos

Introducción

El presente capítulo corresponde a la descripción metodológica del manejo agronómico realizado a la parcela donde fueron establecidos los materiales de *Capsicum* spp. evaluados entre mayo de 2022 y marzo de 2023. El ensayo se realizó en el C. I. La Selva de AGROSAVIA. El equipo de autores considera relevante presentar al detalle las actividades de manejo agronómico realizadas, para que el lector conozca las condiciones específicas en las que los genotipos expresaron sus características y potencialidades productivas para la agroindustria. Finalmente, es importante destacar que para el establecimiento del cultivo se partió de un análisis de suelo en el cual se basó el equipo técnico para el manejo agronómico. Los resultados del análisis se describen a lo largo del capítulo. Dicho lo anterior,

este no pretende ser una guía de manejo agronómico para el cultivo de *Capsicum*, por el contrario, es un espacio donde se detallan las condiciones y manejo agronómico brindado a los materiales genéticos evaluados.

Preparación y acondicionamiento del suelo

Preparación del suelo

Se seleccionó un área de terreno con una extensión de 1.700 m² dentro del espacio denominado *invernadero inteligente*, ubicado en el lote 3A, en la terraza baja del C. I. La Selva de AGROSAVIA, ubicado en el kilómetro 7 vía Rionegro-Las Palmas, a una altitud de 2.100 m s. n. m., con una temperatura promedio de 17 °C y una humedad relativa de 85 % (figura 4.1).



Figura 4.1. Lote seleccionado para la siembra.

Foto: Cristian Dominguez Pulgarin

La preparación del lote consistió en la eliminación de malezas de forma mecánica (guadaña) y en tres pases de motoazada, con el objetivo de romper el suelo sin generar compactación de capas inferiores, y dejarlo así mullido para la construcción de caballones de 30 cm de altura separados entre sí por 1,5 m.

En la costa Caribe colombiana, que es la principal zona productora de *Capsicum chinense* del país, los pequeños productores emplean sistemas de siembra manuales con labranza mínima, mientras que los grandes productores utilizan mecanización agrícola, compuesta generalmente por un pase de arado, dos rastrillados, nivelada y surcada (Pinto Zapata et al., 2005).

Aplicación de enmiendas y materia orgánica

Durante el establecimiento del cultivo se aplicó cal dolomítica en una dosis de $1 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, incorporada en la capa arable (0-20 cm). El suelo presentó un pH de 5,94, valor inferior al rango óptimo de 6,5-7,0 para el desarrollo de *Capsicum* (Saavedra et al., 2019), y una relación Ca:Mg de 7,7:1, derivada de un contenido alto de calcio ($16,4 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$) y medio de magnesio ($2,13 \text{ cmol}(+) \cdot \text{kg}^{-1}$).

Dado que no se detectó aluminio intercambiable y la saturación por bases fue cercana al 100 %, la aplicación tuvo como propósito ajustar el balance catiónico del complejo de intercambio, más que neutralizar la acidez.

La dosis se determinó mediante el método de balance de cationes intercambiables (Sumner & Miller, 1996; Kamprath, 1970), considerando la capacidad de intercambio catiónico efectiva ($19,3 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$), la densidad aparente del suelo ($1,3 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$) y la composición mineral de la dolomita ($\approx 16 \% \text{ Ca}$ y $10 \% \text{ Mg}$). Este ajuste se proyectó para incrementar el Mg intercambiable en aproximadamente $0,3 \text{ cmol}(+)\cdot\text{kg}^{-1}$, equilibrando la relación Ca:Mg dentro del rango agronómicamente aceptable para suelos agrícolas ($\approx 4\text{-}6\text{:}1$) (NSW Department of Primary Industries, 2021; Iowa State University Extension and Outreach, 2023), sin modificar de forma significativa el pH.

Según las recomendaciones para suelos tropicales de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por su sigla en inglés), encalar con 1 a 2 t/ha cada 2 o 3 años podría ser suficiente para regular la acidez y conservar condiciones de pH adecuadas. Además, realizar aplicaciones de cal excesivas afecta la agregación de partículas y dispersa los coloides del suelo (Navarro García & Navarro García, 2013).

En estudios de diferentes dosis de cal dolomita, se ha podido comprobar que no existe diferencia entre el aporte de $1,5$ o 3 t ha^{-1} , por lo que usar dosis altas de la enmienda provoca un incremento en los costos de producción, además de un posible deterioro del suelo, ya que las 2 dosis incrementan entre $0,98$ y $0,85$ unidades de pH (Carvajal Diguay & Gómez Badillo, 2016).

Durante el establecimiento, se incorporó gallinaza compostada a razón de 8 t ha^{-1} , aplicada sobre el suelo previamente preparado y antes de la instalación del sistema de riego y el acolchado plástico. Esta práctica formó parte del manejo edáfico, dirigido a mantener el equilibrio biológico y la disponibilidad gradual de nutrientes en el suelo.

El análisis inicial del suelo ($0\text{-}20 \text{ cm}$) evidenció un contenido de materia orgánica de $10,4 \%$, pH moderadamente ácido ($5,9$) y capacidad de intercambio catiónico media ($19,3 \text{ cmol}(+) \text{ kg}^{-1}$), condiciones que reflejan una buena reserva de nutrientes, pero también una tasa de mineralización limitada bajo el clima templado-frío y la altitud del sitio experimental ($\approx 2.100 \text{ m s. n. m.}$). En tales condiciones, la descomposición de residuos orgánicos tiende a ser lenta, lo que puede reducir el aporte efectivo de nitrógeno mineral y otros nutrientes al sistema.

La incorporación de materia orgánica estabilizada buscó favorecer la actividad microbiana y la estructura física del suelo, con el fin de promover una liberación progresiva de nutrientes, sin alterar las condiciones redox ni generar procesos de inmovilización o fermentación anaerobia. De este modo, la enmienda orgánica se integró como parte del manejo metodológico del suelo, orientado a mantener su funcionalidad biológica, y su capacidad de retención de agua y nutrientes durante el ciclo del cultivo.

Implementación de Agromulch

El cultivo se estableció sobre suelo cubierto con Agromulch o cobertura plástica color negro-plata (negro en la parte inferior y plata en la superior), con un calibre de 1.5 mm. La cobertura se

extendió sobre los camellones, se templó y afirmó en los costados con suelo. Se le realizaron perforaciones de 20 cm de diámetro, en las cuales se ubicaron posteriormente las plantas (figura 4.2).



Figura 4.2. Instalación de Agromulch en el lote.

Foto: Cristian Dominguez Pulgarin

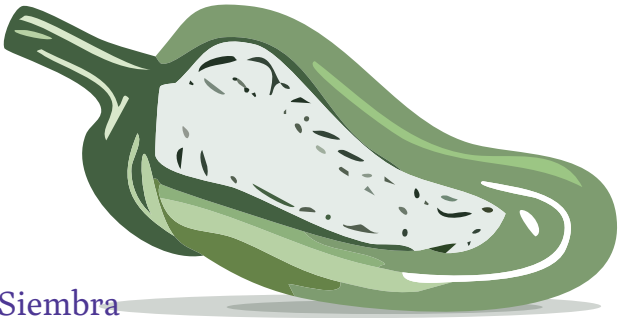
El empleo de acolchados se ha utilizado para mejorar las condiciones de producción de cultivos. Generalmente, las cubiertas plásticas aumentan la temperatura del suelo, reducen la compactación, la presencia de arvenses, la lixiviación de nutrientes y la pérdida de agua por evaporación. Igualmente, contribuyen a aumentar la precocidad, la concentración de carbono y la obtención de productos de mayor calidad (Hernández, 2014).

Se ha determinado que el empleo de cobertura plástica aumenta el rendimiento de cultivos de *C. chinense* Jacq. Si bien su uso disminuye el peso individual de los frutos, esto se ve compensado por la emisión de un mayor número de frutos por planta. Por otra parte, el uso de estas coberturas aumenta la precocidad del cultivo, con lo que se disminuye en una semana el tiempo de cosecha, en comparación con el cultivo en suelo desnudo (Gil-Marín et al., 2012).

Establecimiento del cultivo

Semilleros

Inicialmente, las plántulas se germinaron en bandejas de 72 alveolos, empleando turba como sustrato. En cada alveolo se colocó una semilla, la cual germinó entre los 10 y los 35 días, dependiendo de la accesión. El manejo de la germinación consistió en el suministro de agua una o dos veces al día, dependiendo de los niveles de temperatura. El trasplante a campo definitivo se llevó a cabo a los 45 días posteriores a la germinación, cuando las plántulas ya tenían sus primeras 4 hojas bien formadas.



Siembra

Para la siembra se construyeron caballones de 30 cm de alto, con una distancia entre ellos de 1,5 m. Las plántulas se sembraron a 45 cm entre ellas, agrupadas por especies, como se puede observar en la figura 4.3.

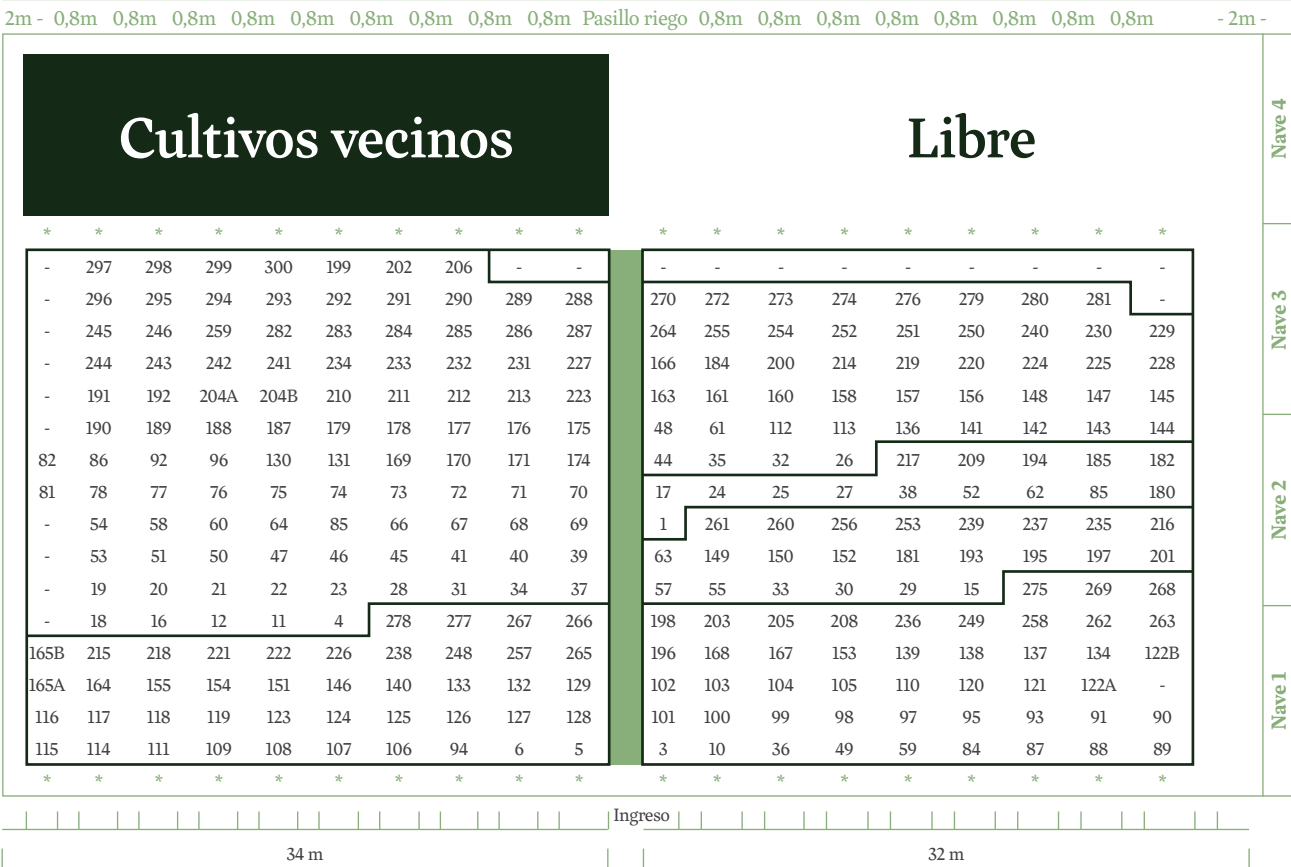


Figura 4.3. Plano de siembra.

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente a la siembra, se realizaron cuatro aplicaciones foliares con un intervalo de siete días entre cada una. Las aplicaciones consistieron en la mezcla de un fertilizante foliar complejo 16-16-12 NPK y un fertilizante foliar complejo 10-30-10 NPK con aminoácidos, en dosis de 2,5 cc L⁻¹ y 0,5 cc L⁻¹, respectivamente.

El fertilizante foliar complejo 16-16-12 NPK corresponde a una suspensión concentrada (SC) que aporta 160 g L⁻¹ de N (38 g L⁻¹ amoniacal, 12 g L⁻¹ nítrico y 110 g L⁻¹ ureico), 160 g L⁻¹ de P₂O₅ y 120 g L⁻¹ de K₂O, complementados con B (10,0 g L⁻¹), Cu (0,21 g L⁻¹), Fe (0,43 g L⁻¹), Mn (0,36 g L⁻¹), Mo (0,07 g L⁻¹) y Zn (10,0 g L⁻¹), estos últimos quelatados con

EDTA (ácido etilendiaminotetraacético). También presenta pH 6,4, densidad 1,40 g cm⁻³ y una formulación balanceada que favorece la absorción rápida y homogénea de nutrientes.

Por su parte, el fertilizante foliar complejo 10-30-10 NPK con aminoácidos aporta 100 g L⁻¹ de N (30 g L⁻¹ nítrico y 70 g L⁻¹ ureico), 300 g L⁻¹ de P₂O₅ y 100 g L⁻¹ de K₂O, además de MgO (15 g L⁻¹), S (5 g L⁻¹), B (5 g L⁻¹), Cu (4 g L⁻¹), Zn (5 g L⁻¹) y aminoácidos libres (40 g L⁻¹), provenientes de hidrólisis controlada de proteínas vegetales. El producto presenta pH 2,5 y densidad 1,42 g mL⁻¹, características que favorecen la compatibilidad con la mayoría de fertilizantes y agroquímicos, excepto formulaciones a base de estaño.



Foto: Esteban Castaño Llanos

Manejo del riego y del drenaje

Condiciones iniciales para tener en cuenta en la instalación del sistema de riego

Según Pinto-Zapata et al. (2013), para su buen desarrollo y producción, las variedades de *Capsicum* sp. tienen un requerimiento de agua promedio de 600 a 1.250 mm anuales, por lo que se instaló un sistema de riego por goteo, teniendo en cuenta varias consideraciones de tipo técnico que se presentan a continuación.

Se determinó en laboratorio la curva de retención de humedad del suelo, la cual permite establecer una relación entre el potencial total del agua del suelo y su contenido de humedad dentro de un amplio rango de tensiones. Esta gráfica se construye con datos obtenidos en laboratorio utilizando platos y ollas de presión, en los que las muestras se someten a diferentes presiones (0,1, 0,3, 1, 5, 10 y 15 atm). Este análisis permite conocer las propiedades hidrofísicas del suelo, como la capacidad de campo, el punto de marchitez permanente y otros puntos de retención intermedios.

La capacidad de campo es el contenido de humedad que retiene el suelo una vez ha drenado, luego de un riego abundante o inundación, considerando el contenido de humedad óptimo en que la planta puede tomar el agua sin mayor esfuerzo (Jaramillo, 2011). La saturación es el contenido de humedad en el que tanto los microporos como los macroporos del suelo están completamente llenos de agua. En este punto, la planta no cuenta con la energía necesaria para extraer el agua del suelo, por lo que es una condición no ideal para el desarrollo de un cultivo. El punto de marchitez permanente es el contenido de humedad en el que el suelo está tan seco que la planta no tiene el agua necesaria para sus funciones y se genera un daño irreversible, por lo que es una condición que debe evitarse.

La toma de muestras para este análisis es muy similar a la que se realiza para densidad aparente. Se debe tener especial cuidado con marcar una flecha en el sentido en que entra el agua al suelo, como se puede observar en la figura 4.4.



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza



Figura 4.4. Toma de muestras para curva de retención de humedad. a. Cilindro para toma de muestra; b. Muestra tomada para la curva.

Fotos: Cristian Dominguez Pulgarin

La curva de retención de humedad obtenida para el suelo de la parcela del C. I. La Selva se presenta en la figura 4.5.

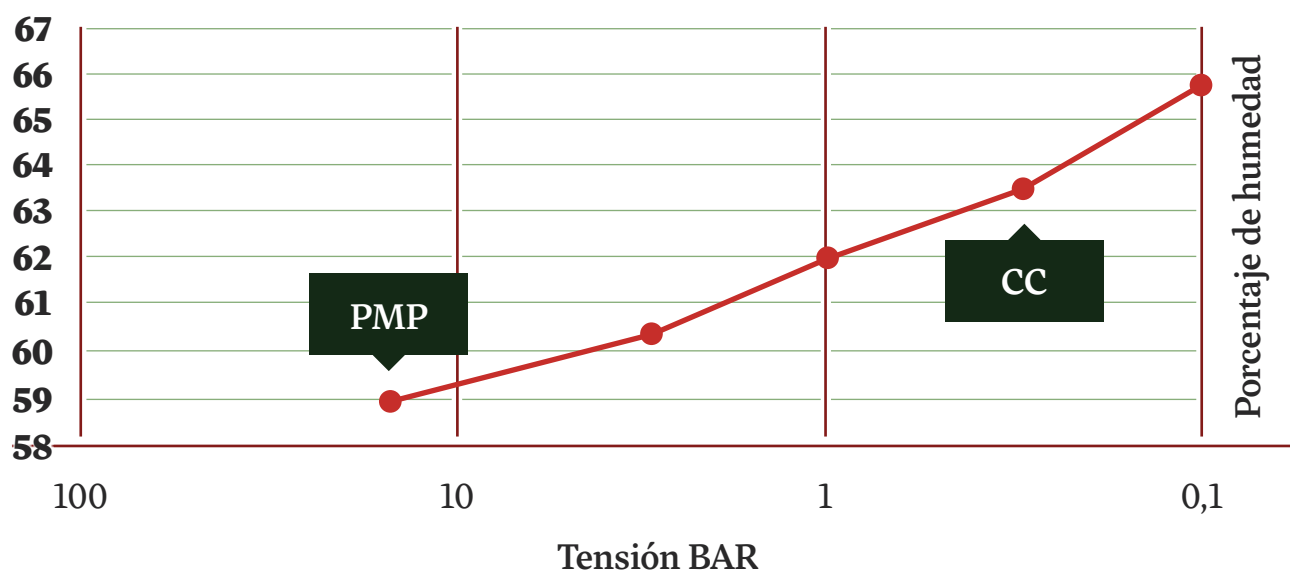


Figura 4.5. Curva de retención de humedad.

Fuente: Elaboración propia

Según los resultados obtenidos para este suelo, se aprecia que el contenido de humedad óptimo oscila entre el 63,56 y el 65,82 %, lo que indica un nivel de humedad alto. Para monitorear este parámetro, se instaló un tensiómetro en el lote (figura 4.6). Esto, complementado con la observación de las condiciones climáticas y de la humedad del suelo, sirvió como criterio clave para la aplicación del riego durante el ciclo de crecimiento del cultivo.



Figura 4.6. Tensiómetro instalado en el lote.

Foto: Cristian Dominguez Pulgarin

El monitoreo de las condiciones climáticas del cultivo se hizo con un *datalogger* RHT 20 y una estación Watchdog series 2000. Periódicamente se obtuvieron los datos de temperatura y humedad relativa, como se presentan en la figura 4.7.

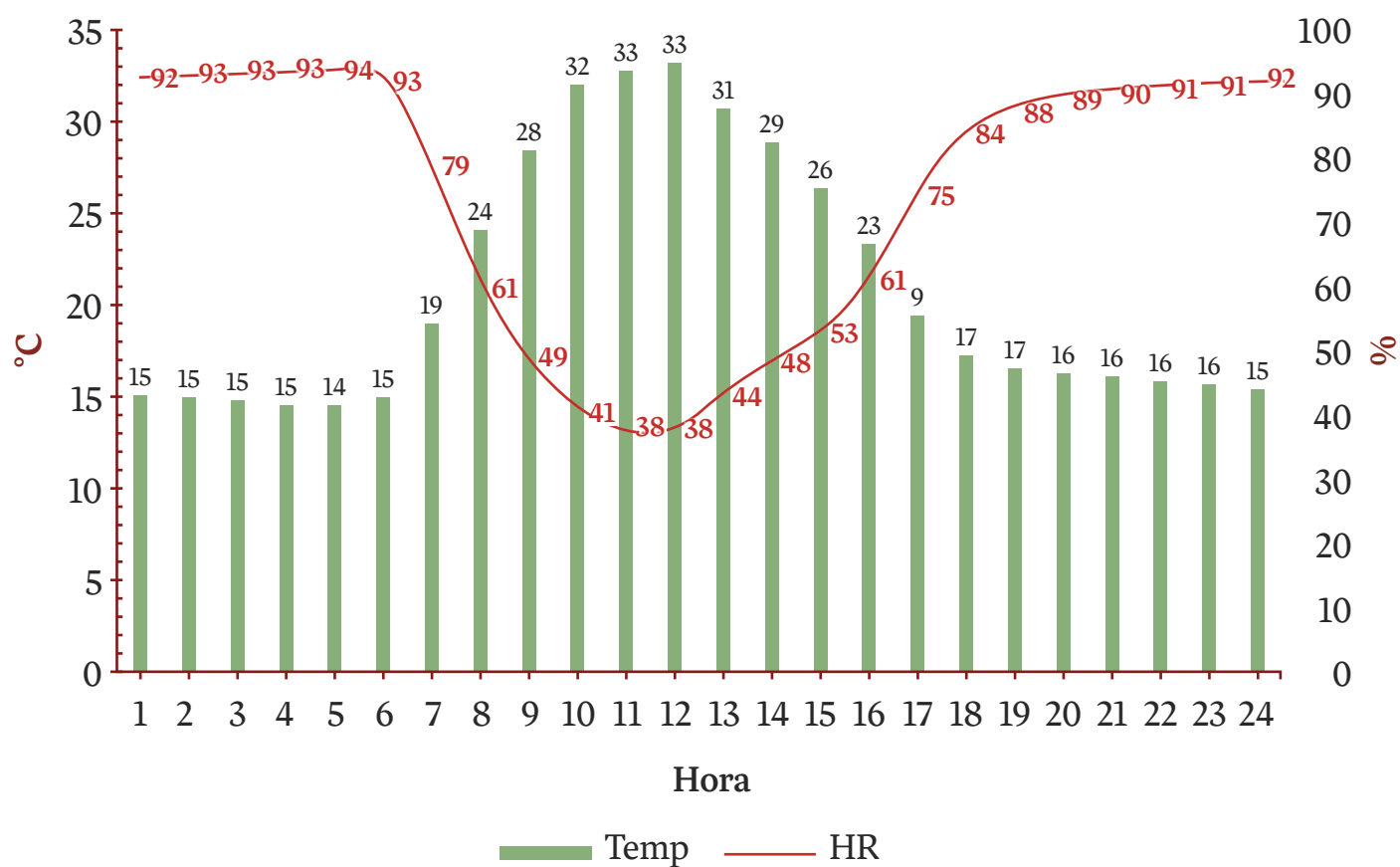


Figura 4.7. Comportamiento de la temperatura y la humedad relativa en el invernadero.

Fuente: Elaboración propia

Se encontró que las horas más críticas en cuanto a temperatura están entre las 11 a. m. y la 1 p. m., por presentarse los valores más altos, y entre las 12 a. m. y las 4 a. m., por presentarse los valores más bajos. Para evitar diferencias muy considerables entre las temperaturas del día y la noche en el

invernadero, se tomó la decisión de abrir las cortinas entre las 11 a. m. y las 4 p. m., y nuevamente cerrarlas para conservar el calor durante las horas de baja temperatura en la noche, como se aprecia en la figura 4.8.



Figura 4.8. Apertura de cortinas en el invernadero.

Foto: Cristian Dominguez Pulgarin

Gracias a la estación climática WatchDog Series 2000, se obtuvieron los registros de radiación solar global y radiación fotosintéticamente activa (PAR, por su sigla en inglés), correspondientes al periodo de ejecución del proyecto. Estos datos permitieron caracterizar

las condiciones lumínicas bajo las cuales se desarrollaron los ensayos, con lo que se evidencia la disponibilidad de energía radiante tanto total como útil para la fotosíntesis. La figura 4.9 ilustra la variación de ambas variables durante el tiempo experimental.

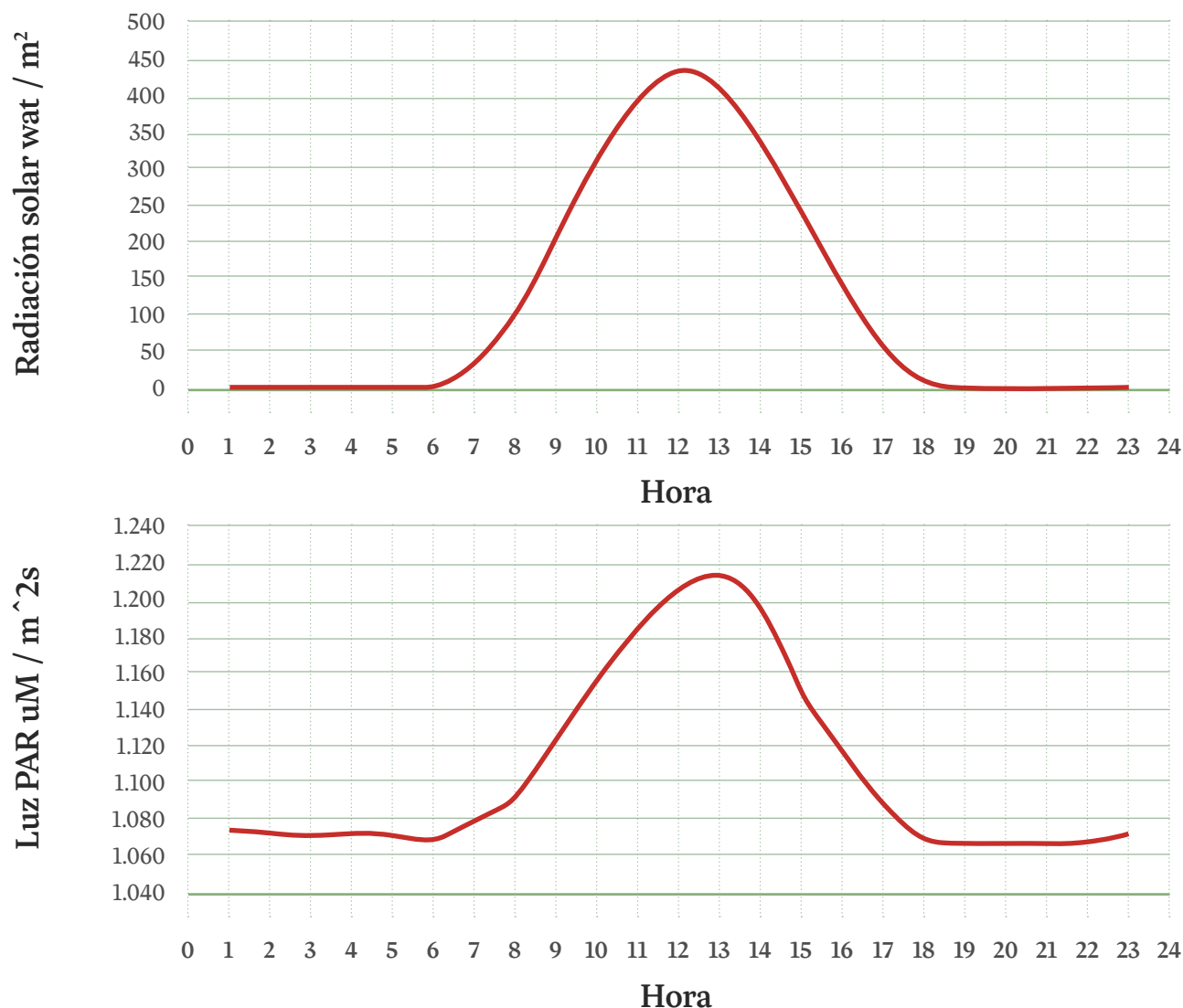


Figura 4.9. Radiación solar global y radiación fotosintéticamente activa (PAR). a. Radiación solar por horas; b. Luz PAR por horas.

Fuente: Elaboración propia

Las condiciones lumínicas registradas durante el periodo de evaluación (figura 4.9) mostraron una distribución típica de días despejados bajo condiciones de invernadero. La radiación solar global presentó un incremento progresivo desde las primeras horas de la mañana, alcanzando su valor máximo cerca del mediodía (alrededor de 450 W/m²), para luego disminuir gradualmente hacia la tarde. De manera coherente, la radiación fotosintéticamente activa (PAR) siguió una

tendencia similar, con un pico máximo cercano a las 12:30 h. de aproximadamente 1.220 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Este comportamiento refleja una adecuada disponibilidad de energía radiante para los procesos fotosintéticos durante las horas de mayor actividad fisiológica del cultivo. La estabilidad de las curvas, sin fluctuaciones abruptas, evidencia además un control ambiental adecuado dentro del invernadero, lo que favoreció la homogeneidad de las condiciones experimentales.



Cálculo de la lámina de riego e instalación del sistema de riego

El cálculo de la lámina de riego se hizo a partir de la ecuación de Penman-Monteith, los datos climáticos obtenidos de la estación Watchdog series 2000 y los coeficientes del cultivo por etapa o calculados en Sánchez et al. (2003) para variedades de *Capsicum* sp. Los coeficientes del cultivo y las láminas de riego calculadas se presentan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Necesidad de riego en lámina por día para cada etapa del cultivo

Etapas	Kc	Lr mm/día	Tiempo Riego min/día
Vegetativa	0,65	2,29	29
Floración	0,97	3,41	44
Fructificación	1,06	3,73	48
Cosecha	1,13	3,97	51

Fuente: Elaboración propia con base en Sánchez et al. (2003)

El área de riego neta que se tenía establecida bajo invernadero correspondió a 410 m², con lo que se calculó el volumen de agua aplicado por mes en el invernadero, que corresponde a los meses de enero, febrero y marzo, los de mayor necesidad de riego, con 1,7 m³ por mes en la etapa de cosecha.



Posteriormente al cálculo de las láminas de riego, se procedió a seleccionar el mejor sistema de riego para el cultivo. El sistema por goteo es, según Pinto-Zapata et al. (2013), el más eficiente, ya que garantiza la buena producción y suministra los volúmenes de agua requeridos por el cultivo; además, permite la aplicación de fertilizantes con el riego. El sistema empleado consistió en riego por goteo a doble línea cada 20 cm, con goteros cada 10 cm, impulsado por una bomba de referencia WEG NBR7094, con una potencia de 7,5 hp, utilizada para alimentar todos los sistemas de riego ubicados en la parte baja del centro de investigación (figura 4.10). En el caso específico del invernadero con cultivo de ají, se instalaron reductores de presión, debido a que la potencia de la bomba resultaba elevada para el sistema de riego por goteo, aunque con suficiente capacidad para garantizar el suministro de agua al sistema.



Figura 4.10. Sistema de riego por goteo. a. Cabezal de riego por goteo para el cultivo; b. Líneas de goteo.

Foto: Cristian Dominguez Pulgarin

Tanto el cabezal como la conducción principal se construyeron móviles, para facilitar el traslado del sistema de riego a otras parcelas experimentales, en caso de que se requiriera en algún momento. La figura 4.11 presenta el esquema del sistema de riego.

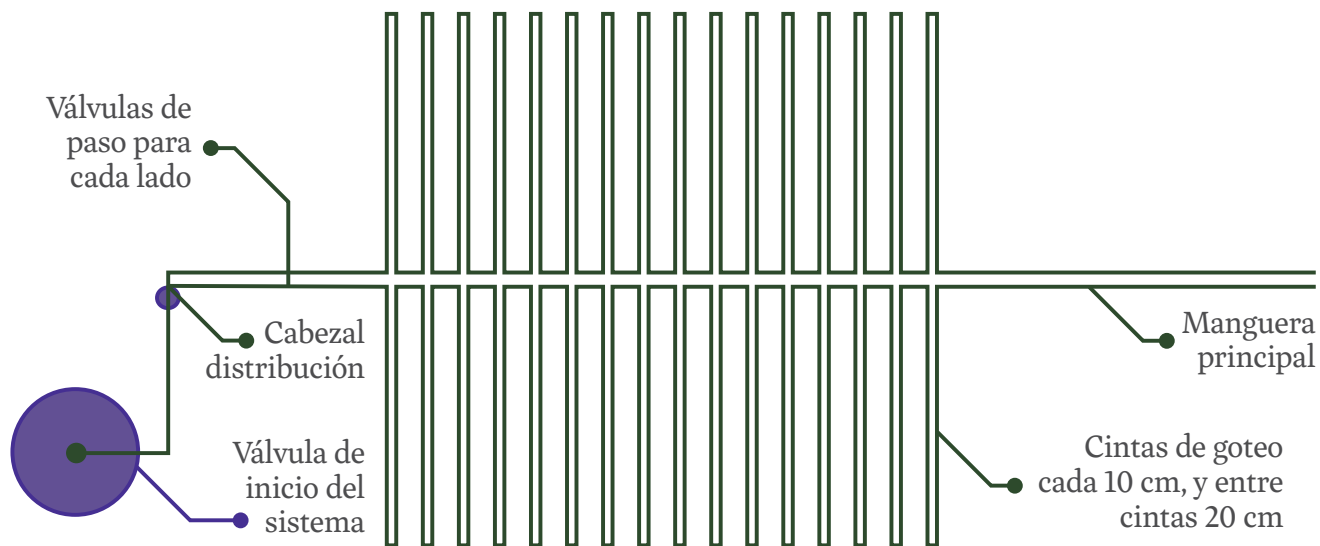


Figura 4.11. Esquema del sistema de riego por goteo.

Fuente: Elaboración propia

Manejo del drenaje en el lote

Las condiciones del clima en el Oriente antioqueño se caracterizan por presentar una temperatura entre 16 y 20 °C, régimen de lluvia bimodal con dos periodos de lluvia entre abril y mayo, y entre octubre y noviembre, aunque esto puede variar significativamente. Las precipitaciones pueden oscilar entre 1.000 y 4.000 mm al año (Cornare, 2012).

Un alto régimen de lluvias durante ciertos periodos del año, combinado con una topografía plana o casi plana, generan niveles freáticos elevados (Salazar Molina,

2010). Para el caso de cultivos de *Capsicum* sp., es importante evitar encharcamientos por largos periodos de tiempo, ya que un alto nivel freático es un obstáculo para el desarrollo de raíces y puede causar daño en el sistema radicular por el ataque de enfermedades.

Una forma sencilla de monitorear el nivel freático es hacer un hoyo en el suelo con un barreno holandés a una profundidad de 1 m y evaluar a qué distancia se encuentra el agua de la superficie del suelo, como se puede observar en la figura 4.12.

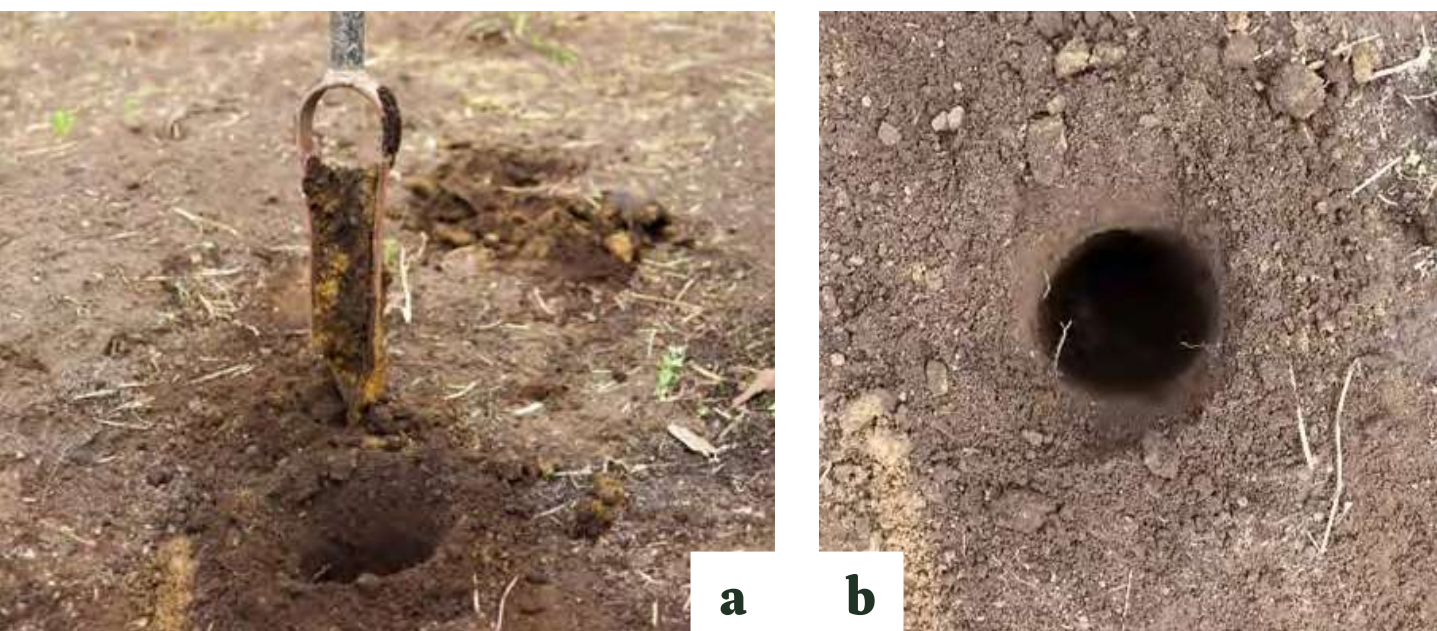


Figura 4.12. Monitoreo de nivel freático. a. Barreno holandés; b. Hoyo de observación de nivel freático.

Fotos: Cristian Dominguez Pulgarin

No existen reportes de recomendaciones para mantener el nivel freático hasta cierta altura para este tipo de cultivos, pero se encontró que Salazar Molina (2010) recomienda mantener el nivel freá-

tico un 20 % por debajo de la profundidad promedio de las raíces, para cualquier cultivo. En este caso, las raíces llegan hasta una profundidad de 70 cm, lo que equivale a un nivel de 84 cm.

Manejo de la fertilización

Para su desarrollo y producción, los cultivos de *Capsicum* spp. requieren el suministro adecuado de elementos mayores (C, H, O, N, P, K, Ca, Mg y S) y elementos menores (Mn, B, Cu, Fe, Zn y Mo). Los niveles de extracción y los requerimientos del cultivo son diferentes de acuerdo al suelo y a la variedad (Pinto-Zapata et al., 2013). En estudios realizados por Azofeira y Moreira (2008) se encontró que los valores de extracción de los nutrientes variaron según la etapa productiva. Al final del ciclo, K, Ca y Mg se acumularon principalmente en la

parte aérea; P y S, en los frutos, y N, en los frutos y en la parte aérea. Los mismos autores encontraron variación de los valores nutricionales en las etapas de desarrollo. Al final del ciclo, las plantas acumularon mayor cantidad de N, P, Mg, K y S en los frutos, y Ca en la parte aérea.

Los niveles de extracción correspondientes a algunas especies del género *Capsicum* sp., como ají y pimentón, para obtener un rendimiento de 7,9 t/ha y 27,5 t/ha, respectivamente, se presentan en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Niveles de extracción para algunas especies del género *Capsicum* spp.

Cultivo	Kg/ha					
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca	Mg	S
Ají	60	8	80	32	7	8
Pimentón	139	26	180	23	13	15
	g/ha					
	B	Cu	Zn	Mn	Fe	
Ají	275	350	108	423	1.110	
Pimentón	244	250	181	490	1.896	

Fuente: Elaboración propia con base en Microfertisa (1994)

En la parcela establecida en el C. I. La Selva se inició con la aplicación de materia orgánica y cal, como se explicó en el apartado de aplicación de enmiendas. Posteriormente, se aprovechó la existencia del sistema de riego por goteo para hacer la aplicación

de los fertilizantes en los mismos turnos de riego. Se contó con la asesoría de una empresa del sector de fertirriego para la selección de los productos según el análisis de suelos. Los productos aplicados se presentan en la tabla 4.3.



Tabla 4.3. Productos utilizados para la fertilización

Producto	Composición
Producción	10-3-40 + elementos menores
Inicio	15-25-10-2 (MgO) -2 (S) + elementos menores
Menores	3-0-3 + elementos secundarios y menores
Humus	Contienen ácidos húmicos, por lo cual son agentes naturales quelantes, lo que ayuda a la movilización de macro y micronutrientes en el suelo
Producto con calcio	Nitrógeno total (N): 7,0 % Nitrógeno nítrico (N): 7,0 % Calcio total (CaO)*: 12,0 % Agentes quelatantes* (EDTA y ácido cítrico) pH en solución al 10 %: 3,5 Densidad a 20 OC: 10,0 g/100 m

Fuente: Elaboración propia

La periodicidad de aplicación y las dosis de los productos se presenta en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Periodicidad y dosis de aplicación de los productos de fertirriego

Producto	Dosis g/m ³	Periodicidad de aplicación
Inicio	450	Semanal
Producción	500	Semanal
Menores	500	Quincenal
Humus	300 ml	Quincenal
Calcio	160	Quincenal

Fuente: Elaboración propia

La tabla 4.5 presenta la composición de cada uno de los productos aplicados en el fertirriego. Durante la implementación de este sistema se tuvieron en cuenta las características físico-químicas tanto del agua como del suelo, con el fin de garantizar una adecuada disponibilidad de nutrientes y evitar problemas de salinidad o acidez. El agua utilizada, con un pH de 4,8 y una conductividad eléctrica (CE) de 0,776 dS/m, presentó una ligera acidez, pero sin riesgo de salinización, por lo que se realizaron ajustes en

el manejo del pH mediante la adición controlada de enmiendas y fertilizantes compatibles. El suelo, con pH 5,94 y CE 1,6 dS/m, mostró acidez leve y salinidad moderada, condiciones que se corrigieron aplicando enmiendas calcáreas y estableciendo un plan de monitoreo periódico del pH y la CE para evitar acumulación de sales en el perfil. Estas medidas permitieron mantener un equilibrio químico adecuado en la zona radicular, optimizar la eficiencia del fertirriego y asegurar un desarrollo eficiente de los cultivos.

Tabla 4.5. Composición de los productos aplicados en el fertirriego

Producto	dosis g o cc/m ³	NH ₄	NO ₃	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	S	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
Inicio	450,00	52,65	14,85	67,50	112,50	45,00		9,00	9,00	1,35	1,35	0,14	1,35	0,90	0,02
Producción	500,00	1,50	48,50	50,00	15,00	200,00		5,00	5,00	1,50	1,50	0,15	1,50	1,00	0,03
Calcio	160,00			11,20			19,20								
Humus	300,00														
Menores	60,00	1,80		1,80		1,80		2,40	6,00	1,50	3,00	0,18	3,60	1,50	0,18
ppm Aplicadas		63,45	125,85	205,50	127,50	261,80	94,20	41,40	20,00	4,60	6,10	0,52	6,60	3,50	0,25

Fuente: Elaboración propia



Tutorado

Debido a la fragilidad de los tallos y a la longitud que pueden alcanzar, las plantas de *Capsicum* tienden a inclinarse hacia los lados, lo que dificulta el desplazamiento de los operarios y la ejecución de labores agronómicas, como el manejo sanitario, el control de arvenses, la fertilización y la cosecha.

Para evitarlo, las ramas deben orientarse mediante un sistema de tutorado que facilite una arquitectura adecuada de las plantas, mejore la aireación del cultivo y permita realizar las labores de manejo con mayor eficiencia.

Entre los sistemas de tutorado más empleados se destaca el tradicional, que consiste en colocar hilos de polipropileno horizontales dispuestos a distintas alturas y que sujetan las plantas entre ellos, y el holandés, que consiste en que cada uno de los tallos seleccionados a partir de la poda de formación se sujeta al emparrillado con un hilo vertical, que se va liando a la planta conforme va creciendo. El sistema holandés requiere mayor inversión en mano de obra con respecto al tutorado tradicional, pero supone una mejora de la aireación general de la planta y favorece el aprovechamiento de la radiación (Pino et al., 2018).

Manejo de arvenses

El manejo de arvenses tiene como propósito evitar la competencia por agua, luz y nutrientes en el cultivo, así como reducir la presencia de plantas hospederas de insectos o patógenos que puedan causar enfermedades en las plantas. Esta labor se realizó mediante el uso de la cobertura o Agromulch, y manualmente, con azadón en las calles.

Reflexión

Es importante recordar que las características fenotípicas de un material se deben a la genética (genotipo) y a la interacción de esta con las condiciones medioambientales en las que se desarrolla o desenvuelve la planta. Por consiguiente, el manejo es el principal factor ambiental, el cual, junto al clima y las condiciones abióticas, desempeñan un papel importante en las caracterizaciones y las evaluaciones de materiales genéticos.



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Referencias

- Azofeira, A., & Moreira, M. A. (2008). Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. CV. HOT) en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 32(1), 19-29. <https://www.redalyc.org/pdf/436/43632104.pdf>
- Carvajal Diguay, K. G., & Gómez Badillo, C. A. (2016). *Efecto de la aplicación de cal dolomita sobre el pH del suelo y rendimiento de sorgo sureño en suelos de uso agrícola, Zamorano, Honduras* [Tesis de grado, Escuela Agrícola Panamericana]. Biblioteca digital Zamorano. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/91690727-b306-49ee-9d27-25d45f434165/content>
- Cornare. (2012). *Evaluación y Zonificación de riesgos por avenida torrencial, inundación y movimientos en masa y dimensionamiento de procesos erosivos en el municipio de Rionegro*. <https://www.cornare.gov.co/GestionRiesgo/RIONEGRO/Informe-Rionegro.pdf>
- Gil-Marín, J. A., Montaña-Mata, N. J., & Plaza, R. (2012). Efecto del riego y la cobertura del suelo sobre la productividad de dos cultivares de ají dulce. *Bioagro*, 24(2), 143-148. <https://www.redalyc.org/pdf/857/85723473009.pdf>
- Hernández Sánchez, E. (2014). *Manual acolchados vegetales y películas plásticas*. Universidad Tecnológica de Tula-Tepeji. <https://www.utt.edu.mx/extensionismo/Informacion/Publicaciones/Serie.%20Agricultura%20Regenerativa/4.-Acolchados%20vegetales.pdf>
- Jaramillo, D. F. (2011). *El suelo: origen, propiedades, espacialidad*. Universidad Nacional de Colombia.
- Kamprath, E. J. (1970). Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Science Society of America Journal*, 34, 252-254. <https://www.scilit.com/publications/23aaf303d40e26a24ef94b451065336f>
- Microfertisa. (1994). *Manual técnico*. <https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/a99c4696-0a43-4e78-baac-ab664f9a9348/content>
- Navarro García, G., & Navarro García, S. (2013). *Química agrícola: química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas* (3.ª Ed.). Mundi Prensa.
- NSW Department of Primary Industries. (2021). *Soil acidity and liming (Primefact AC.19, 4th ed.)*. NSW DPI. https://www.dpi.nsw.gov.au/_data/assets/pdf_file/0005/1366421/AC.19-4th-edition-2021.pdf
- Pino, M. T., Campos, A., Saavedra, J., Álvarez, F., Salazar, C., Hernández, C., Soto, S., Estay, P., Vitta, N., Escaff, M., Pabón, C., & Zamora, O. (2018). Pimientos para la industria de alimentos e ingredientes. *Boletín INIA*, 360. <https://biblioteca.inia.cl/items/dc376c4e-18bd-4992-8679-75d167f00985>



- Pinto Zapata, M., Baquero Maestre, C., Guzmán Rozo, N., Páez Redondo, A., Rebolledo Podleski, N., & Martínez Bustamante, E. (2005). *Tecnología para la producción de ají chino en la Costa Atlántica*. Corpoica. <https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/8873cdd1-a256-4d1d-894c-9ef9e8df5131/content>
- Pinto-Zapata, M. J., Correa-Álvarez, E. M., Jiménez-Mass, N., Páez Redondo, A. R., Guzmán-Rozo, N., & Baquero-Maestre, C. (2013). *Modelo productivo del cultivo del ají topito (Capsicum spp.) para la región Caribe*. Corpoica. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/34309>
- Saavedra, G., Jana, C., & Kehr, E. (2019). *Hortalizas para procesamiento agroindustrial*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). <https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/e7b0239a-d9aa-4736-a760-000c351eb65d/content>
- Salazar Molina, C. A. (2010). *El drenaje agrícola en el cultivo del banano: aplicado a las zonas bananeras de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia.
- Sánchez, C., Jaraba, D., Medina, J., Martínez de la Cruz, J., & Martínez, A. (2003). Requerimientos hídricos del ají dulce (*Capsicum annum* L.) bajo riego por goteo en el Valle del Sinú medio. *Temas Agrarios*, 8(1), 11-20. <https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/611>
- Iowa State University Extension and Outreach. (2023). *A general guide for crop nutrient and limestone recommendations in Iowa (PM 1688)*. Iowa State University. <https://store.extension.iastate.edu/product/pm1688-pdf>
- Sumner, M. E., & Miller, W. P. (1996). *Cation exchange capacity and exchange coefficients*. En D. L. Sparks, A. L. Page, P. A. Helmke, R. H. Loeppert, P. N. Soltanpour, M. A. Tabatabai, C. T. Johnston, & M. E. Sumner (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods* (pp. 1201-1229). Soil Science Society of America. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/sssabookser5.3.c40>







Título de la obra

Entomofauna asociada

Técnica

Ilustración digital con tableta, pincel en
textura de carboncillo

Autora

Laura Stefanny López Cortés (Sstefcore)



@sstefcore



Stefanny López

- Capítulo V -

Insectos fitófagos asociados a diferentes materiales de *Capsicum*

José Antonio Rubiano-Rodríguez, Carlos Enrique Velásquez Arroyo, Carolina Ortiz
Muñoz, Yenifer Campos-Patiño, Takumasa Kondo

El cultivo de *Capsicum* spp. se ve afectado por un amplio complejo de insectos fitófagos que incluye áfidos, trips, ácaros, lepidópteros, mosca blanca y minadores, los cuales generan pérdidas significativas en rendimiento y calidad del fruto. Este estudio describe la incidencia, daño y dinámica poblacional de estas plagas en 280 materiales evaluados en condiciones protegidas durante 2023, y en 34 materiales establecidos en dos localidades durante 2024. Los resultados evidenciaron que *Myzus persicae* y *Thrips* spp. fueron las plagas más frecuentes, afectando el 100 % de los materiales evaluados, mientras que *Capsicum pubescens* mostró menor susceptibilidad al ataque de trips. Asimismo, se registraron niveles variables de parasitismo natu-

ral, destacándose *C. chinense* y *C. frutescens* con los mayores promedios, lo que evidencia la relevancia de los enemigos naturales en la regulación poblacional. Otras plagas, como *Spodoptera frugiperda*, *Chrysodeixis includens*, *Bemisia tabaci* y *Liriomyza* spp., presentaron menor frecuencia, pero efectos económicos relevantes según el estado fenológico del cultivo. Los resultados subrayan la importancia de estrategias integradas de manejo basadas en prácticas agronómicas adecuadas, conservación de controladores biológicos, uso de insumos de origen natural y aplicación racional de insecticidas. Este enfoque promueve un control más sostenible, reduce riesgos ambientales y favorece la productividad del cultivo de *Capsicum*.



Introducción

Los insectos fitófagos se pueden convertir en plagas de los sistemas agrícolas, debido al valor nutricional de las plantas, principalmente en nitrógeno (Rusch et al., 2017). Actualmente, las diferentes especies del género *Capsicum* L. (Solanaceae) llegan a presentar una baja en la producción de los cultivos, debido al ataque indiscriminado de plagas que impactan los rendimientos y la calidad de estos, lo que afecta diferentes órganos de las plantas, como hojas, flores y frutos (Franco-Ruiz et al., 2021). Entre los insectos plaga que afectan los cultivos se destacan las especies de áfidos *Aphis gossypii* Glover y *Myzus persicae* (Sulzer) (Hemiptera: Aphididae); los ácaros *Polyphagotarsonemus latus* (Banks) (Acari: Tarsonemidae) y *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae), así como la negrita, *Prodiplosis longifila* Gagné (Diptera: Cecidomyiidae) (Meza et al., 2022). De igual forma, en México se han reportado la mosca blanca, *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Hemiptera: Aleyrodidae); el picudo del chile, *Anthonomus eugenii* Cano (Coleoptera: Curculionidae), y minadores del género *Liriomyza* Mik (Diptera: Agromyzidae) (Berny-Mier y Teran et al., 2013). En el caso de los lepidópteros, que pueden actuar como defoliadores y perforadores de frutos, se han reportado *Helicoverpa zea* (Boddie) (Gío-Trujillo & Cámara-Romero, 2023), *Chrysodeixis includens* (Walker) (antes *Pseudoplusia includens*) (Specht et al., 2015) y *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Wu et al., 2021).

En cuanto al manejo de estos insectos fitófagos, el método de control más usado por los agricultores alrededor del mundo es el químico, mediante aplicaciones

generalmente de tipo calendario, usando productos altamente tóxicos. Con esto se contaminan aguas subterráneas y se pone en riesgo la salud tanto del productor como del consumidor, por trazas en el producto final, lo que repercute en contaminación del ambiente y riesgos en la salud de los productores (Monsalvo Espinosa et al., 2020).

En este capítulo se abordarán las diferentes plagas que se presentaron con mayor frecuencia durante la evaluación de 284 accesiones del género *Capsicum* cultivadas bajo cubierta, y que pueden ser limitantes o de importancia económica para el productor. Por lo anterior, los autores desarrollan los resultados de su temática así: en un primer bloque se presentan los insectos que causan afectaciones en los cultivos del género *Capsicum* y se describen sus principales daños, para luego compartir estrategias con miras a su manejo en el cultivo. Posteriormente, en el segundo bloque, se presentan los principales insectos que se encontraron en 284 accesiones del género *Capsicum*, en el ensayo realizado durante el año 2023, en el C. I. La Selva de AGROSAVIA. En esta sección se presentan los resultados con los daños reportados por especie. Finalmente, en el tercer y último bloque se muestran los resultados de un ensayo adicional realizado en 2024, en el C. I. La Selva y en el C. I. Palmira, donde se establecieron dos parcelas en cada lugar para evaluar la respuesta de 34 materiales de *Capsicum* spp. al manejo agronómico para el control de insectos plaga y la respuesta a la ausencia de manejo. Se hizo un análisis por separado sin llegar a comparar los resultados de las dos localidades.

Áfidos o pulgones

Son pequeños insectos de no más de 10 mm, su coloración es diversa y depende del hospedero de cual se están alimentando (Delfino et al., 2007). Estos insectos incluyen plagas cosmopolitas y polífagas que afectan más de 40 familias de plantas, entre las cuales se encuentran frutales, gramíneas, forestales y hortalizas

(Torres-Quintero et al., 2022). En cultivos de *Capsicum* se ha reportado *A. gossypii*, *Macrosiphum euphorbiae* (Thomas), *M. persicae* y *M. persicae* var. *nicotianae* (Castresan et al., 2013; Wilberts et al., 2023). Estos dos últimos se encontraron en diversos materiales de *Capsicum* evaluados en el C. I. La Selva de AGROSAVIA, durante el año 2022, bajo cubierta (figura 5.1). En el trópico solo existe la reproducción partenogenética y todas las generaciones son vivíparas, con un ciclo de vida de 8 a 10 días, aproximadamente, de manera que se forman colonias ápteras y se presentan generaciones aladas cuando el recurso alimenticio escasea y se ven en la necesidad de dispersarse en busca de alimento (Rubiano-Rodríguez et al., 2019).



Figura 5.1. Áfidos encontrados en *Capsicum* en el C. I. La Selva. a. Colonia de áfidos verdes (*M. persicae*) y rojos (*M. persicae* var. *nicotianae*); b. Acercamiento a la colonia en el que se observan áfidos verdes, rojos y alados.

Fotos: José Antonio Rubiano Rodríguez y Carlos Enrique Velásquez Arroyo

Descripción del daño

Los áfidos se encuentran en los brotes jóvenes, donde se alimentan de la savia de las hojas, lo que causa que estas se encrespen y adquieran color amarillo (figura 5.2a); son más activos en las épocas secas y causan el mayor daño en los órganos tiernos de la planta (De-dryver et al., 2010); también forman colonias de ninfas, adultos ápteros y alados en el envés de las hojas, y se localizan principalmente en las partes tiernas de la planta, como brotes apicales de las ramas y hojas nuevas (figura 5.2b). Al succionar la savia de las plantas, estos insectos chupadores producen una secreción azucarada que se asocia con una determinada

cantidad de hongos que forman la sintomatología de la fumagina y también atraen hormigas (Castresan et al., 2013). Otro daño indirecto que causan los áfidos es la transmisión de enfermedades virales que afectan los cultivos de *Capsicum*. Por ejemplo, *A. gossypii* transmite el virus del mosaico de pepino (CMV, por su sigla en inglés) y el virus del moteado venoso (CVMV, por su sigla en inglés) del ají. En el caso de *M. persicae*, transmite el CMV, el virus del moteado venoso del pimiento (PVMV, por su sigla en inglés) y el virus Y de la papa (PVY, por su sigla en inglés) (Duque-Gamboa et al., 2021).



a



b

Figura 5.2. Síntoma del ataque de áfidos en cultivos de *Capsicum*. a. Encrespamiento de las hojas; b. Colonia de áfidos en hojas y brotes jóvenes.

Fotos: Carlos Enrique Velásquez Arroyo



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Manejo

La implementación de buenas prácticas agrícolas, como los riegos oportunos, evita el estrés de las plantas. Dicho estrés las hace más susceptibles al ataque de insectos. Se debe realizar una fertilización adecuada, evitando el exceso de nitrógeno, ya que, según Sarandón (2002), los excesos de una fertilización nitrogenada favorecen el aumento de poblaciones de insectos chupadores. También deben implementarse adecuadas distancias de siembra y el control de plantas arvenses, que sirven de hospederos alternos (Perzabal-Ramos et al., 2018). La conservación de los agentes de control biológico es, así mismo, importante, ya que se ha reportado un buen porcentaje de parasitismo natural por parasitoides de los géneros *Aphidius* Esenbeck, *Lysiphlebus* Förster, *Praon* Haliday (Hymenoptera: Braconidae) y *Aphelinus* Dalman (Hymenoptera: Aphelinidae), entre otros (Bañol Pérez et al., 2017; Mazzitelli et al., 2018). De igual forma, se debe tener en cuenta la presencia de depredadores como los coccinélidos, dentro de los cuales están *Cycloneda sanguinea* (Linnaeus) y *Coleomegilla maculata* De Geer (Coleoptera: Coccinellidae), así como las crisopas *Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neuroptera: Chrysopidae) (Rodríguez-Vélez et al., 2019).

También existen hongos entomopatógenos, como *Isaria fumosorosea* Wize, *Beauveria bassiana* (Bals.-Criv.) Vuill. (Fungi: Hypocreales: Cordycipitaceae) y *Metarhizium anisopliae* (Metchnikoff) Sorokin (Fungi: Hypocreales: Clavicipitaceae), que ejercen un buen control de áfidos cuando se aplican de manera oportuna (Allegrucci et al., 2020). Los productos de origen natural, como el extracto de ajo-ají, el neem, los aceites esenciales y el jabón potásico, son una buena alternativa para el manejo de los áfidos bajo el contexto de producción limpia (Castresan et al., 2013; Vélez-Ruiz et al., 2022). Finalmente, y como última opción, está el control químico: se pueden realizar aplicaciones de insecticidas a base de los siguientes ingredientes activos: acetamiprid, imidacloprid, lambda-cyhalotrina, tiametoxam y tiacloprid (Larraín, 2012), siempre siguiendo las recomendaciones de un profesional del agro. Sin embargo, se debe tener la mayor precaución con el uso de estos insecticidas, pertenecientes a los grupos químicos de piretroides y neonicotinas, ya que afectan altamente a la entomofauna benéfica, especialmente a los polinizadores (Henry et al., 2012).



Trips

Los trips (Thysanoptera) son una de las plagas agrícolas de mayor importancia a nivel mundial; son insectos chupadores y penetrantes que causan deformaciones y retraso en el crecimiento (Macel et al., 2020). Los trips son polífagos que afectan diferentes cultivos hortícolas, como cebolla, col, frijol y solanáceas, como lo son los diferentes cultivos de *Capsicum*. Se ha reportado que estos son principalmente afectados por *Frankliniella occidentalis* Pergande y *Thrips palmi* Karny (Thysanoptera: Thripidae) (figura 5.3c),

tanto en invernadero como a campo abierto (Sanad & Hassan, 2019). Son insectos muy pequeños, de máximo 2 mm, generalmente de color amarillo y marrón, y adquieren importancia porque los adultos y ninfas prefieren posar en las flores (figuras 5.3a y 5.3b), y se alimentan de los tejidos jóvenes de las plantas (Córdova Vega, 2015). Estas dos especies de trips tienen un ciclo de vida similar, desde huevo hasta adulto, que puede durar en promedio 15 días; las hembras adultas viven entre 15 y 20 días (Belles, 2013).

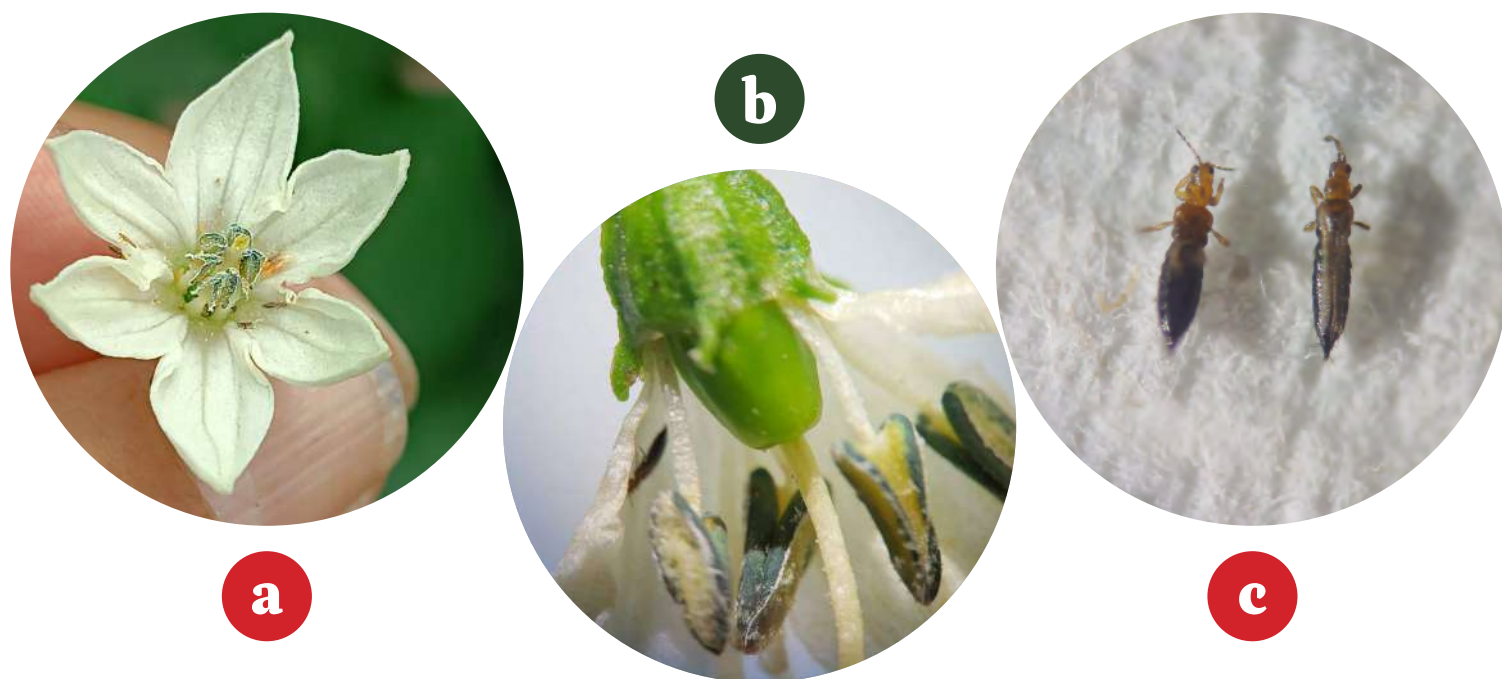


Figura 5.3. Trips observados en el cultivo de *Capsicum*. a. Trips en flor de *Capsicum* spp.; b. Acercamiento a una flor con trips en su interior; c. Dos individuos de *T. palmi*.

Fotos: Carlos Enrique Velásquez Arroyo

Descripción del daño

Los trips afectan cultivos de *Capsicum* directamente al alimentarse de hojas, frutos o flores (Tommasini & Maini, 1995). Tanto los adultos como las larvas succionan la savia, con lo que dejan pequeñas cicatrices, lo cual produce en las hojas una apariencia de color gris-plateado. Generan un daño directo sobre el fruto, creando cicatrices en forma de cremallera. En el caso de las hojas, provocan un encrespamiento y reducen la capacidad fotosintética (Patiño-Martínez et al., 2019). Además del daño directo que ocasionan al alimentarse, producen un daño indirecto que consiste en la transmisión de virus mediante sus picaduras, especialmente el virus del marchitamiento manchado del tomate (TSWV, por su sigla en inglés) y el CMV (Maharijaya et al., 2019).

Manejo

Con una buena preparación del terreno, por ejemplo, haciendo un volteo del suelo, se eliminan estados inmaduros que pasan allí su ciclo. Se recomienda el monitoreo con el uso de trampas azules con pegante, las cuales se deben revisar semanalmente. La abundancia de población a permitir dentro del cultivo dependerá de la presencia de virus (Arévalo et al., 2009). Como se mencionó anteriormente, deben implementarse buenas prácticas agronómicas. Los trips tienen enemigos naturales que actúan como controladores biológicos, dentro de los cuales están el hongo *B. bassiana*; depredadores, como la crisopa *Chrysoperla externa* (Hagen) (Neuroptera: Chrysopidae); la mariquita *C. maculata*;

los chinches piratas, *Orius* spp. (Hemiptera: Anthrenidae); chinches ojones, *Geocoris* spp. (Hemiptera: Geocoridae), y el ácaro depredador *Neoseiulus cucumeris* (Oudemans) (Acari: Mesostigmata: Phytoseiidae) (Fok et al., 2014). De igual forma, se pueden hacer aplicaciones de extractos de ajo-ají o de extractos naturales, como aceite de neem, *Stemona japonica* (Blume) Miq. (Stemonaceae) y té *Camellia sinensis* (L.) Kuntze (Theaceae), para el control de trips adultos. En el caso de que las poblaciones sean altas —más de cinco trips por planta en época de floración— o se encuentren varias plantas con síntomas de virus, se recomienda el control químico con ingredientes activos, como spinetoram, spinosad, imidacloprid y abamectina, siguiendo las recomendaciones de un profesional y las dosis de la etiqueta del producto (Nault & Shelton, 2012). Tal como se indicó anteriormente en el caso de los áfidos, se deben contemplar los riesgos que ocasiona el uso de estos insecticidas de síntesis química, los cuales tienen un efecto negativo, principalmente sobre los polinizadores.

Lepidópteros

En los cultivos de *Capsicum* se pueden encontrar varias especies de lepidópteros, principalmente de la familia Noctuidae, alimentándose de sus hojas y frutos. Dentro de las más importantes que se han reportado están: *Agrotis ipsilon* (Hufnagel) (figuras 5.4a y 5.4b) (Lee et al., 2023), *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Zhu et al., 2020), *S. frugiperda* (figuras 5.4c y 5.4d) (Wu et al., 2021), *C. includens* (figuras



5.4e y 5.4f) (Specht et al., 2015), y especies de la familia Crambidae, como *Neoleucinodes elegantalis* (Guenée) (De Moraes & Foerster, 2021). Dependiendo de la especie, los huevos son puestos individualmente o en masa. Es así como *Spodoptera* spp. colocan los huevos en el haz de las hojas. Estos son semiesféricos y reticulados, y pueden durar hasta 7 días. Las larvas pasan por 5 o 6 instares, que pueden durar hasta 28 días. Las pupas generalmente son de

color marrón y pueden durar hasta 15 días enterradas en el suelo, hasta la emergencia de los adultos, que generalmente son polillas de hábitos nocturnos (Guzmán Prada et al., 2016). En el caso de *C. includens*, los huevos son depositados sobre las hojas de forma individual; son globosos, de coloración que va de crema a amarillo. Las larvas son de color verde claro y pasan por 5 instares, con un ciclo de vida de aproximadamente 25 a 30 días (Specht et al., 2019).

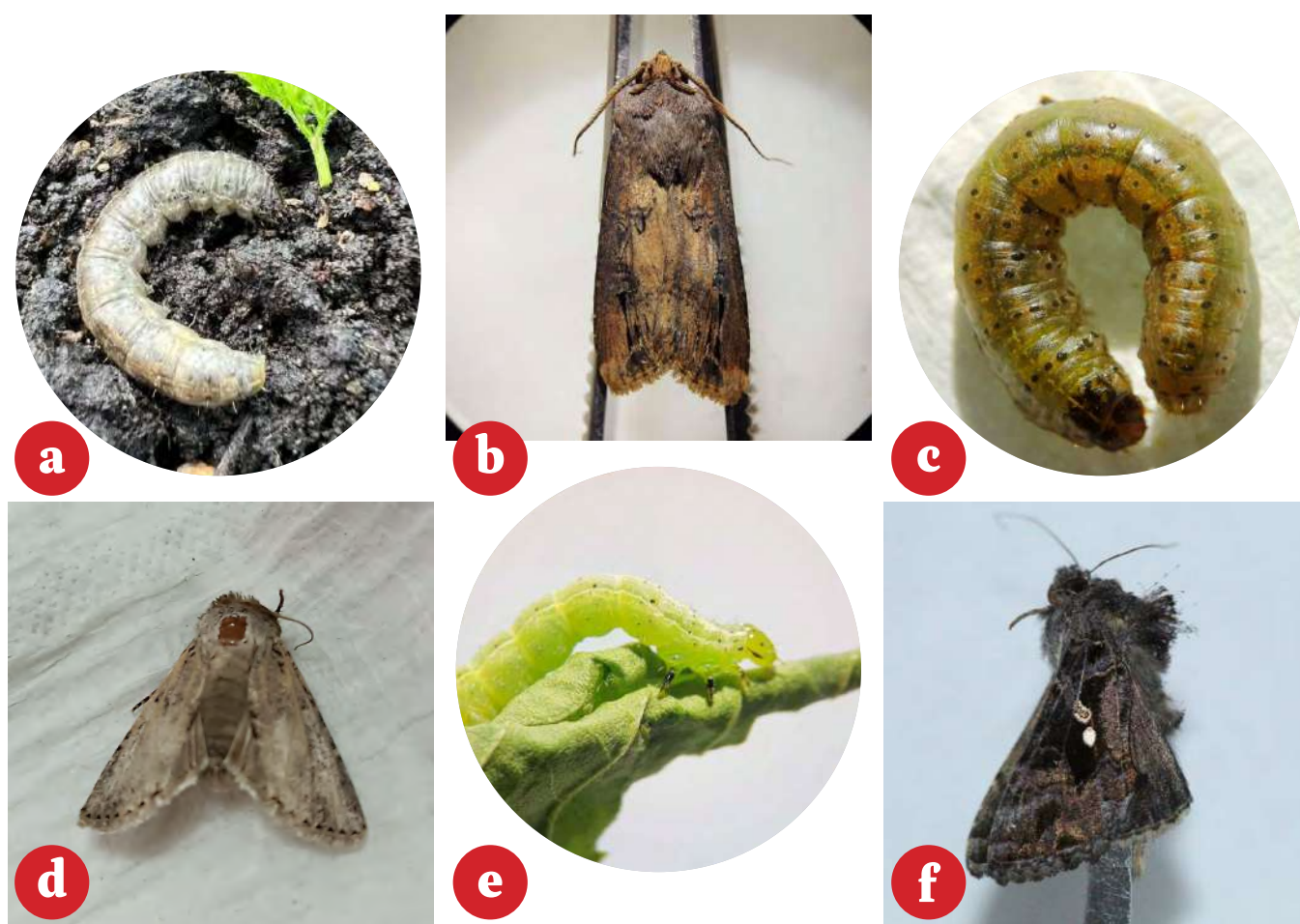


Figura 5.4. Lepidópteros de la familia Noctuidae. a. Larva de *A. ipsilon*; b. Adulto de *A. ipsilon*; c. Larva de *S. frugiperda*; d. Adulto de *S. frugiperda*; e. Larva de *C. includens*; f. Adulto de *C. includens*.

Fotos: José Antonio Rubiano Rodríguez y Carlos Enrique Velásquez Arroyo

Descripción del daño

Algunas de estas especies actúan como trozadores, como *A. ipsilon* y *S. frugiperda*, cortando o trozando a ras del suelo las plántulas recién trasplantadas (figura 5.5a). En el caso de defoliadores como *S. frugiperda*, *C. includens* y *H. armigera*, las larvas de primer instar consumen la epidermis de las hojas, y, a partir del tercer instar, ya defolían la planta, consumiendo las hojas desde el borde hacia la ner-

vadura central (figura 5.5b). Especies como *S. frugiperda*, *H. armigera* y *N. elegantalis* llevan a cabo otro tipo de daño como perforadores de fruto: las larvas de primer instar perforan el fruto y se alimentan de la pulpa, y posteriormente salen de él para empupar y terminar su ciclo fuera de este, por lo cual el orificio que se observa es el de salida (figura 5.5c) y no el de entrada de la larva.



Figura 5.5. Daños causados por lepidópteros. A. Tallo trozado a nivel de ápice; b. Hoja consumida del borde hacia la nervadura central; c. Fruto perforado.

Fotos: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Manejo

El manejo de las diferentes plagas en el cultivo de *Capsicum* se debe enfocar siempre en prácticas con una visión de producción limpia, con el mínimo impacto ambiental. Dentro de estas están la liberación de enemigos naturales, como *Trichogramma exiguum* Pinto y Platner (Hymenoptera: Trichogrammatidae), que es un parasitoide generalista de los huevos de lepidópteros (Basso et al., 2020); se sugiere una dosis de 150 pulgadas²/ha. Otro enemigo natural es *C. externa*, depredador de huevos y primeros instares de lepidópteros (Hernández-Juárez et al., 2016); se recomienda liberar en dosis de 75 mil larvas/ha. También existen microorganismos, tales como *Bacillus thuringiensis* Berliner (Bacteria: Bacillales: Bacillaceae), que controlan larvas hasta de tercer instar; *B. bassiana* y *M. anisopliae*, que controlan larvas de todos los instares, e incluso afectan las pupas. Estos productos se deben usar en las dosis recomendadas en la etiqueta del producto (Sierra-Baquero et al., 2023). Para disminuir las poblaciones de adultos se recomienda instalar trampas con feromona y atrayentes con maleza al 50 % (Rubiano-Rodríguez et al., 2023). Como última medida de control, y si llegara a ser necesario, es posible aplicar productos de síntesis química, como cipermetrina, que es un insecticida de contacto, o lufenuron, que actúa como inhibidor de cre-

cimiento, con lo que controla estados larvales de primeros instares con un menor daño en el cultivo. Estas recomendaciones de uso siempre deben hacerse bajo la supervisión de un profesional del agro.

Ácaros

En los cultivos de *Capsicum*, los ácaros se han convertido en una plaga que puede llegar a ser limitante si no se lleva a cabo un manejo a tiempo. Las especies que se han reportado son: *P. latus* (figura 5.6a) (Bhullar et al., 2024) y *T. urticae* (figura 5.6b) (Khamis Al-Zahrani et al., 2023). Estas pueden ocasionar pérdida hasta del 80 % en la producción en cultivos como pimentón (Montoya et al., 2013). Las dos especies ovipositan en el envés de las hojas. En el caso de *T. urticae*, los huevos son redondos, hialinos, con tres estados inmaduros en los que van cambiando de tamaño y forma, hasta llegar al estado adulto, con un tamaño aproximado de 0,7 mm, con cuatro pares de patas. Su duración es de aproximadamente 25 días, desde huevo hasta adulto (Rodulfo Acuña et al., 2022). En el caso de *P. latus*, los huevos son semiesféricos, transparentes y hialinos. Posteriormente aparecen las larvas, de color blanquecino, con tres pares de patas. Tienen un ciclo de vida de 4 a 7 días (Rodríguez et al., 2017).



Figura 5.6. Ácaros encontrados en *Capsicum*. a. *P. latus*; b. *T. urticae*.

Fotos: José Antonio Rubiano Rodríguez y Carlos Enrique Velásquez Arroyo

Descripción del daño

Los ácaros forman sus colonias principalmente en las partes jóvenes de la planta, teniendo especial preferencia por las yemas apicales y el envés de las hojas jóvenes (figura 5.7a). Las ninfas y adultos son muy pequeños y difíciles de detectar. Generalmente se alimentan de la superficie inferior de la hoja y hacen que los bordes de estas se vuelvan rígidos y se enrollen ha-

cia abajo. Las hojas infestadas aparecen con pecíolos alargados; la planta parece atrofiada y con un crecimiento retardado (figura 5.7b). Menos de cinco ácaros en una planta joven de pimentón pueden causar daños graves, lo que resulta en una cantidad y calidad de frutos significativamente menor (figura 5.7c) por planta, y en un menor peso de estos (Weintraub et al., 2003).

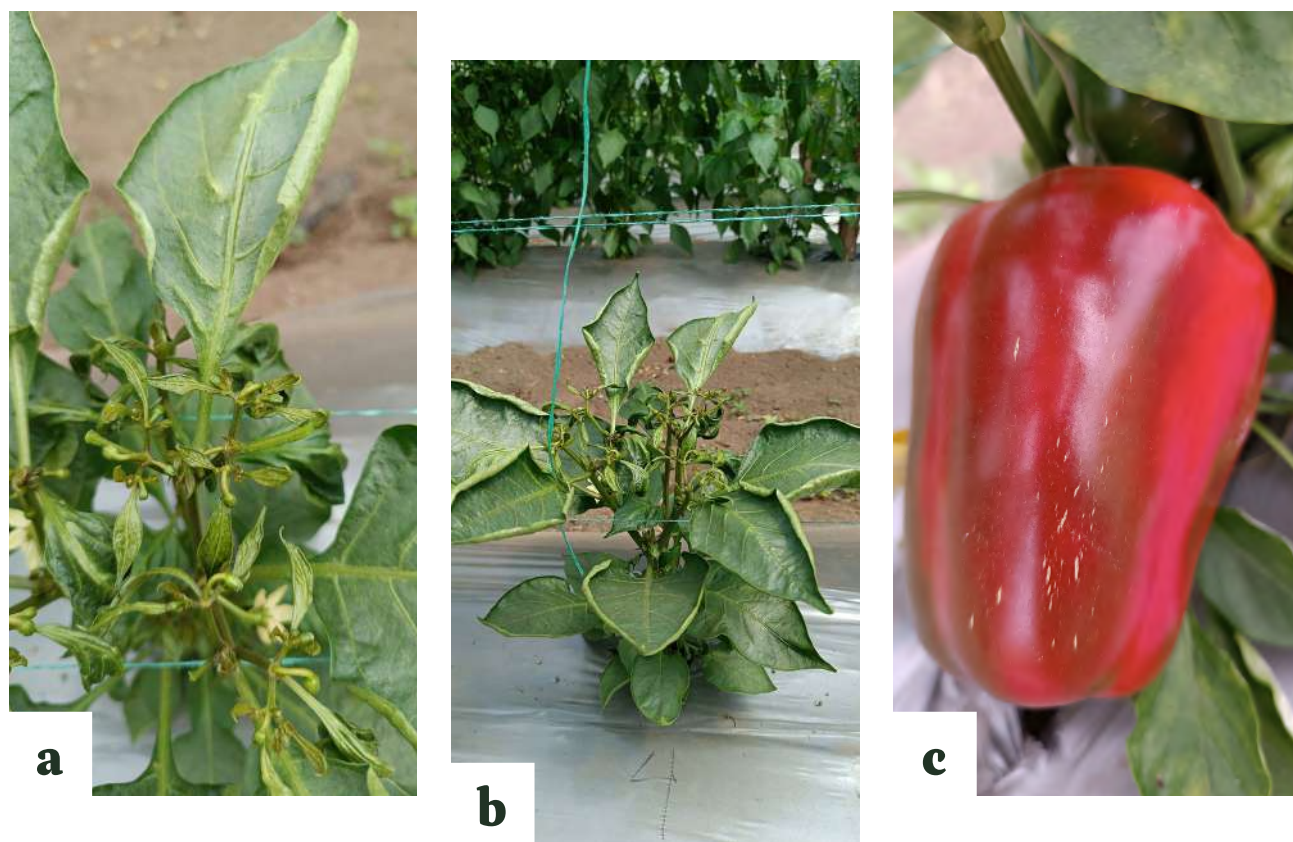


Figura 5.7. Síntomas causados por ácaros. a. Encrespamiento de hojas jóvenes; b. Planta pequeña con hojas encorvadas; c. Fruto con cicatrices o raspaduras.

Fotos: José Antonio Rubiano Rodríguez

Manejo

El manejo debe iniciarse destruyendo los residuos de cosecha, con lo que se elimina la fuente de inóculo. Es importante tener en cuenta la fertilización controlada de nitrógeno, pues excesos de este elemento favorecen el aumento de las poblaciones de plagas. Dentro de las prácticas de control biológico están: la liberación de depredadores como *C. externa*, *Neoseiulus* (= *Amblyseius*) *barkeri* Hughes y *Neoseiulus californicus* McGregor (Arachnida: Mesostigmata: Phytoseiidae) (Weintraub et al., 2003). También existen hongos entomopatógenos que hacen un buen control de ácaros, entre los que se pueden mencionar *B. bas-*

siana y *M. anisopliae* (Khamis Al-Zahrani et al., 2023). De igual forma, los extractos y aceites vegetales son una buena opción dentro del manejo ecológico de la plaga. El extracto de ajo-ají es ampliamente utilizado para el control de insectos chupadores; actúa como repelente y disuasor de alimentación, y puede llegar causar mortalidad en los insectos, debido al efecto de la alicina y la capsaicina. Otros productos naturales que actúan sobre esta plaga son el extracto o aceite de neem y el jabón potásico, en dosis de 2 cc/L, los cuales han dado buenos resultados en el control de aquella (Bhullar et al., 2024).

Mosca blanca

La mosca blanca es un pequeño insecto de aproximadamente 2 mm, de cuerpo blando, perteneciente al orden Hemiptera y a la familia Aleyrodidae; es una plaga polífaga que afecta varias especies de plantas cultivadas tanto en el trópico como en la zona templada, incluyendo pimentón. Frecuentemente se encuentra reposando en el envés de las hojas (figura 5.8a), y, además del el ají, ataca, entre otros, el tomate, repollo, pepino, berenjena, pepinillo, melón, calabaza, batata y algodón (Udiarto et al., 2023).

En el cultivo de pimentón se han reportado dos especies de mosca blanca que afectan el cultivo económicamente: *B. tabaci* (Hameed et al., 2023) y *Trialeurodes vaporariorum* Westwood (Lorenzo et al., 2016). Sus huevos son de forma oval-alargada, de color blanco-amarillento al inicio, y oscuro cerca de su eclosión. Presentan tres estados ninfales móviles y un cuarto inmóvil, conocido como pupa. El adulto mide unos 2 mm de largo y tiene un par de alas blancas (figura 5.8b) (Muñoz-Ponce et al., 2022).



Figura 5.8. Mosca blanca en *Capsicum*. a. Adultos en el envés de las hojas; b. Adulto en detalle, observándose alas y ojos rojos.

Fotos: José Antonio Rubiano Rodríguez y
Yenifer Campos-Patiño



Foto: Esteban Castaño Llanos

Descripción del daño

Las ninfas y adultos de la mosca blanca se ubican en el envés de las hojas, donde se alimentan chupando la savia de estas, lo que provoca deformación y clorosis; también proporcionan un entorno favorable para el crecimiento de hongos, lo que conforma la llamada fumagina (Hameed et al., 2023). Estos insectos causan daño directo, al alimentarse, y daños indirectos, por la transmisión de virus, especialmente los géneros *Begomovirus*, *Carlavirus*, *Crinivirus*, *Ipomovirus* y *Torradovirus* (Corozo-Quiñónez et al., 2024). En pimentón se ha registrado que la mosca blanca transmite virus como el *pepper yellow leaf curl Indonesia virus* (PepYLCIV) (Amaliah et al., 2023) y el *leaf curl virus* (virus de la hoja rizada del pimentón) (Das et al., 2021).

Manejo

Se debe realizar un monitoreo frecuente y llevar a cabo control de malezas con el fin de remover hospederos alternos y fuentes de virus (Jaramillo Noreña et al., 2014). La mosca blanca tiene una amplia gama de enemigos naturales, entre los que se pueden destacar

depredadores de familias como Coccinellidae (Coleoptera), Anthocoridae, Miridae (Hemiptera), Chrysopidae (Neuroptera) y Phytoseiidae (Acari) (Udiarto et al., 2023), y parasitoides, entre los que se han reportado *Amitus fuscipennis* MacGown y Nebeker (Hymenoptera: Platygasteridae), *Encarsia nigricephala* Dozier y *Eretmocerus californicus* (Howard) (Hymenoptera: Aphelinidae) (Corozo-Quiñónez et al., 2024). Las aplicaciones de hongos entomopatógenos, como *I. fumosorosea* y *Lecanicillium lecanii* R. Zare & W. Gams (Fungi: Hypocreales: Cordycipitaceae), ejercen un buen control sobre la plaga (Jaramillo Noreña et al., 2014). Adicionalmente, cuando se presenten altos niveles de infestación, se recomienda el control químico con insecticidas como etofenprox y tiame-toxam, siempre siguiendo las recomendaciones de un profesional del sector agropecuario. Sin embargo, se debe tener la mayor precaución con el uso de estos insecticidas, pertenecientes a los grupos químicos de ésteres y neonicotinoides, ya que afectan altamente la entomofauna benéfica, especialmente a los polinizadores (Henry et al., 2012).

Minador de la hoja

Se le dice minador de la hoja a un grupo de diferentes especies de dípteros de la familia Agromyzidae, que hacen galerías en el mesófilo de las hojas, siendo las especies del género *Liriomyza* las que se han encontrado con mayor frecuencia afectando cultivos (Cortez-Mondaca & Valenzuela-Escoboza, 2013). En los cultivos de *Capsicum* se han encontrado *Liriomyza bryoniae* Kaltenbach (Szwejdá, 2023), *Liriomyza huidobrensis* (Blanchard) y *Liriomyza trifolii* (Burgess) (Holgún-Peña et al., 2019), siendo esta última la más común a nivel mundial. *L. trifolii* es una plaga cosmo-

polita y polífaga que está presente en los cinco continentes, especialmente en Norteamérica, Europa y África, aunque es originaria de América Central (De Oro Aguado et al., 2021). Los adultos son de color negro, con el escutelo y las patas de color amarillo (figura 5.9a). La hembra oviposita en el envés de las hojas y sus huevos son ovalados. La larva es pequeña (figura 5.9c), llegando aproximadamente a 3 mm de longitud, y las pupas son de color crema (figura 5.9b). Sin embargo, su tamaño varía de acuerdo con la cantidad y calidad del alimento ingerido (Hernández et al., 2011).

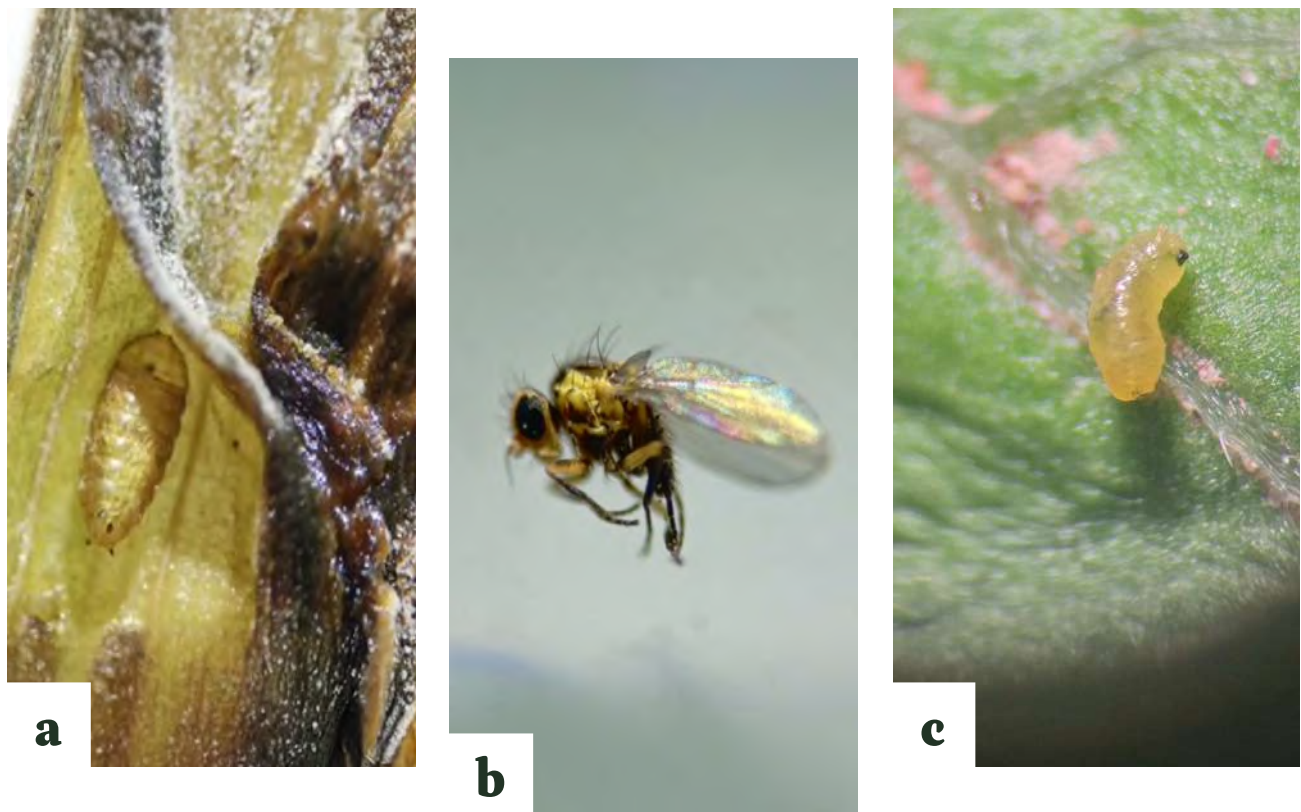


Figura 5.9. Minador de la hoja *Liriomyza* sp. a. Pupa; b. Adulto; c. Larva.

Fotos: José Antonio Rubiano Rodríguez

Descripción del daño

El daño está relacionado con el hecho de que las hembras perforan las superficies de las hojas para ovipositar, de manera que las larvas neonatas comienzan a hacer túneles, principalmente en el mesófilo, y completan el periodo de alimentación de cuatro estadios dentro de la hoja. Este proceso genera minas o caminos, y ocasiona daños importantes en las primeras fases del cultivo, lo que reduce el proceso fotosintético de la planta; si el ataque es severo, puede ocasionar la caída parcial o total de las hojas (Sarand et al., 2019).

Manejo

El minador de la hoja es dañino en estado larval, y al estar dentro de la mina su control se dificulta, por lo que se hace necesario implementar medidas desde el inicio del cultivo, hacer control de malezas para evitar fuentes de inóculo y realizar monitoreo con trampas pegajosas de color amarillo, que ayudan a disminuir poblaciones dentro del campo (Holguín-Peña et al., 2019). Se debe conservar y favorecer la acción de insectos benéficos, los cuales realizan una eficiente reducción de la población del minador y de avispas parasitoides de las familias Eulophidae, Pteromalidae, Braconidae y Figitidae (Hymenoptera). Así mismo, se debe favorecer la acción de familias de insectos depredadores, como Miridae y Nabidae (Hemiptera), y de varias especies de hormigas (Formicidae), crisopas (Neuroptera: Chrysopidae) y ácaros depredadores (Acari: Phytoseiidae) (Cortez-Mondaca & Valenzue-

la-Escoboza, 2013). Sin embargo, si se realizan aplicaciones indiscriminadas de insecticidas químicos, se puede afectar a los controladores e impedir que lleguen a hacer un control efectivo de la plaga (Cruz Flores & Veitia, 2013). Se ha reportado que hongos entomopatógenos como *B. bassiana* y *M. anisopliae* realizan un control sobre los adultos del minador de hoja (Gathage, 2018). Si se registran poblaciones altas en las trampas o muchas hojas con galerías, se deben hacer aplicaciones de insecticidas. Los ingredientes activos recomendados son abamectina, lambda-cialotrina y acetamiprid. Estos productos se deben aplicar bajo la recomendación de un profesional y en la dosis indicada en la etiqueta (Chirinos et al., 2019). Siempre que se utilicen insecticidas de síntesis química como los mencionados, se debe tener en cuenta el riesgo en que se incurre, pues estos afectan la fauna benéfica, como los polinizadores. Por tal razón, a lo largo de este documento, se indica siempre que esta alternativa de manejo debería ser la última opción a tener en cuenta.

Reacción a insectos plaga en 284 materiales de *Capsicum* establecidos en el C. I. La Selva durante 2023

Metodología

Con el objetivo de observar la reacción a insectos plaga en 284 materiales germinados de *Capsicum*, se realizaron monitoreos semanales, tanto en la fase de



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

vivero como de invernadero, observando tres plantas centrales de cada material. El monitoreo consistió en observación directa, registro fotográfico y colecta manual de algunos especímenes, que en algunos casos se llevaron al laboratorio del C. I. La Selva para dar seguimiento a su desarrollo, para posterior identificación, y otros se guardaron en tubos Eppendorf, con alcohol al 70 %. De igual forma, se registró el daño que se observó provocado por algunos insectos, así como la presencia de insectos benéficos. Además, se hizo una evaluación del parasitismo natural de un braconido sobre la población de áfidos. Para determinar el porcentaje de parasitismo, se contabilizó el número total de áfidos sanos y el número de áfidos parasitados. Estas mediciones se llevaron a cabo semanalmente, en 2 ramas por cada accesión y en 3 hojas por rama, a lo largo de un periodo de 11 meses.

Resultados y discusión

Los insectos plaga registrados con mayor frecuencia durante el ciclo vegetativo del cultivo fueron *M. persicae* y *Thrips* sp., con alta incidencia en las flores, en el 100 % de los materiales evaluados. De acuerdo con los resultados, es posible inferir que los materiales pertenecientes a la especie *Capsicum pubescens* Ruiz

& Pav. son los menos afectados por trips, ya que solo el 25 % de sus plantas presentaron alta incidencia, en comparación con las otras especies evaluadas (figura 5.10a). En el caso de los áfidos, todos los géneros presentaron más del 60 % de los materiales con alta incidencia, pero se pueden destacar los materiales de *C. pubescens*, que llegan a tener más del 10 % de sus materiales con baja incidencia (figura 5.10b). Además, se encontraron otros insectos, como crisomélidos, en el 47 %; lepidópteros defoliadores (*C. includens*), en el 22 %; lepidópteros perforadores de fruto, en el 6 % (*S. frugiperda*), y mosca blanca *B. tabaci* y míridos, en el 3 % (figura 5.11). Se observaron síntomas de los daños causados por crisomélidos, defoliadores, trozadores, perforadores de frutos y áfidos (figura 5.12). De acuerdo con algunos reportes, entre los principales organismos plaga del cultivo de *Capsicum* en condiciones protegidas se encuentran los áfidos *M. persicae* y *A. gossypii* (Singh & Joshi, 2020). Según Pramanik (2020), los trips (*Thrips* sp.) son insectos de importancia económica para especies de *Capsicum*, y pueden llegar a limitar el crecimiento y desarrollo de diferentes órganos de la planta, lo que resulta en deformación de brotes, hojas, flores, frutos y tallos; además, pueden ser vectores del TSWV.

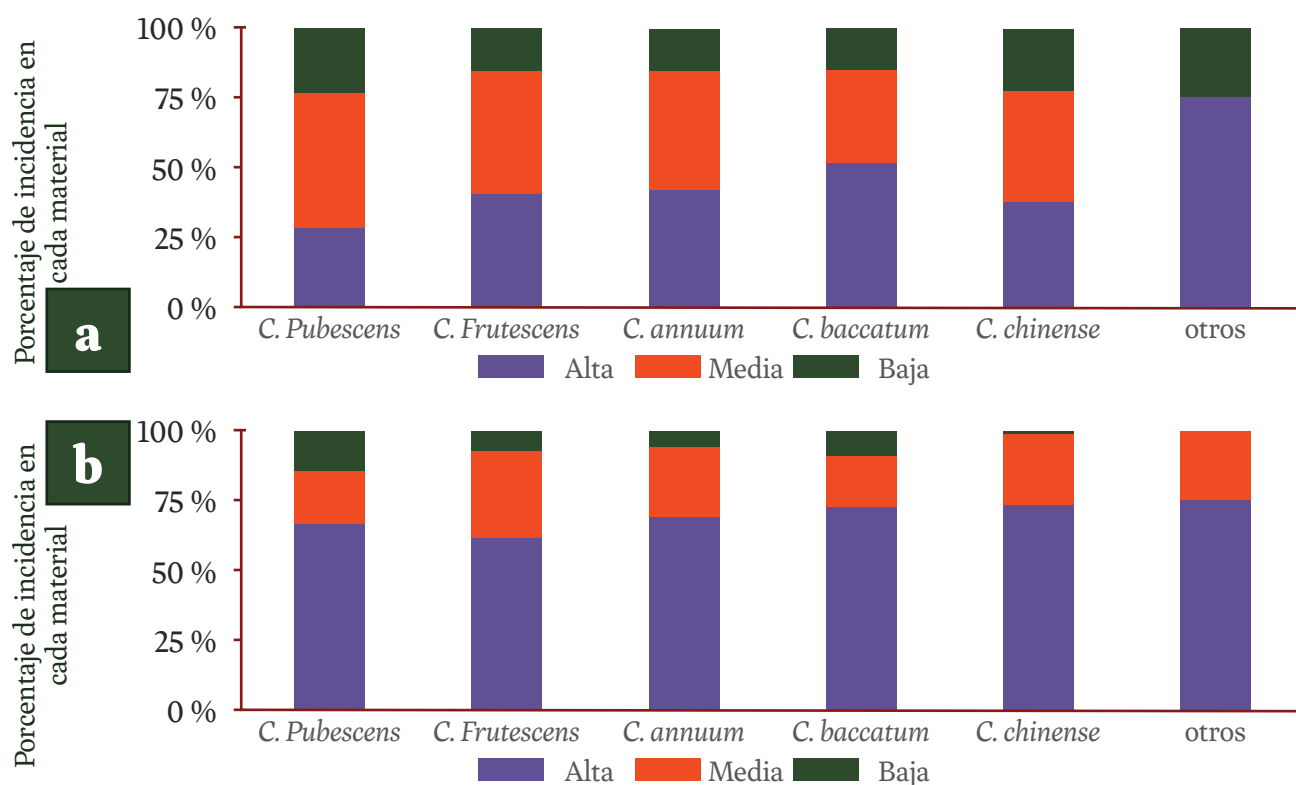


Figura 5.10. Distribución del porcentaje de incidencia en cada uno de los materiales por especies evaluadas. a. Caso *Thrips* sp.; b. Caso *M. persicae*.

Fuente: Elaboración propia

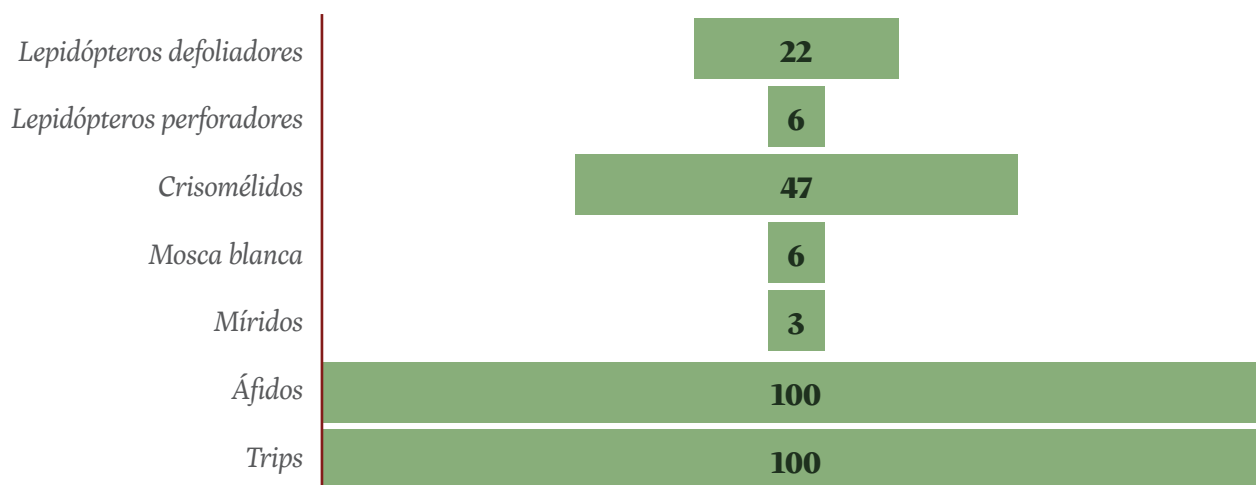


Figura 5.11. Porcentaje de materiales con presencia de insectos plaga registrados en los diferentes materiales de *Capsicum* evaluados.

Fuente: Elaboración propia



Figura 5.12. Síntomas de daño por insectos encontrados en los diferentes materiales de *Capsicum*. a. Daño por crisomélidos; b. Larva defoliadora (*C. includens*); c. Daño por ácaros; d. Síntoma de fumagina; e. Fruto perforado por lepidóptero; f. Daño causado por áfidos.

Fotos: José Antonio Rubiano Rodríguez y Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

En cuanto al parasitismo natural de áfidos, se encontró una alta tasa en general. Específicamente, se registró que los materiales de la especie *Capsicum baccatum* L. presentaron mayor promedio de parasitación, con un 12 %, mientras que *C. pubescens* fue el de menor promedio, con 4 %. Sin embargo, los materiales que presentaron los mayores picos de parasitación fueron *Capsicum chinense* Jacq., que alcanzó lecturas del 38 %, seguida de *Capsicum frutescens* L., con un 35 % (figura 5.13). Sin embargo, los picos se presentaban en el momento en que había la mayor presencia de áfidos, por lo cual se debía hacer una aplicación para su control, lo

cual repercutió en la disminución de la parasitación (figura 5.14). El parasitismo natural debe ser considerado como método de control biológico de poblaciones de plagas (Robledo et al., 2019). Estos resultados indican que existen especies de *Capsicum* que por acción de metabolitos secundarios presentan mayor parasitismo que otras bajo las mismas condiciones, y que podrían beneficiarse de estrategias de control biológico para minimizar la presencia de áfidos y maximizar la producción de manera sostenible, con lo cual se reduce el uso de insecticidas de síntesis química, que afectan el medio ambiente.

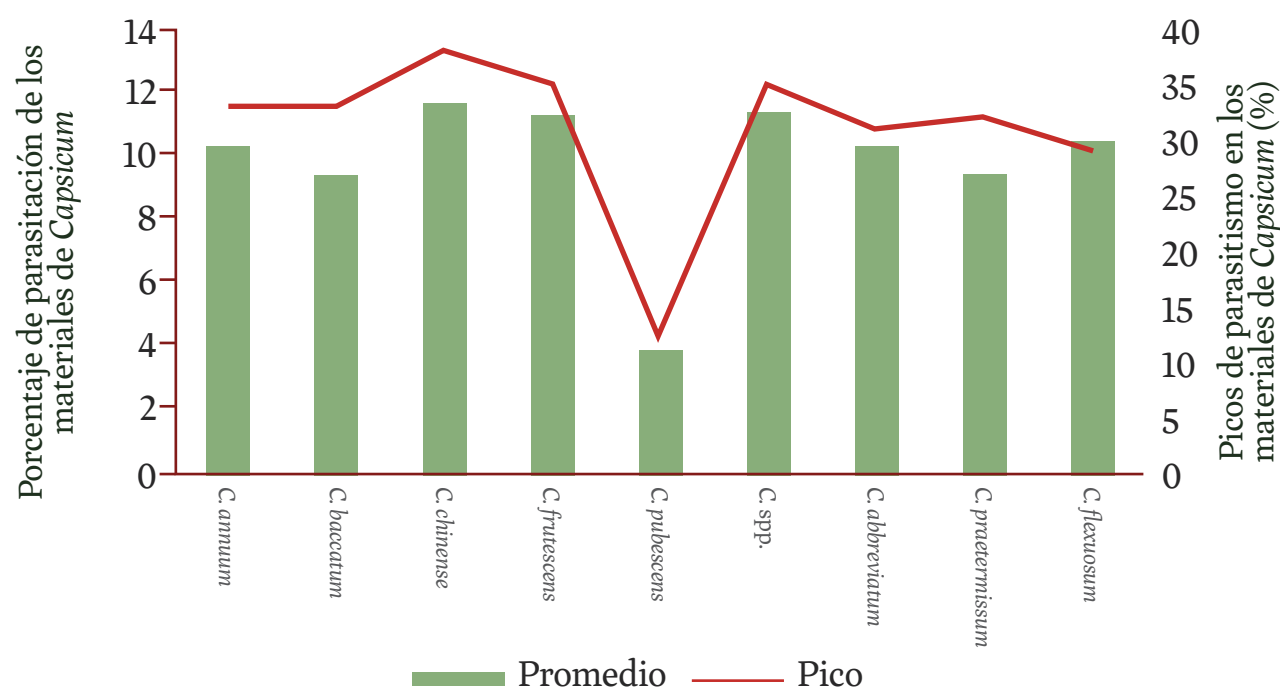


Figura 5.13. Porcentaje de parasitación promedio y picos de cada especie de *Capsicum* evaluada.

Fuente: Elaboración propia

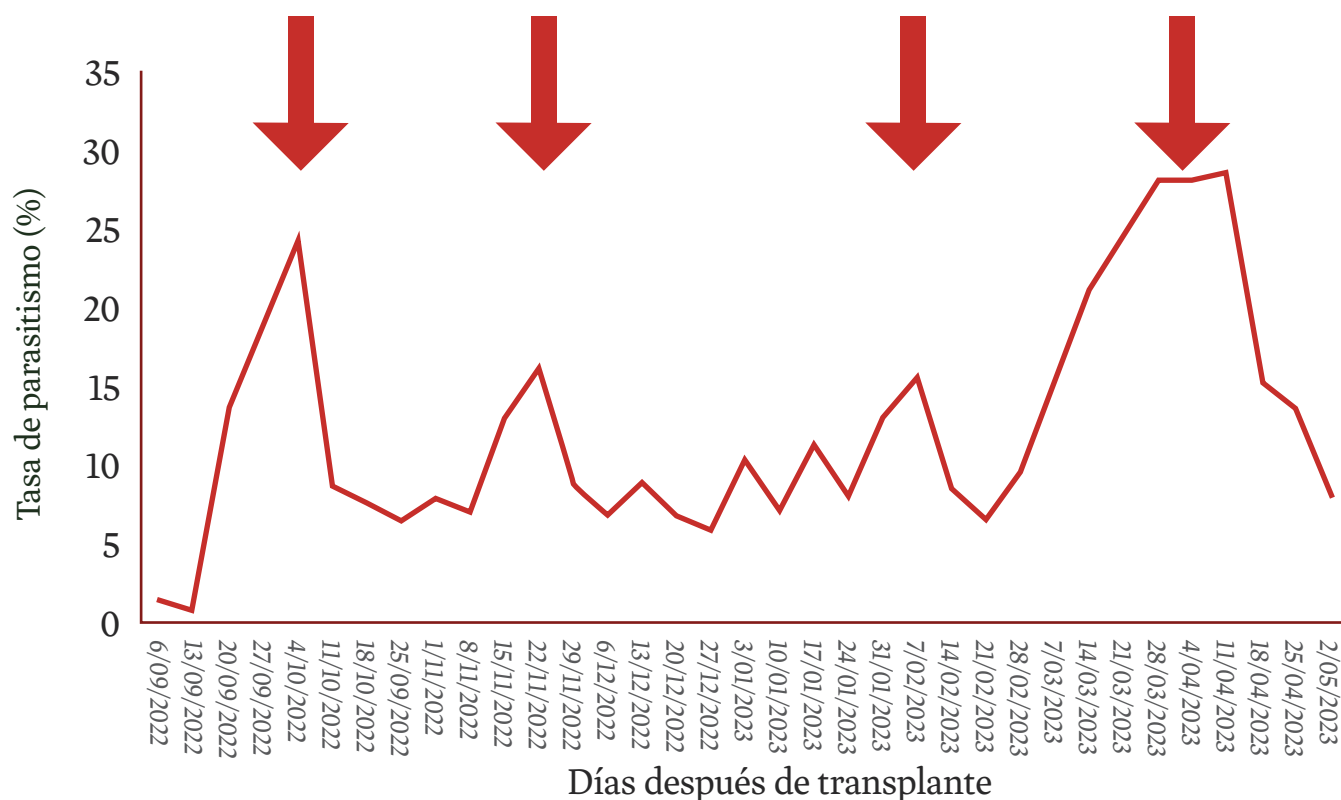


Figura 5.14. Dinámica de la tasa de parasitación a través del tiempo

Nota. Las flechas indican momentos en que se aplicaron productos de síntesis química como método de control de áfidos.

Fuente: Elaboración propia

Reacción a insectos plaga de 34 materiales de *Capsicum* establecidos en dos localidades diferentes durante 2024

Materiales y métodos

Localización

Los ensayos y monitoreos de plagas se realizaron en dos departamentos: Antioquia (en el C. I. La Selva, de AGROSAVIA, ubicado en el municipio de Rionegro) y Valle del Cauca (en el C. I. Palmira, de AGROSAVIA). En los dos sitios se establecieron 34 materiales que correspondieron a la selección que se hizo en la fase 1 del proyecto, con los 284 materiales, y se hicieron dos ensayos: uno correspondió al lote de caracterización

(sin manejo) y el otro fue el lote MIPE (Manejo Integrado de Plagas y Enfermedades). En el C. I. La Selva se plantaron 30 materiales por ensayo, bajo condiciones protegidas, y 4 a campo abierto. En el C. I. Palmira todos los materiales de los dos ensayos se establecieron a campo abierto. En las dos localidades se hizo un diseño de bloques completos al azar, y cada material tuvo 3 repeticiones y 7 plantas por repetición.

Monitoreos semanales en el cultivo de *Capsicum*

Se realizaron monitoreos de insectos fitófagos semanales desde enero hasta agosto de 2024 en los dos ensayos, en cada localidad. El monitoreo consistió en observación directa, registro fotográfico y colecta manual de algunos especímenes, que en algunos casos se llevaron al laboratorio del C. I. La Selva o del C. I. Palmira, con el fin de hacer seguimiento a su desarrollo y para la posterior identificación; otros se guardaron en tubos Eppendorf con alcohol etílico al 70 %. De igual forma, se registró el daño que se observó provocado por algunos insectos ausentes, como defoliadores y perforadores de hoja, además de la presencia de insectos benéficos.

Resultados y discusión

C. I. La Selva

Durante la evaluación de los artrópodos en el cultivo de *Capsicum* spp. (tanto en condiciones de invernadero como a campo abierto), los insectos más abundantes registrados fueron *Thrips* sp., áfidos (*M. persicae*) y ácaros (blanco y rojo), los cuales estuvieron presentes en todos los materiales evaluados (figura 5.15). En contraste, el resto de los insectos no superó un promedio de un individuo por accesión (figuras 5.16 y 5.17). Sun et al. (2018) destacan que el áfido *M. persicae* es una de las principales plagas en cultivos de *Capsicum* spp., lo cual afecta considerablemente su rendimiento. De manera similar, Macián et al. (2014) mencionan que los trips son una de las principales amenazas para la producción de pimiento, ya

que causan daños por raspado, succión de tejidos superficiales y transmisión de virus. Meza et al. (2022) también señalan que los ácaros *P. latus* y *T. urticae* son plagas que limitan la producción de este cultivo.

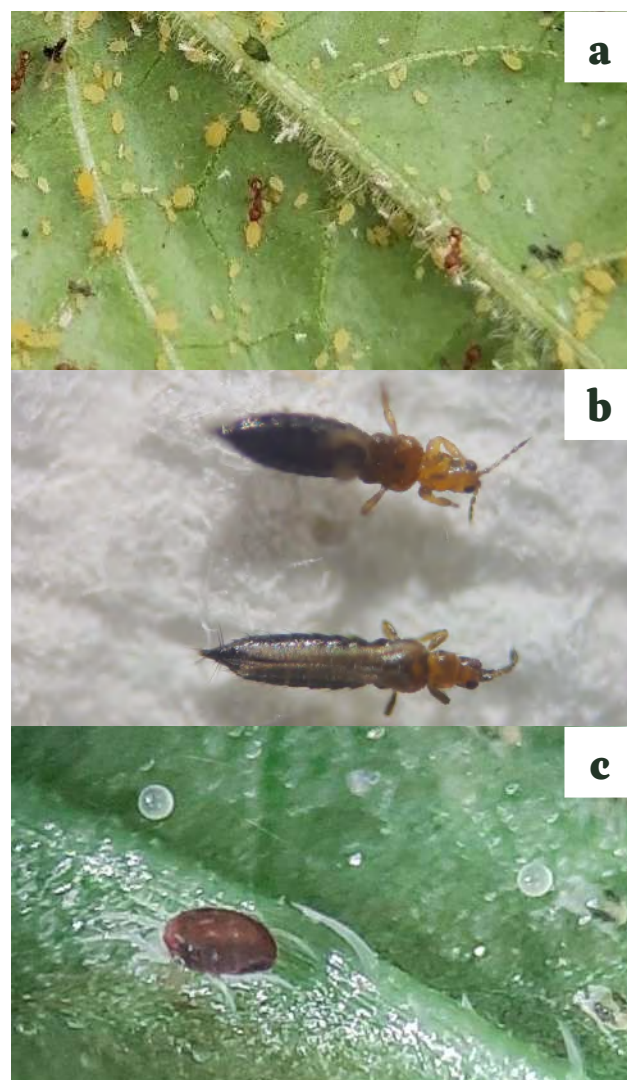


Figura 5.15. Artrópodos potencialmente plaga más abundantes en el cultivo de *Capsicum*. a. Población de áfidos (*M. persicae*); b. *Trips* adulto y juvenil; c. Ácaro rojo (*T. urticae*).

Fotos: Maryori Ríos y Yenifer Campos-Patiño

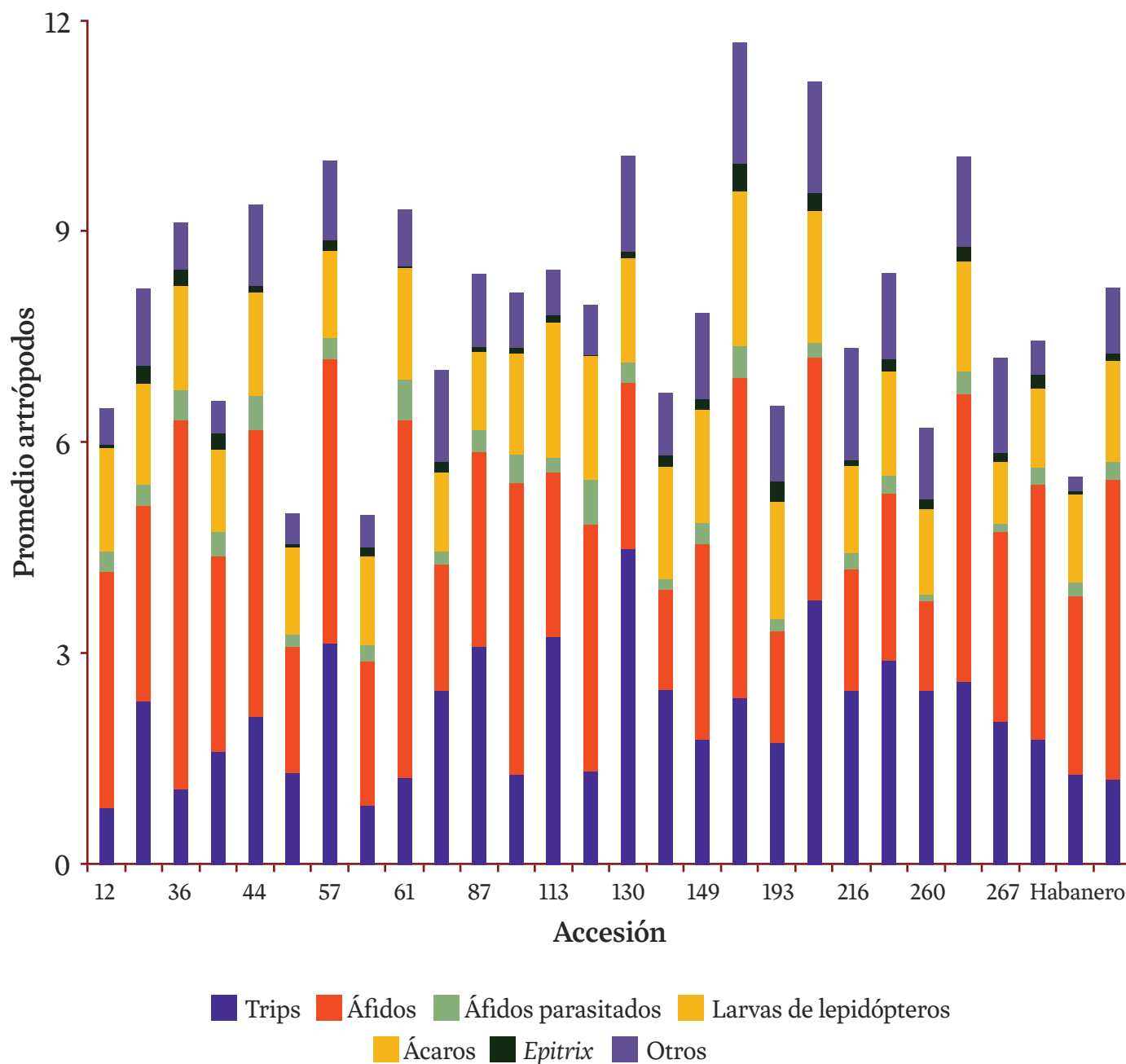


Figura 5.16. Monitoreo de plagas en el segundo ciclo del cultivo de *Capsicum* en ensayo bajo invernadero.

Nota: Se presenta el promedio de los diferentes artrópodos encontrados en los 34 materiales evaluados.

Fuente: Elaboración propia

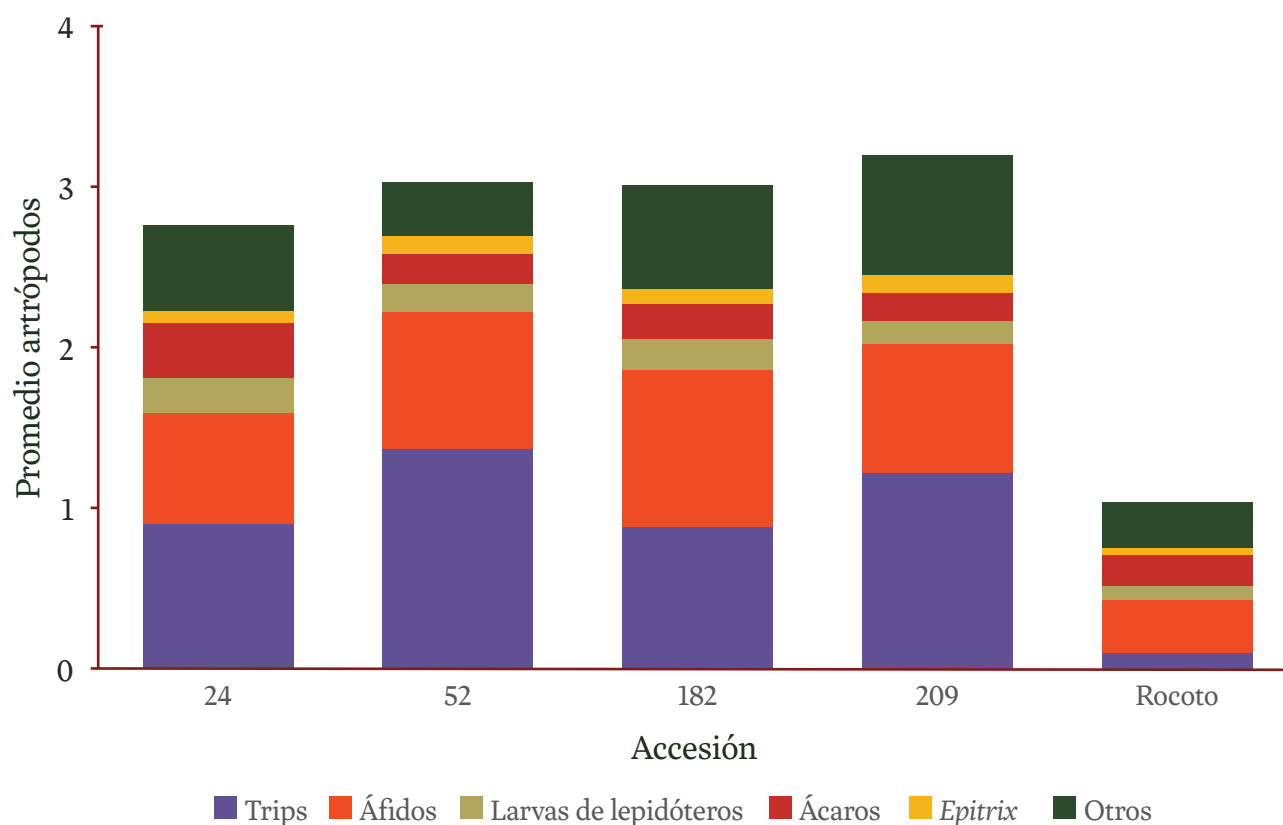


Figura 5.17. Gráfico de monitoreo de plagas en el segundo ciclo del cultivo de ají en ensayo a campo abierto.

Fuente: Elaboración propia

C. I. Palmira

Se observó la afectación de insectos a las plantas (hoja y frutos) en los dos lotes monitoreados de *Cap-sicum* spp. Los insectos con mayor presencia durante el total de los monitoreos en el lote con manejo fueron: mosca blanca (Hemiptera: Aleyrodidae), por la cual solo los materiales 24 y 52 presentaron fumagina, ácaro, cucarrón de hojas *Diabrotica* sp. (Coleoptera: Chrysomelidae), áfidos (Hemiptera: Aphididae) y *Synoecca septentrionalis* Richards, 1978 (Hymenoptera: Vespidae), que se observó haciendo daño a la flor del

ají. En el lote sin manejo agronómico se identificaron larvas del gusano cachón, *Manduca* sp. (Lepidoptera: Sphingidae). Tras el muestreo, se determinó que la mayoría de los ejemplares colectados presentaban parasitismo por avispas de la familia Braconidae (Hymenoptera). (figura 5.18). También se observó cochinilla harinosa rayada *Ferrisia* sp. (Hemiptera: Pseudococcidae), escama de fieltro (Hemiptera: Eriococcidae), el picudo *Compsus* sp. (Coleoptera: Curculionidae), entre otros (figura 5.19).

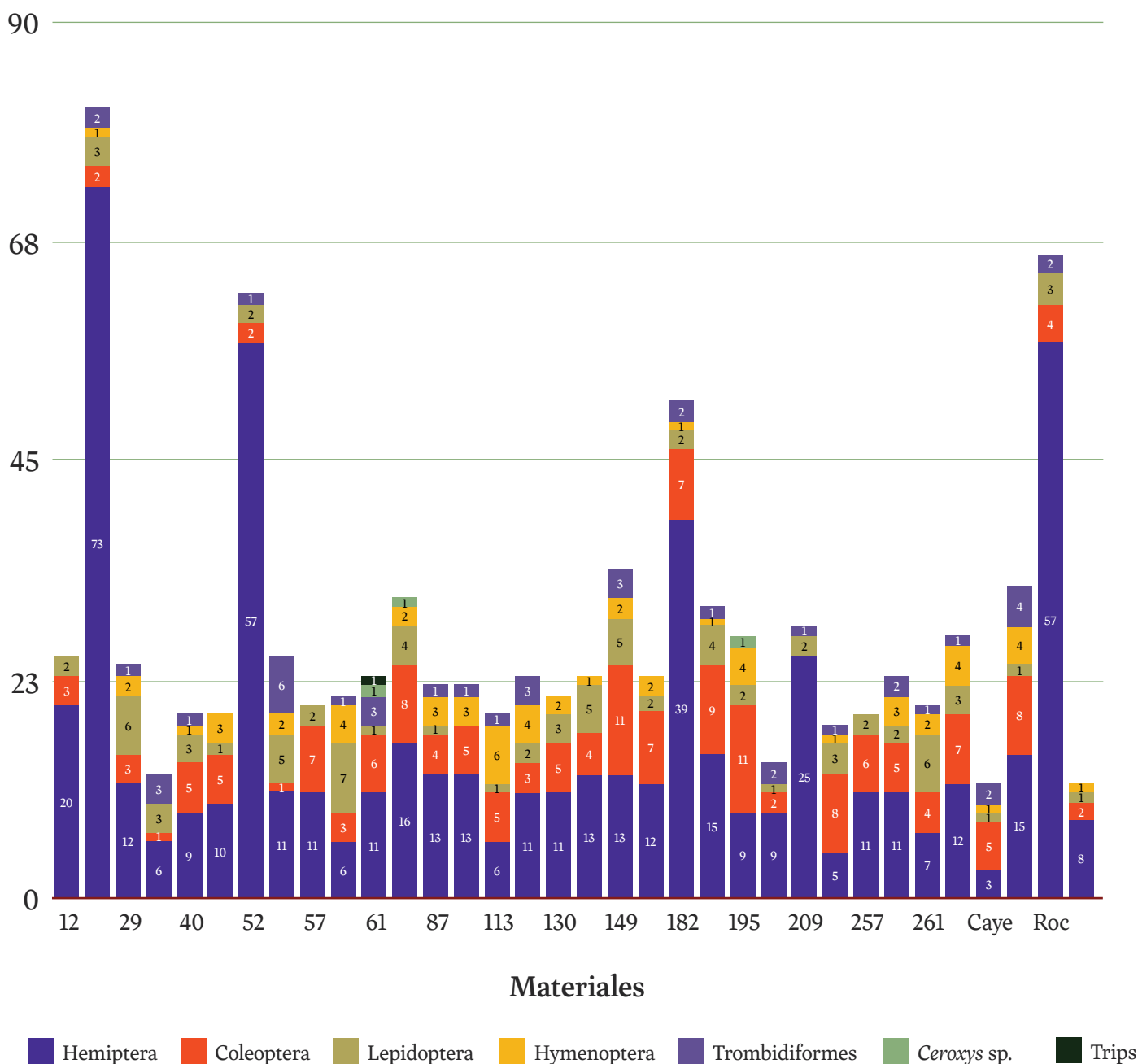


Figura 5.18. Frecuencia de insectos clasificados en orden taxonómico por cada material de *Capsicum* spp. durante los monitoreos en la parcela sin manejo.

Fuente: Elaboración propia

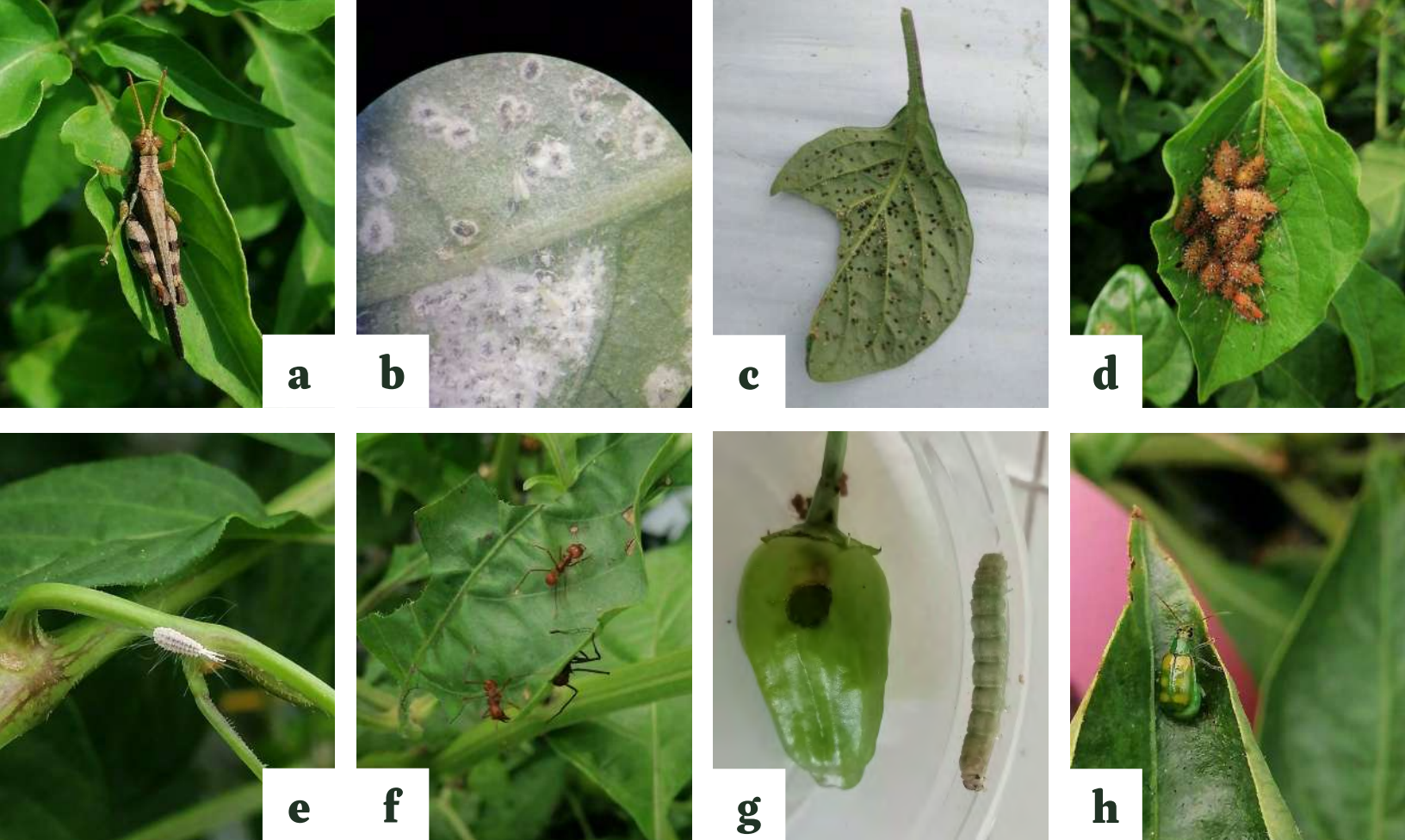


Figura 5.19. Daños e insectos fitófagos presentes en *Capsicum* en el C. I. Palmira. a. Saltamontes (Orthoptera: Acrididae); b. Mosca blanca (Hemiptera: Aleyrodidae); c. Áfidos (Hemiptera: Aphididae); d. Chinche hediondo (Hemiptera: Pentatomidae); e. Cochinilla rayada *Ferrisia* sp. (Hemiptera: Pseudococcidae); f. Hormiga arriera *Atta* sp. (Hymenoptera: Formicidae); g. *Spodoptera* sp. (Lepidoptera: Noctuidae); h. *Diabrotica balteata* LeConte (Coleoptera: Chrysomelidae).

Fotos: Yenifer Campos-Patiño

Otros insectos encontrados en las dos localidades

En la categoría de “otros” se registraron taxones que no presentan un impacto negativo en el cultivo de *Capsicum* o que son benéficos y actúan como controladores biológicos, pues han sido reportados como polinizadores o enemigos naturales de las plagas presentes, y cuya presencia es espontánea en el cultivo. Dentro de este grupo se presentaron depredadores generalistas, como larvas de crisopa, coccinélidos y sírfidos, junto

con otros grupos más específicos, como avispas de la familia Braconidae y hongos entomopatógenos (figura 5.20). Boutard-Hunt et al. (2009) reportan que los enemigos naturales de *M. persicae* en el cultivo de pimienta incluyen miembros de las familias Anthocoridae (Hemiptera), Chrysopidae, Hemerobiidae (Neuroptera), Coccinellidae (Coleoptera), Cecidomyiidae, Syrphidae (Diptera) y varios parasitoides himenópteros.

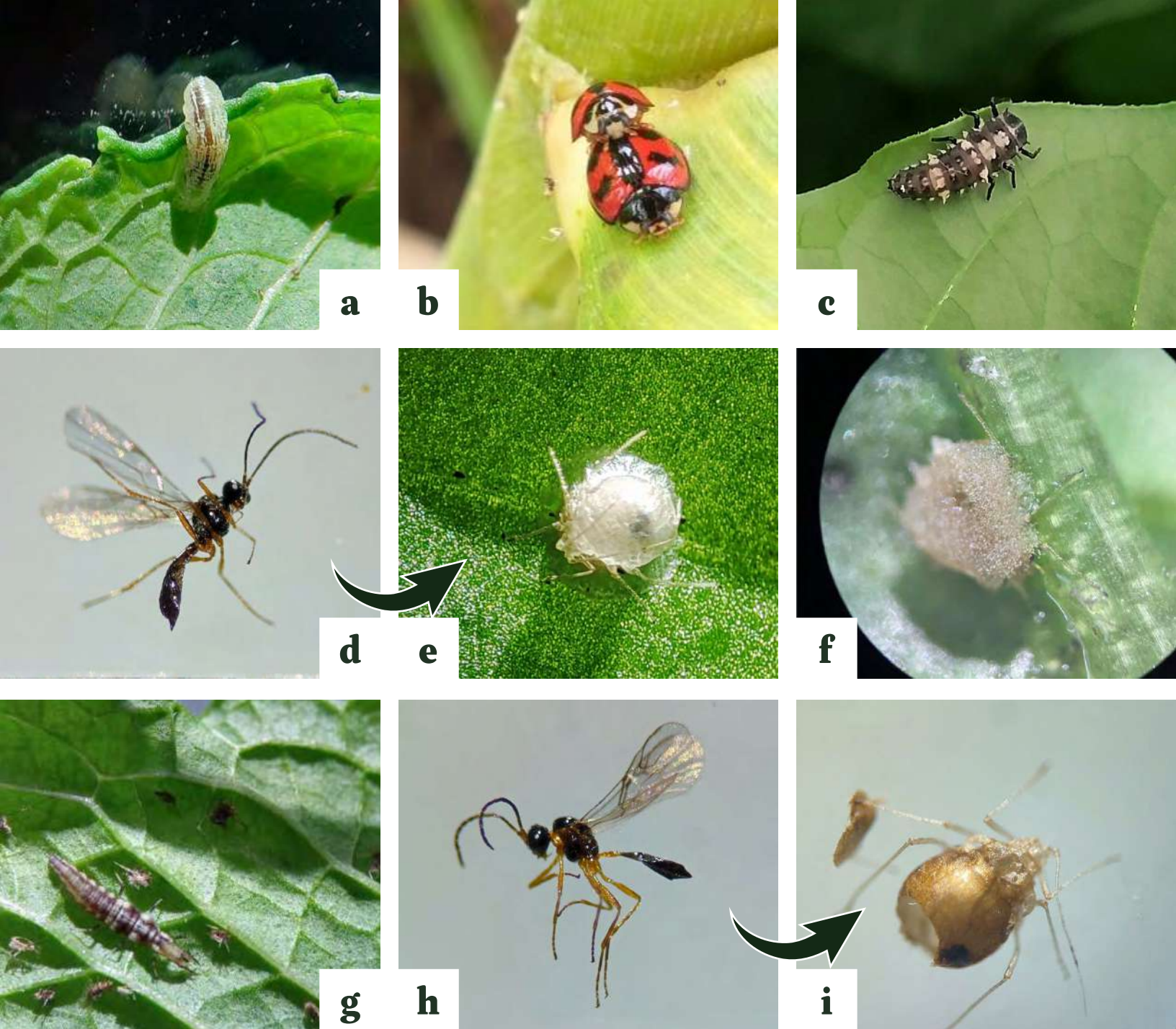


Figura 5.20. Insectos benéficos en el cultivo de ají. a. Larva de un sírfido; b. Adulto de *Cheilomenes sexmaculata* (Fabricius) (Coleoptera: Coccinellidae); c. Larva de *Cheilomenes sexmaculata* (Fabricius); d. Avispa parasitoide (Hymenoptera: Braconidae); e. Áfido parasitado por avispa Braconidae; f. Larva de un áfido atacado por hongo entomopatógeno; g. Larva de crisopa (*Chrysoperla* sp.); h. Avispa parasitoide (Hymenoptera: Braconidae); i. Áfido parasitado por avispa Braconidae.

Nota. Las flechas indican el tipo de momias producido por las avispas parasitoides en los áfidos.

Fotos: Yenifer Campos Patiño y José Antonio Rubiano Rodríguez

Las mariquitas (Coleoptera: Coccinellidae) son depredadores bien conocidos de hemípteros, como pulgones (Aphididae), cochinillas harinosas (Pseudococcidae), moscas blancas (Aleyrodidae) y psílidos (Psyllidae). También pueden consumir presas no hemípteras, como huevos y etapas inmaduras de lepidópteros o coleópteros (Evans, 2009). Dentro del orden Diptera, los depredadores de la familia Syrphidae son muy conocidos. Los adultos de los sírfidos se alimentan de néctar, polen y miel; las larvas, en cambio, son voraces depredadoras, principalmente de pulgones, aunque algunas especies también se alimentan de trips y moscas blancas (Vázquez-Moreno, 2002). Por otro lado, las crisopas (Neuroptera)

son muy usadas en el control biológico. Las larvas se alimentan de varias plagas de cuerpo blando, principalmente áfidos y otros artrópodos, tales como moscas blancas, cochinillas harinosas, trips y lepidópteros, mientras que los adultos pueden depredar o consumir néctar, polen o sustancias azucaradas que excretan los hemípteros (Polack et al., 2020). *C. externa*, *C. carnea* y *Chrysoperla asoralis* (Banks) son las más usadas en control biológico en América Latina (Polack et al., 2020). Kavallieratos et al. (2004) reportan algunas especies pertenecientes a los géneros *Aphidius* y *Praon*, de la familia Braconidae, como parasitoides de *M. persicae*.



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Reflexión

Conocer los insectos asociados al cultivo de *Capsicum* es de suma importancia, pues nos permite identificar cuáles pueden causar daño económico y cuáles podrían ser benéficos para el cultivo, gracias al control biológico que realizan. Así mismo, según el tipo de insecto identificado, se pueden diseñar las estrategias de control más apropiadas de acuerdo con la etapa fenológica, la época de aparición, las condiciones climáticas y los requerimientos de calidad del fruto. Lo anterior no solo permite hacer el cultivo más sostenible, sino también más rentable.

Referencias

- Allegrucci, N., Velázquez, M. S., Russo, M. L., Vianna, M. F., Abarca, C., & Scorsetti, A. C. (2020). Establishment of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* as an endophyte in *Capsicum annuum* and its effects on the aphid pest *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae). *Revista de Biología Tropical*, 68(4), 1084-1094. <https://doi.org/10.15517/rbt.v68i4.41218>
- Amaliah, I. K., Daud, I. D., & Nasruddin, A. (2023). Effect of several reduced-risk insecticides on the population of *Bemisia tabaci* Genn. and incidence of pepper yellow leaf curl Indonesia virus (PepYLCIV) on chili plants. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1192(1), 012025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1192/1/012025>
- Arévalo, H. A., Fraulo, A. B. & Liburd, O. E. (2009). Management of flower thrips in blueberries in Florida. *Florida Entomologist*, 92(1), 14-17. <https://entnemdept.ufl.edu/liburd/fruitnvegipm/Publications/2009Arevalo.pdf>
- Bañol Pérez, C., Pérez Hidalgo, N., Piñol Pascual, J., Barrientos, J. A., & Ventura, D. (2017). Interaction of the aphid-parasitoid-ant network in plants associated with an organic citrus grove. *Ecosistemas*, 26(3), 67-79. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-3.09>
- Basso, C., Chiaravalle, W. & Maignet, P. (2020). Effectiveness of *Trichogramma pretiosum* in controlling lepidopterous pests of soybean crops. *Agrociencia Uruguay*, 24(NE 2), e419. <https://agrocienciauruguay.uy/index.php/agrociencia/article/view/419>
- Belles, X. (2013). *La metamorfosis de los insectos*. Libros de la Catarata.
- Berny-Mier y Teran, J. C., Abdala-Roberts, L., Durán Yáñez, A., & Tut-Pech, F. (2013). Variation in insect pest and virus resistance among habanero peppers (*Capsicum chinense* Jacq.) in Yucatán, México. *Agrociencia*, 47(5), 471-482. <https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/1033/1033>
- Bhullar, M. B., Heikal, H. M., & Kaur, P. (2024). Efficacy of natural products and biorationals against yellow mite, *Polyphagotarsonemus latus* (Banks) (Acari: Tarsonemidae) infesting hydroponic *Capsicum* under protected cultivation. *International Journal of Tropical Insect Science*, 44(2), 681-688. <https://doi.org/10.1007/s42690-024-01173-0>
- Boutard-Hunt, C., Smart, C. D., Thaler, J., & Nault, B. A. (2009). Impact of plant growth-promoting rhizobacteria and natural enemies on infestations of *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae) in peppers. *Journal of Economic Entomology*, 102(6), 2183-2191. <https://doi.org/10.1603/029.102.0622>
- Castresan, J. E., Rosenbaum, J., & González, L. A. (2013). Estudio de la efectividad de tres aceites esenciales para el control de áfidos en pimiento, *Capsicum annuum* L. *Idesia (Arica)*, 31(3), 49-58. <https://rdu.unc.edu.ar/server/api/core/bitstreams/04b2a90e-6600-4a57-98f7-14ec2983a18f/content>
- Chirinos, D. T., Castro, R., Cun, J., Castro, J., Peñarrieta Bravo, S., Solis, L., & Geraud-Pouey, F. (2019). Los insecticidas y el control de plagas agrícolas: la magnitud de su uso en cultivos de algunas provincias de Ecuador. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 21(1), 1-16. <https://www.redalyc.org/journal/4499/449962186013/449962186013.pdf>

- Córdova Vega, P. M. (2015). Fluctuación poblacional de los insectos plaga en el cultivo de espárrago *Asparagus officinalis*, en Chinchá. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria La Molina]. Repositorio La Molina. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/b8e6bf09-810a-4b20-9f54-87158b527695>
- Corozo-Quiñónez, L., Chirinos, D. T., Saltos-Rezabala, L., & Monteros-Altamirano, A. (2024). Can *Capsicum* spp. genotypes resist simultaneous damage by both *Phytophthora capsici* and *Bemisia tabaci*? Can natural enemies of *Bemisia* complement plant resistance? *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1275953. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1275953>
- Cortez-Mondaca, E., & Valenzuela-Escoboza, F. A. (2013). Natural enemies of the leafminer *Liriomyza trifolii* (Diptera: Agromyzidae): challenges and perspectives for its biological control. *Southwestern Entomologist*, 38(4), 643-660. <https://doi.org/10.3958/059.038.0410>
- Cruz Flores, D. D., & Veitia, M. (2013). Efecto de la aplicación de insecticidas sobre la población de *Ageniaspis citricola* (Hymenoptera: Encyrtidae), controlador natural de *Phyllocnistis citrella* (Lepidoptera: Gracillidae) en Cuba. *Boletín de la Sociedad Entomológica Aragonesa (SEA)*, 53, 310-314. <http://sea-entomologia.org/PDF/Boletin53/310314BSEA53AgeniaspisCubaBR.pdf>
- Das, S., Rahman, M., Dash, P. K., & Kamal, Md. M. (2021). Suppression of chili leaf curl virus (ChLCV) incidence in chili (*Capsicum annuum* L.) across Bangladesh via manipulated planting date and spacing. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 128, 535-548. <https://doi.org/10.1007/s41348-020-00397-9>
- Dedryver, C. A., Le Ralec, A., & Fabre, F. (2010). The conflicting relationships between aphids and men: a review of aphid damage and control strategies. *Comptes Rendus Biologies*, 333(6-7), 539-553. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2010.03.009>
- De Moraes, C. P., & Foerster, L. A. (2021). Development and survival of *Neoleucinodes elegantalis* (Lepidoptera: Crambidae) on wild and cultivated Solanaceae. *Revista Brasileira de Entomologia*, 65(3), e20200119. <https://doi.org/10.1590/1806-9665-RBENT-2020-0119>
- De Oro Aguado, R. F., Sánchez Doria, T., Rubiano-Rodríguez, J. A., & Sierra-Baquero, P. V. (2021). Principales plagas del fríjol (*Phaseolus vulgaris* L.) en el Cesar, Colombia. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/AGROSAVIA.nbook.7404593>
- Delfino, M. A., Monelos, H. L., Peri, P. L., & Buffa, L. M. (2007). Áfidos (Hemiptera, Aphididae) de interés económico en la provincia de Santa Cruz. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 36(1), 147-154. <https://www.redalyc.org/pdf/864/86436109.pdf>
- Duque-Gamboa, D. N., Arenas Clavijo, A., Posso-Terranova, A., & Toro-Perea, N. (2021). Mutualistic interaction of aphids and ants in pepper, *Capsicum annuum* and *Capsicum frutescens* (Solanaceae): aphids and their associated myrmecofauna in southwestern Colombia. *Revista de Biología Tropical*, 69(2), 626-639. <https://doi.org/10.15517/rbt.v69i2.43429>
- Evans, E. W. (2009). Lady beetles as predators of insects other than Hemiptera. *Biological Control*, 51(2), 255-267. <https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2009.05.011>
- Franco-Ruiz, A. F., Veliz Prado, K., Solís Bowen, L., & Celi Soto, A. (2021). Identification of the entomofauna present in the pepper crop (*Capsicum annuum* L.) in the Lodana sector of the Santa Ana canton, Ecuador. *Manglar*, 18(4), 397-402. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8181197>



- Gathage, J. W (2018). Prospects of fungal endophytes in the control of *Liriomyza leafminer* flies (Diptera: Agromyzidae) in common bean *Phaseolus vulgaris* Linnaeus (Fabales: Fabaceae) under field conditions [Tesis de maestría, Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology]. <http://ir.jkuat.ac.ke/bitstream/handle/123456789/4600/JANE%27S%20FINAL%20THESIS%20FOR%20PRINTING%20%20PDF.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gío-Trujillo, J. A., & Cámara-Romero, J. L. (2023). Efecto repelente de tres extractos vegetales sobre plagas del cultivo de *Capsicum chinense*. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, Núm. Esp. III, e3614. <https://era.ujat.mx/rera/es/article/view/3614/1718>
- Guzmán Prada, D. A., Rodríguez Chalarca, J., & Valencia Cataño, S. J. (2016). *Identificación de estadios larvales de lepidópteros: plaga de maíz*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). http://ciat-library.ciat.cgiar.org/articulos_ciat/biblioteca/CIAT_IDENTIFICACION_DE_ESTADIOS_LARVALES_DE_LEPIDOPTEROS_PLAGA_MAIZ.pdf
- Hameed, G. A., Abdullah, M. A., & Elhadeeti, S. A. K. (2023). Population density of *Bemisia tabaci* on sweet pepper (*Capsicum annuum*) varieties in the greenhouse. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1262, 032033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1262/3/032033>
- Henry, M., Béguin, M., Requier, F., Rollin, O., Odoux, J. F., Aupinel, P., Aptel, J., Tchamitchian, S., & Decourtye, A. (2012). A common pesticide decreases foraging success and survival in honey bees. *Science*, 336, 348-350. <https://doi.org/10.1126/science.1215039>
- Hernández-Juárez, A., Aguirre-Uribe, L. A., Gonzáles-Ruiz, A., Chacón-Hernández, J. C., Landeros-Flores, J., Cerna-Chávez, E., Flores-Dávila, M., & Harris, M. (2016). Impact of endosulfan on the predatory efficiency larval *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae) on the eggs of *Heliothis virescens* and *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *The Canadian Entomologist*, 148(1), 112-117. <https://doi.org/10.4039/tce.2015.41>
- Hernández, R., Harris, M., & Liu, T.-X. (2011). Impact of insecticides on parasitoids of the leafminer, *Liriomyza trifolii*, in pepper in south Texas. *Journal of Insect Science*, 11(1), 61. <https://doi.org/10.1673/031.011.6101>
- Holguín-Peña, R. J., Ramírez-Ahuja, M. de L., Medina-Hernández, D., Palacios Torres, R. E., & Servín-Villagas, R. (2019). Parasitoid wasps associated with *Liriomyza trifolii* mortality in pepper at Baja California Sur, Mexico. *Southwestern Entomologist*, 44(4), 867-875. <https://doi.org/10.3958/059.044.0402>
- Jaramillo Noreña, J. E., Aguilar Aguilar, P. A., Espitia Malagón, E. M., Tamayo Molano, P. J., & Guzmán Arroyave, M. G. (2014). *Modelo productivo del cultivo de pimentón bajo condiciones protegidas en el Oriente Antioqueño*. Corpoica. <https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/d3f3a0ad-af6b-4b50-9785-6744895fbfeb/content>
- Kavallieratos, N. G., Athanassiou, C. G., Tomanović, Ž., Papadopoulos, G. D., & Vayias, B. J. (2004). Seasonal abundance and effect of predators (Coleoptera, Coccinellidae) and parasitoids (Hymenoptera: Braconidae, Aphidiinae) on *Myzus persicae* (Hemiptera, Aphidoidea) densities on tobacco: a two-year study from Central Greece. *Biologia, Bratislava*, 59(5), 613-619. https://www.zin.ru/Animalia/Coleoptera/addpages/Andrey_Ukrainsky_Library/References_files/Kavallieratos04b.pdf

- Khamis Al-Zahrani, J., Hassan Al-Abdalall, A., Aly Osman, M., Aldakheel, L. A., Faisal Al Ahmady, N., Al-dakeel, S. A., Abdul Azeez, S., Francis Borgio, J., El Naggar, M. A., Alabdallah, N. M., & Almustafa, M. M. (2023). Entomopathogenic fungi and their biological control of *Tetranychus urticae*: two-spotted spider mites. *Journal of King Saud University - Science*, 35(8), 102910. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102910>
- Larraín, P., Ulloa, M., Vega, B., & Contreras, L. (2012). Protocolos de manejo de plagas bajo criterios de producción limpia en acelga, alfalfa, maíz y zanahoria. Boletín INIA-Instituto de Investigaciones Agropecuarias. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/123456789/7594/NR38827.pdf?sequence=>
- Lee, Y. S., Lee, H.-A., Kim, G.-H., & Baek, S. (2023). Effects of host plant on the development and reproduction of *Agrotis ipsilon* (Lepidoptera: Noctuidae) on horticultural crops. *Heliyon*, 9(7), e17836. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17836>
- Lorenzo, M. E., Grille, G., Basso, C., & Bonato, O. (2016). Host preferences and biotic potential of *Trialeurodes vaporariorum* and *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in tomato and pepper. *Arthropod-Plant Interactions*, 10(4), 293-301. <https://doi.org/10.1007/s11829-016-9434-z>
- Macel, M., Visschers, I. G. S., Peters, J. L., Van Dam, N. M., & De Graaf, R. M. (2020). High concentrations of very long chain leaf wax alkanes of thrips susceptible pepper accessions (*Capsicum* spp.). *Journal of Chemical Ecology*, 46, 1082-1089. <https://doi.org/10.1007/s10886-020-01226-x>
- Macián, A. J., Ghiggia, L. I., Fernández, J. A., Arce, O. E., Pereyra, V., Vargas, P., & Jaime, A. P. (2014). Identificación y manejo de trips presentes en un cultivo comercial de pimiento (*Capsicum annuum* L.) bajo carpa plástica en Tucumán. *Revista Agronómica del Noroeste Argentino*, 34(1), 27-31. <https://faz.unt.edu.ar/ranar/ranar3416.pdf>
- Maharijaya, A., Vosman, B., Pelgrom, K., Wahyuni, Y., De Vos, R. C. H., & Voorrips, R. E. (2019). Genetic variation in phytochemicals in leaves of pepper (*Capsicum*) in relation to thrips resistance. *Arthropod-Plant Interactions*, 13, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11829-018-9628-7>
- Mazzitelli, M. E., Aquino, D. A., Gallardo, F. E., Reche, V. A., & Ricci, E. M. (2018). Diversidad de parasitoides primarios y secundarios del pulgón *Myzus persicae* (Hemiptera, Aphididae) en el duraznero *Prunus persica* (Rosales, Rosaceae) en la provincia de Mendoza, Argentina. *Arxius de Miscel·lània Zoològica*, 16, 173-183. <https://doi.org/10.32800/amz.2018.16.0173>
- Meza, K., Chirinos, D. T., & Velásquez, J. (2022). Insectos y ácaros asociados a pimiento: ¿cuánta diversidad puede ser observada en un cultivo? *Manglar*, 19(4), 357-363. <https://doi.org/10.57188/manglar.2022.045>
- Monsalvo Espinosa, J. A., Coh Méndez, D., Carrillo Ávila, E., Santillán Fernández, J. A., Arreola Enríquez, J., & Os-naya González, M. L. (2020). Características socioeconómicas de los productores de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq.), en Campeche, México. *Agro Productividad*, 13(3), 47-55. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1596>
- Montoya, A., Rodríguez, H., Miranda, I., & Rodríguez, Y. (2013). Percepción de los fitosanitarios sobre el control de *Polyphagotarsonemus latus* (Banks) en la producción protegida de pimiento. *Revista Protección Vegetal*, 28(1), 60-64. <https://censa.edicionescervantes.com/index.php/RPV/article/view/48>
- Muñoz-Ponce, S., Corozo-Quiñónez, L., Chirinos, D. T., Garcés-Fiallos, F. R., & Monteros-Altamirano, A. (2022). Evaluación de genotipos ecuatorianos de *Capsicum* spp. ante infestaciones de *Bemisia tabaci*. *Revista Peruana de Biología*, 29(3), e22729. <https://doi.org/10.15381/rpb.v29i3.22729>



- Nault B. A., & Shelton A. M. (2012). *Guidelines for managing onion thrips on onion*. Cornell University, Cooperative Extension. https://s3.amazonaws.com/assets.cce.cornell.edu/attachments/5088/2013_ONION_THRIPS_INSECTICIDES.pdf?1418059989
- Patiño-Martínez, A. A., Palacios Castro, S., & Kogson Quintero, J. F. (2019). Caracterización de los subsistemas de plagas en mora sin espina (*Rubus glaucus* Benth) en el departamento de Risaralda. *Luna Azul*, 49, 162-171. <https://doi.org/10.17151/luaz.2019.49.9>
- Perzabal-Ramos, M., Sandoval-Castro, E., & Díaz-Ruíz, R. (2018). Respuesta de espinaca y de *Spodoptera exigua* a fertilización orgánica y mineral. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(4), 723-735. <https://www.redalyc.org/journal/2631/263158493002/html/>
- Polack, L. A., Lecuona, R. E., & López, S. N. (Comps.) (2020). *Control biológico de plagas en horticultura: experiencias argentinas de las últimas tres décadas*. INTA. https://dtisartec.senasica.gob.mx:8080/biblioteca/libros/libros/Luis%20Andres%20Polack._et,al_2020_3%20.pdf.pdf
- Pramanik, K., Mohapatra, P. P., Pradhan, J., Acharya, L. K., & Jena, C. (2020). Factors influencing performance of *Capsicum* under protected cultivation: a review. *International Journal of Environment and Climate Change*, 10(12), 572-588. <https://doi.org/10.9734/ijec/2020/v10i1230339>
- Robledo, A., Cano, I., Mourrut, J., & Pekas, A. (2019). Control de pulgón en pimiento ecológico bajo invernadero en el sudeste peninsular. *Phytoma España*, (306), 30-39. https://www.phytoma.com/images/pdf/2019/306_TT_control_pulgon_pimiento_ecologico.pdf
- Rodríguez, I. V., Mesa-Cobo, N. C., Valencia, M. O., & Ossa, J. (2017). Population parameters and damage of *Polyphagotarsonemus latus* (Acari: Tarsonemidae) in Valencia orange (*Citrus sinensis* [L.] Osbeck) crop. *Acta Agronómica*, 64(4), 633-640. <https://www.redalyc.org/pdf/1699/169952658026.pdf>
- Rodríguez-Vélez, B., Suaste-Dzul, A., Gallou, A., Rodríguez-Vélez, J. M., Sarmiento-Cordero, M. A., & Arredondo-Bernal, H. C. (2019). Pulgones (Hemiptera: Aphididae) y sus parasitoides (Hymenoptera) en cultivos de sorgo en los estados de Colima y Tamaulipas, México. *Acta Zoológica Mexicana (N.S.)*, 35, 1-9. <https://doi.org/10.21829/azm.2019.3501085>
- Rodulfo Acuña, P. M. A., Nienstaedt Arreaza, B. M., Mejías Herrera, R. E. R., Terrero Yopez, P. I., & Peñaherrera Villafuerte, S. L. (2022). Biología del ácaro *Tetranychus urticae* y su control utilizando canela, en plantas de *Rosa* spp. *Revista Espamciencia*, 13(2), 34-39. https://doi.org/10.51260/revista_espamciencia.v13i2.344
- Rubiano-Rodríguez, J. A., Ballestas, K. L., Ortiz-Muñoz, C., Franco, G., & Castro, E. (2023). Manejo integrado de plagas en menta. En Franco, G., Osorio Durango, E. J., Sierra Henao, K. A., Cortés Vera, A. J., López Hernández, F., Castro Restrepo, D., Gaviria Gutiérrez, B. M., Rubiano Rodríguez, J. A., Henao Rojas, J. C., Quintero Vásquez, L. M., Tamayo Vélez, Á. J., Ortiz Muñoz, C., Vargas Arcila, M. O, Zuluaga Mejía, C., Castro Tabares, L. E., Vanegas, D. Y., Dominguez Rave, M. I., Díaz García, J. J., Ballestas Álvarez, K. L., & Madroñero Solarte, I. A. (2023). *Producción de menta (Mentha spicata L.) y su aprovechamiento agroindustrial*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://editorial.agrosavia.co/index.php/publicaciones/catalog/view/332/343/1931-1>
- Rubiano-Rodríguez, J. A., Fuentes-Contreras, E., & Ramírez, C. (2019). Variabilidad genética neutral y presencia de mecanismos de resistencia en *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae), provenientes de diferentes hospedantes en Chile central. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 20(3), 611-633. <https://doaj.org/article/b30f4b73684c4f84a67d737a5e9a7460>

- Rusch, A., Bommarco, R., & Ekbom, B. (2017). Chapter Ten - Conservation Biological Control in Agricultural Landscapes. En N. Sauvion, D. Thiéry, & P.-A. Calatayud (Eds.), *Insect-plant interactions in a crop protection perspective* (Vol. 81, pp. 333-360). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2016.11.001>
- Sanad, A. S., & Hassan, G. M. (2019). Controlling the western flower thrips, *Frankliniella occidentalis* (Pergande) (Thysanoptera: Thripidae) by releasing the predatory phytoseiid mites and pesticides on pepper in a greenhouse. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 29(1), 95. <https://doi.org/10.1186/s41938-019-0186-9>
- Sarand, E., Refai, E., & El-Dewy, M. (2019). Population density of *Empoasca* spp., *Liriomyza trifolii* (Burgess) and the common natural enemies on faba bean plants in relation to sowing dates in Kafr El-Sheik governorate. *Journal of Plant Protection and Pathology*, 10(2), 147-153. <https://doi.org/10.21608/JPPP.2019.40914>
- Sarandón, S. J. (2002). La agricultura como actividad transformadora del ambiente. El impacto de la agricultura intensiva de la Revolución Verde. En S. J. Sarandón (Ed.), *Agroecología. El camino hacia una agricultura sustentable* (pp. 23-47). Ediciones Científicas Americanas.
- Sierra-Baquero, P. V., Gómez-Ramírez, L. F., Sánchez Doria, T., De Oro Aguado, R. F., Fuentes Cassiani, D. A., & Rubiano Rodríguez, J. A. (2023). *Plagas asociadas al cultivo de sorgo forrajero Corpoica JTT-18 (Sorghum bicolor [L.] Moench) en el departamento del Cesar, Colombia*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://doi.org/10.21930/AGROSAVIA.nbook.7406566>
- Singh, H., & Joshi, N. (2020). Management of the aphid, *Myzus persicae* (Sulzer) and the whitefly, *Bemisia tabaci* (Gennadius), using biorational on *Capsicum* under protected cultivation in India. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 30, 67. <https://doi.org/10.1186/s41938-020-00266-5>
- Specht, A., De Paula-Moraes, S. V. de, & Sosa-Gómez, D. R. (2015). Host plants of *Chrysodeixis includens* (Walker) (Lepidoptera, Noctuidae, Plusiinae). *Revista Brasileira de Entomologia*, 59(4), 343-345. <https://doi.org/10.1016/j.rbe.2015.09.002>
- Specht, A., Sosa-Gómez, D. R., Roque-Specht, V. F., Valduga, E., Gonzatti, F., Schuh, S. M., & Carneiro, E. (2019). Biotic potential and life tables of *Chrysodeixis includens* (Lepidoptera: Noctuidae), *Rachiplusia nu*, and *Trichoplusia ni* on soybean and forage turnip. *Journal of Insect Science*, 19(4), 8. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iez072>
- Sun, M., Voorrips, R. E., Steenhuis-Broers, G., Van't Westende, W., & Vosman, B. (2018). Reduced phloem uptake of *Myzus persicae* on an aphid resistant pepper accession. *BMC Plant Biology*, 18, 138. <https://doi.org/10.1186/s12870-018-1340-3>
- Szwejdá, J. H. (2023). Diptera pests occurring on vegetable crops in Poland. *Journal of Horticultural Research*, 31(2), 169-188. <https://doi.org/10.2478/johr-2023-0030>
- Tommasini, M., & Maini, S. (1995). *Frankliniella occidentalis* and other thrips harmful to vegetable and ornamental crops in Europe. En A. J. M. Loomans, J. C. van Lenteren, M. G. Tommasini, S. Maini, & J. Ruidavets (Eds.), *Biological control of thrips pests* (Vol. 95, pp. 1-42). Wageningen University Papers. <https://edepot.wur.nl/282973>
- Torres-Quintero, M. C., Arenas-Sosa, I., Zúñiga-Navarrete, F., Hernández-Velázquez, V. M., Alvear-García, A., & Peña-Chora, G. (2022). Characterization of insecticidal Cry1Cb2 protein from *Bacillus thuringiensis* toxic to *Myzus persicae* (Sulzer). *Journal of Invertebrate Pathology*, 189, 107731. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2022.107731>



- Udiarto, B. K., Murtiningsih, R., Muharam, A., Moekasan, T. K., Setiawati, W., Hasyim, A., Sulastrini, I., Gunaeni, N., Korlina, E., Gunadi, N., Udiati, T., Tursilarini, T. Y., Negara, A., Ardjanhar, A., & Manzila, I. (2023). Preferences and functional response of Coccinellidae to *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). *Chilean Journal of Agricultural Research*, 83(6), 715-724. <https://oes.chileanjar.cl/files/CJAR230178-83-6-2023.pdf>
- Vázquez-Moreno, L. L. (2002). Avances en el control biológico de *Bemisia tabaci* en la región neotropical. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología*, 66, 82-95. <https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/5813/A2018e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Vélez-Ruiz, M. C., Meza-Vera, R. J., Abasolo-Pacheco, F., & Álvarez-Romero, P. I. (2022). Use of botanical extracts to control the aphid (*Myzus persicae*: Aphididae) and whitefly (*Bemisia tabaci*: Aleyrodidae) in pepper crop (*Capsicum annuum*: Solanaceae), in Ecuador. *Terra Latinoamericana*, 40. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1454>
- Weintraub, P. G., Kleitman, S., Mori, R., Shapira, N., & Palevsky, E. (2003). Control of the broad mite (*Polyphagotarsonemus latus* (Banks)) on organic greenhouse sweet peppers (*Capsicum annuum* L.) with the predatory mite, *Neoseiulus cucumeris* (Oudemans). *Biological Control*, 27(3), 300-309. [https://doi.org/10.1016/S1049-9644\(03\)00069-0](https://doi.org/10.1016/S1049-9644(03)00069-0)
- Wilberts, L., Van Hee, S., Stockmans, I., Meesters, C., Van Neerbos, F., Gloder, G., Geerinck, M. W. J., Wäckers, F., Jacquemyn, H., & Lievens, B. (2023). Combining root inoculation with *Akanthomyces muscarius* (Hypocreales: Cordycipitaceae) and the parasitoid *Aphidius ervi* (Haliday) (Hymenoptera: Braconidae) to control aphids on sweet pepper. *BioControl*, 68, 579-589. <https://doi.org/10.1007/s10526-023-10219-0>
- Wu, L., Zhou, C., Long, G., Yang, X., Wei, Z., Liao, Y., Yang, H., & Hu, C.-X. (2021). Fitness of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* to three solanaceous vegetables. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(3), 755-763. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63476-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63476-1)
- Zhu, J., Tian, K., Reilly, C. A., & Qiu, X. (2020). Capsaicinoid metabolism by the generalist *Helicoverpa armigera* and specialist *H. assulta*: species and tissue differences. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 163, 164-174. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2019.11.013>







Título de la obra
Enfermedades

Técnica
Ilustración digital con tableta, pincel en
textura de carboncillo

Autora
Laura Stefanny López Cortés (Sstefcore)

 @sstefcore

 Stefanny López

- Capítulo VI -

Principales enfermedades asociadas a accesiones del género *Capsicum* establecidas bajo condiciones protegidas

Nancy Yohana Grisales-Vásquez, Gleyder Yeraldin Bedoya-Vélez,
Cristian Dominguez Pulgarin, Laura Beatriz Espitia-Negrete,
Luz Fanny Orozco-Orozco

Este capítulo evalúa la expresión de síntomas asociados a microorganismos fitopatógenos en 282 accesiones del Banco de Germoplasma Vegetal de la Nación Colombiana de *Capsicum*, establecidas bajo condiciones protegidas en el C. I. La Selva de AGROSAVIA. Los síntomas de mayor frecuencia correspondieron a mildew polvoso (*Leveillula* sp.) y manchas bacterianas, siendo estas las principales limitantes sanitarias bajo las condiciones del estudio. El mildew polvoso se presentó en más de 100 accesiones en la mayoría de las evaluaciones; no obstante, 26 accesiones no mostraron síntomas y 30 registraron baja incidencia, lo que sugiere posibles fuentes de tolerancia o resistencia. Las manchas bacterianas se observaron en 155 accesiones (<50 % de la colección), y a pesar de ello, 54 acce-

siones no presentaron síntomas compatibles con este tipo de daño. Con frecuencia intermedia se registraron síntomas asociados a moho blanco (*Sclerotinia* sp.), moho gris (*Botrytis* sp.) y virosis. Por su parte, los síntomas compatibles con antracnosis (*Colletotrichum* sp.), ojo de sapo (*Cercospora* sp.) y mancha foliar por *Alternaria* sp. presentaron baja incidencia y se manifestaron en un número reducido de accesiones. Es relevante destacar que las accesiones 26 y 103 no presentaron ningún síntoma asociado a microorganismos fitopatógenos, lo que las convierte en materiales promisorios para programas de mejoramiento genético orientados a la resistencia o tolerancia a enfermedades. Sin embargo, se recomienda validar estos resultados en ambientes contrastantes.



Introducción

El término enfermedad en plantas, según Agrios (1997), se define como un desorden fisiológico que altera el funcionamiento normal de las plantas y reduce el potencial genético de producción. Esta condición es inducida por factores bióticos, como agentes patógenos (hongos, bacterias, virus, nematodos), o factores abióticos, relacionados con condiciones ambientales desfavorables.

Las enfermedades vegetales afectan el crecimiento, el desarrollo y la funcionalidad fisiológica, por lo que pueden desencadenar, en casos severos, la muerte de la planta. En los sistemas agrícolas, las consecuencias se reflejan en importantes pérdidas económicas, ya sea por la reducción en el rendimiento, en la calidad del producto o por el incremento de los costos de manejo. Estas pérdidas son más críticas en regiones tropicales, donde las condiciones ambientales constituyen un factor predisponente para la aparición y dispersión de enfermedades (Arauz Cavallini, 2011).

A nivel mundial, las enfermedades que afectan los cultivos de ají y pimentón están asociadas a oomicetos, hongos, virus y bacterias, que causan daños significativos en todos los sistemas de producción. Estas enfermedades disminuyen la calidad de los frutos y generan pérdidas económicas (Rugeles et al., 2010). Dada su relevancia, la información generada sobre su manejo es amplia y aplicable a diversas condiciones productivas, lo que permite a los agricultores adoptar

medidas preventivas y estrategias de control efectivas (Nageswararao Naik et al., 2022).

Dentro de estas estrategias, el uso de variedades resistentes se destaca como una alternativa sostenible para mitigar los efectos de estos patógenos, sin impactos negativos en el ambiente. Para el desarrollo de estas variedades, es fundamental identificar materiales con características de resistencia, como las poblaciones nativas, y comprender la herencia de esta resistencia, lo que facilita la implementación de programas de mejoramiento genético eficientes. En el caso de *Capsicum annuum*, Palma-Martínez et al. (2017) demostraron que la autofecundación de accesiones con genes de resistencia a *Phytophthora capsici* Leo. puede utilizarse para desarrollar líneas de chile resistentes a esta enfermedad.

Estas patologías representan uno de los mayores desafíos para los sistemas de producción, especialmente en el contexto actual, en el que el cambio climático ha incrementado la incidencia y la severidad de plagas y enfermedades. Además, estas son consideradas como uno de los principales factores que generan reducción del rendimiento, lo cual demanda una mayor capacidad de respuesta y de manejo oportuno del cultivo (Rugeles et al., 2010). Nageswararao Naik et al. (2022) indican que en ajís y pimentones hay cerca de 45 patologías, entre las que se encuentran: podredumbre de cuello (*Pythium* sp); phytophthora (*P. capsici*); mildew polvoso (*Leveillula taurica*); antracnosis (*Colletot-*

trichum capsici y *Colletotrichum gloeosporioides*); mancha foliar (*Cercospora capsici*); marchitez bacteriana (*Ralstonia solanacearum*); rizado de la hoja del chile (virus del rizado de la hoja del chile, género *Begomovirus* de Geminiviridae); mosaico del chile y distorsión de la hoja, causados por el virus del mosaico del pepino, y moteado leve del chile, causado por virus del mosaico del tabaco.

La expresión de dichas patologías resalta la importancia de implementar estrategias integradas de manejo, combinando medidas preventivas, monitoreo constante y el uso de tecnologías innovadoras para mitigar su impacto en el sistema productivo, con lo que se garantizan la sostenibilidad del cultivo y la seguridad alimentaria (Thangjam et al., 2020).

El manejo integrado de enfermedades (MIE) es una herramienta que plantea el empleo de distintos métodos de control para su tratamiento en los cultivos; no se limita únicamente al uso de plaguicidas, sino que además incluye otros recursos existentes en el campo, como organismos benéficos; el conocimiento de la biología del patógeno; la rotación de cultivos; las labores culturales apropiadas; biotecnologías y el uso de materiales resistentes obtenidos a partir del mejoramiento tradicional o de la ingeniería genética; la aplicación de agentes de control biológico, y el uso de sensores remotos para una vigilancia más precisa de los patógenos (Mukhtar et al., 2023).

Durante 2022 y 2023, en el C. I. La Selva de AGROSAVIA se realizó seguimiento a 282 accesiones del Banco de Germoplasma Vegetal para la Alimentación y la Agricultura de la Nación Colombiana, por su respuesta frente al inóculo natural de patógenos relacionados con el género *Capsicum*. El seguimiento fue realizado con periodicidad semanal, durante 32 semanas, mediante inspección visual, dirigida a la identificación de síntomas asociados con las limitantes fitosanitarias en las parcelas efectivas.

Se realizaron muestreos de los síntomas para la confirmación a nivel de género, por medio de microscopía óptica, en el laboratorio de fitopatología del C. I. La Selva. El material vegetal fue desinfectado según el tipo de órgano, para eliminar posibles contaminantes, y, posteriormente, se dispuso en cámaras húmedas. Luego, se realizó montaje para observación microscópica de estructuras de los hongos, para, de esta manera, y siguiendo las claves taxonómicas propuestas por Ellis (1971), Sutton (1980) y Barnett & Hunter (1998), confirmar a nivel de género el agente causal de patologías que permitiera su identificación por este método. No fue posible realizar la identificación de agentes causales de los daños asociados a bacterias, por lo cual se reportan los síntomas asociados, mas no los géneros o bacterias causales de estos.

También se llevó a cabo seguimiento de los síntomas en el tiempo, en cada una de las accesiones, para identificar en cuáles de estas se presentó menor expresión de los síntomas.





Foto: Nancy Johana Grisales-Vásquez

Entre los resultados más relevantes se identificaron síntomas compatibles con:

***Leveillula* sp. - mildew polvoso**

Este es un género ampliamente distribuido en zonas tropicales y que afecta más de 1.000 especies de plantas. Sin embargo, los hospederos más susceptibles pertenecen a la familia Solanaceae (Jiménez-Pérez et al., 2024). Puede diseminarse fácilmente por el viento, y los órganos que normalmente afecta son las hojas, aunque en ocasiones, en el cultivo de ají, según Kusch et al. (2020), se observa en flores.

Se considera una de las enfermedades más devastadoras de los ajís, tanto en campo como bajo condiciones protegidas (Karkanis et al., 2012; Jiménez-Pérez et al., 2024). Puede causar reducción del tamaño y la calidad de los frutos, así como disminución del rendimiento. Ajithkumar et al. (2014) reportan reducciones en el rendimiento hasta del 24 %. Una alta incidencia de este patógeno en las plantas causa desprendimiento de las hojas (McDougall et al., 2013; Thangjam et al., 2020).

Blázquez (1976) y Huaman et al. (2019) describen el agente causal del mildew polvoso como una masa polvosa blanquecina que puede generar clorosis en las hojas, así como caída de estas (Li et al., 2011; Hussain & Abid, 2011). Dicho polvillo se puede observar tanto en el haz como en el envés de las hojas, y corresponde a las esporas del hongo (figura 6.1).



Figura 6.1. Síntomas compatibles con mildew polvoso en accesiones de *Capsicum* spp. establecidas bajo condiciones de invernadero en el C. I. La Selva durante 2022-2023.

Fotos: Nancy Yohana Grisales-Vásquez

El control de esta enfermedad se fundamenta en el uso de fungicidas a base de azufre (Karkanis et al., 2012). Sin embargo, recientemente se reportó el uso de fungicidas a base de quitosano como una alternativa en el control de este fitopatógeno (Jiménez-Pérez et al., 2024).

La figura 6.2 muestra la expresión de estos síntomas en las accesiones evaluadas, evidenciando un

aumento en el número de accesiones afectadas a lo largo del tiempo. Esto sugiere que, a medida que las plantas se acercan a la senescencia, es posible que la expresión del patógeno se intensifique. Además, el incremento del inóculo natural, derivado del mayor número de plantas con síntomas, podría favorecer una mayor susceptibilidad. Cabe destacar que, en la mayoría de las evaluaciones, se observaron síntomas en más de 100 accesiones.



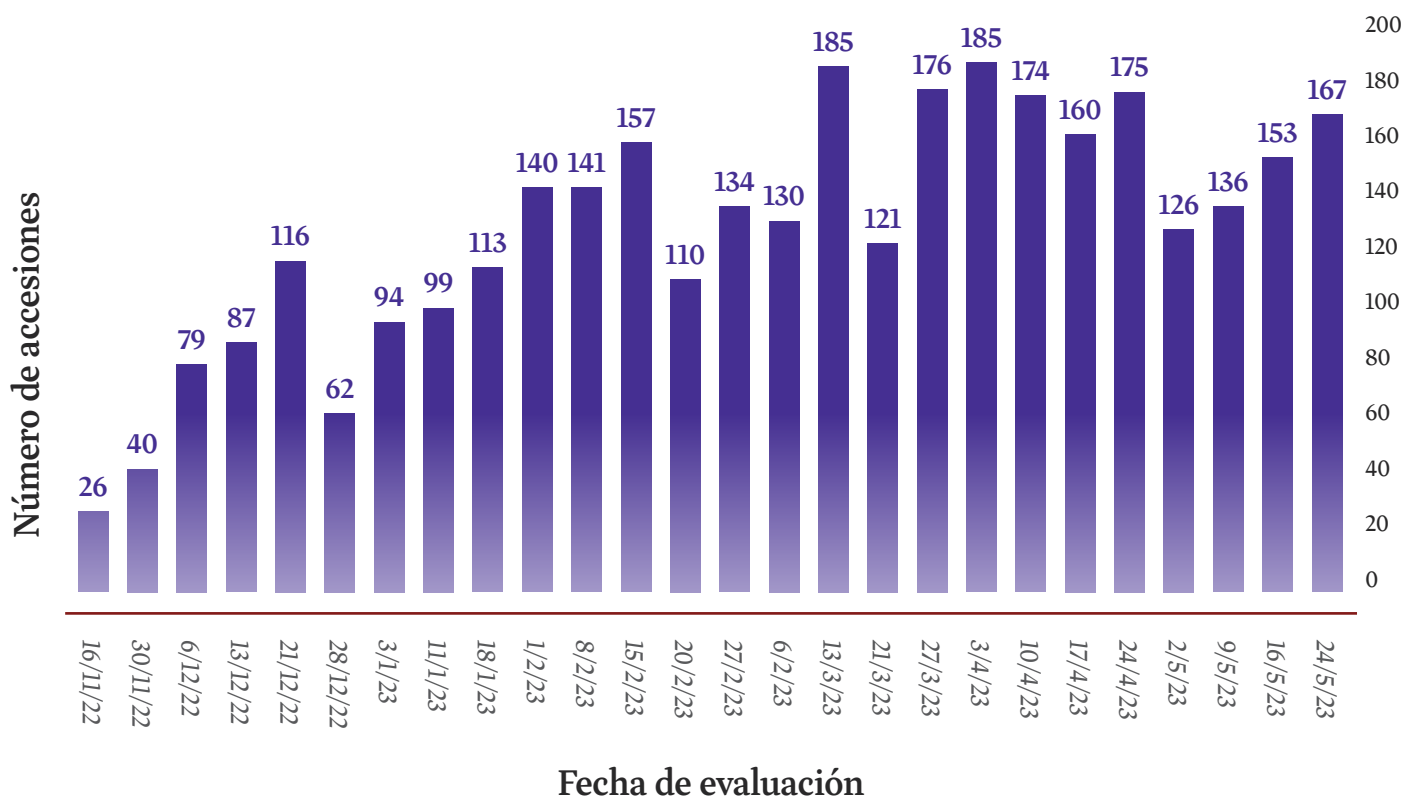


Figura 6.2. Expresión de síntomas de mildew polvoso de 26 evaluaciones en 282 accesiones del género *Capsicum* spp. bajo condiciones protegidas en el C. I. La Selva durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia

Durante el periodo de evaluación, 26 accesiones no presentaron el síntoma (figura 6.3), lo que indica que, en la población de estudio, frente a condiciones de inóculo natural, es posible identificar materiales promisorios que podrían contener genes de resistencia o tolerancia a este patógeno. Adicionalmente, se observa que 30 de las accesiones presentaron síntomas compatibles con mildew polvoso,

en un máximo de 2 de las 32 evaluaciones realizadas, es decir, que estas accesiones presentaron baja incidencia del patógeno. Sin embargo, es necesario realizar estudios en diferentes ambientes, para confirmar la susceptibilidad o tolerancia de las accesiones. Adicionalmente, la figura 6.3 indica que el síntoma se mantuvo presente en 26 de las 32 evaluaciones.

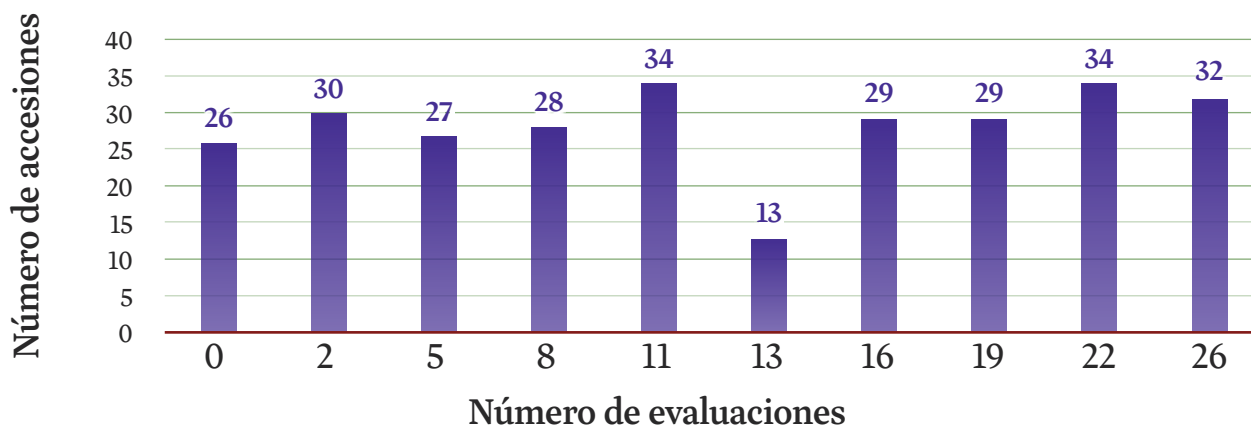


Figura 6.3. Número de accesiones por frecuencia de aparición de mildew polvoso en la colección de *Capsicum* spp. en el C. I. La Selva evaluadas bajo condiciones protegidas durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia

***Sclerotinia* sp. - moho blanco**

Jeon et al. (2006) reportan la *Sclerotinia sclerotiorum* como agente causal del daño denominado moho blanco o podredumbre algodonosa en pimentón. Este patógeno afecta más de 400 especies de plantas en el mundo, y representa gran pérdida económica para los cultivos que ataca, debido a que forma unas estructuras de resistencia denominadas esclerocios, que pueden permanecer viables en el suelo sin presencia de los hospederos por largos periodos de tiempo —hasta ocho años— (Ordóñez-Valencia et al., 2018).

Los esclerocios son de fácil dispersión y las condiciones de alta humedad favorecen su geminación (McDougall et al., 2013). Han sido reportados afectando cultivos de girasol, soya, frijol, garbanzo y cebolla. En Estados Unidos se han reportado en los cultivos pérdidas superiores a USD 200 millones (Bolton et al., 2006).

El patógeno afecta principalmente los tallos de las plantas, causándoles marchitamiento al impedir la

traslocación de agua hacia los ápices. Los síntomas de este daño corresponden a necrosamiento del tejido vegetal, que inicia como una lesión oscura y puede observarse como manchas húmedas y blandas, o en forma de lesiones secas con anillos concéntricos (figura 6.4). En altas afecciones del patógeno, los tallos exhiben el micelio o moho algodonoso blanco, y se observan pequeños puntos negros, que corresponden a los esclerocios o estructuras de resistencia del hongo. Estos se desarrollan dentro del tejido vegetal y es posible que lo hagan también en los frutos, con lo que afectarán las semillas. En consecuencia, los esclerocios se convierten en una forma de dispersión del patógeno, el cual también se ha reportado afectando raíz, tallo y hojas (Jeon et al., 2006). El moho blanco es necrotrofo, lo que indica que induce procesos de muerte celular de los hospederos. Es decir que una vez ataca las plantas, las células afectadas mueren, con lo que se genera daño en todo el tejido vegetal (Bolton et al., 2006).



Figura 6.4. Síntomas de daño que corresponden a necrosamiento del tejido vegetal. a. Anillos concéntricos, síntoma compatible con moho blanco; b. y c. Vista de micelio y esclerocios en estereoscopio, en accesiones de *Capsicum* spp. establecidas bajo condiciones de invernadero en el C. I. La Selva durante 2022-2023.

Fotos: Nancy Yohana Grisales-Vásquez y Gleyder Yeraldín Bedoya-Vélez

El control de enfermedades causadas por este patógeno es especialmente complejo, debido a las estructuras de resistencia y a su potencial reproductivo. Además, se ve favorecido por condiciones de alta humedad y temperaturas entre los 15 y 25 °C (McDougall et al., 2013).

Por estas razones, las alternativas para combatir el patógeno se centran en uso de variedades resistentes y en adecuadas distancias de siembra que permitan aireación en los cultivos. Se ha reportado que el uso de *Trichoderma harzianum* puede reducir la capacidad infectiva y el potencial del inócu-

lo (Bae & Knudsen, 2007). Ordóñez-Valencia et al. (2018) reportan, entre las alternativas de manejo, el uso de bicarbonato de potasio como una estrategia de manejo alternativo. Finalmente, los fungicidas sintéticos en rotación evitan el desarrollo de resistencia del patógeno (Bolton et al., 2006).

En la figura 6.5 se observa que durante el ciclo del cultivo se presentaron diferencias en la expresión del síntoma. En la evaluación de abril de 2023 se observó mayor cantidad de accesiones (36) con síntomas del daño compatible con moho blanco.

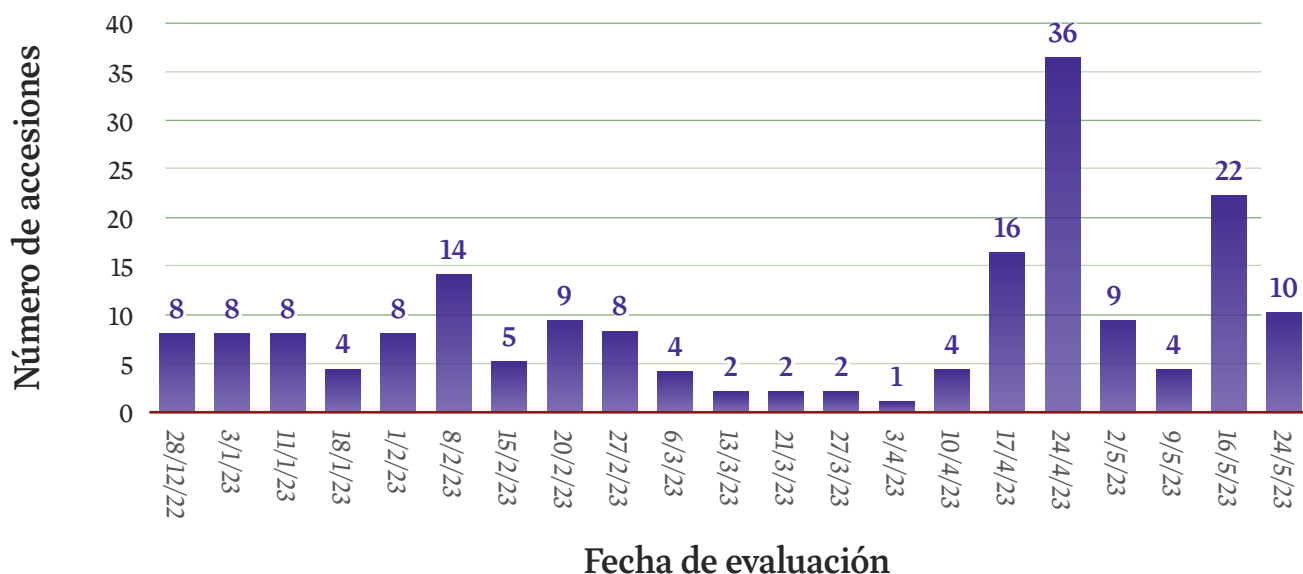


Figura 6.5. Expresión de síntomas de moho blanco a través de 32 evaluaciones en 282 accesiones del género *Capsicum* spp. bajo condiciones protegidas en el C. I. La Selva durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia

Durante el estudio se encontró que 176 accesiones no presentaron síntomas del patógeno en ninguna de las observaciones realizadas (figura 6.6), mientras que la mayor frecuencia de observación se presentó en dos de las accesiones, de manera que se apreciaron síntomas en 6 de las 32 evaluaciones realizadas. Es de tener en cuenta que el manejo de esta enferme-

dad correspondió a eliminación de tejido vegetal afectado, lo que posiblemente restringió la propagación de los síntomas. Por esta razón se propone evaluar en ambientes diferentes y contrastantes las accesiones que no presentaron síntomas, con el fin de confirmar la presencia de genes que codifiquen la respuesta de resistencia de las plantas al patógeno.

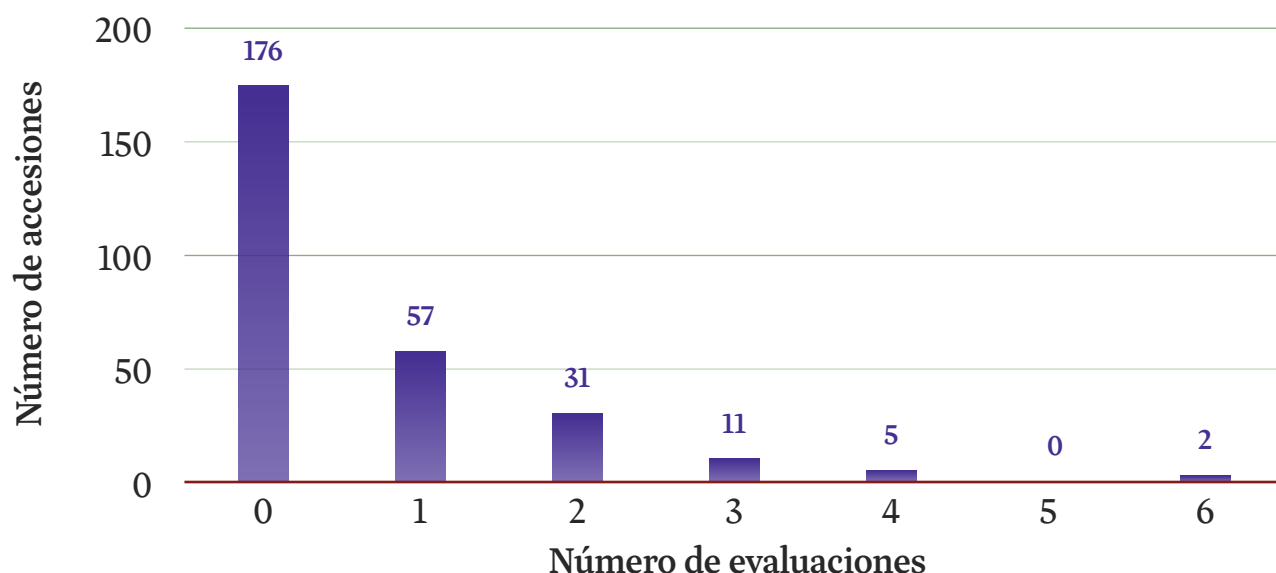


Figura 6.6. Número de accesiones por frecuencia de aparición de moho blanco en la colección de *Capsicum* spp. en el C. I. La Selva evaluadas bajo condiciones protegidas durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia

***Botrytis* sp. - moho gris**

El moho gris causado por *Botrytis cinerea* es un hongo de distribución mundial; se ha reportado afectando más de 200 especies de plantas cultivadas, sean ornamentales, frutales u hortalizas, entre ellas el género *Capsicum* (Polat et al., 2018; Wang et al., 2022). Su incidencia aumenta en lugares con alta humedad relativa y causa la denominada podredumbre en poscosecha (Kamara et al., 2016).

Este es considerado el patógeno más importante en lo relativo a la descomposición poscosecha de frutas y verduras frescas, y ocupa el segundo lugar entre los diez patógenos de mayor importancia económica en el mundo. Se transmite en campo y permanece laten-

te hasta que el fruto alcanza su madurez (Romanazzi & Feliziani, 2014). Según Tamayo y Jaramillo (2006), en Colombia puede causar daños significativos en los cultivos de pimentón y jalapeño.

Los síntomas se observan en flores, tallos y frutos, e inician con pequeñas lesiones de color marrón amarillento claro, que aumentan de tamaño y se tornan en manchas de color gris. Este patógeno se presenta principalmente sobre los frutos, al desarrollar una podredumbre acuosa en la superficie (figura 6.7). Internamente, se observa crecimiento micelial gris con conidios (Tamayo & Jaramillo, 2006); también afecta pecíolos y ápices de hojas, y produce lesiones de color café.



Figura 6.7. Síntoma compatible con moho gris en accesiones de *Capsicum* spp. establecidas bajo condiciones de invernadero en el C. I. La Selva durante 2022-2023.

Foto: Nancy Yohana Grisales-Vásquez

El moho gris cuenta con gran habilidad para desarrollar infecciones en condiciones de alta humedad y bajas temperaturas —propias del almacenamiento—; además, se desarrolla con mayor facilidad en frutos maduros o senescentes, lo cual, sumado a la diversidad de hospederos, dificulta su control.

El manejo de este patógeno se ha fundamentado en el uso de fungicidas químicos en la fase pre-secha, a fin de reducir el inóculo (Droby & Lichter, 2007), lo que implica el conocido efecto negativo sobre el ambiente y, principalmente, en la salud humana (Polat et al., 2018; Wang et al., 2022).

A la fecha del estudio no se tenían cultivares con resistencia al moho gris (Kamara et al., 2016), razón por la cual se ha venido trabajando en identificar alternativas de control, entre las que se encuentran inductores de resistencia, como el dehidroacetato sódico y el trans-2-hexenal, ambos con buenos resultados en el control de este patógeno (Wang et al., 2022).

En los resultados encontrados se reporta que los síntomas compatibles con el moho gris se presentaron con mayor incidencia en abril de 2023, cuando se observaron 51 accesiones con el

síntoma (figura 6.8). El patógeno no se observó en 148 de las accesiones (figura 6.9), mientras que la mayor frecuencia de aparición fue en la accesión 116, durante 9 de las 32 observaciones, lo que indica que posiblemente esta sea una de las accesiones de mayor susceptibilidad al patógeno bajo las condiciones del estudio. En segundo lugar de ocurrencia del síntoma se encuentran las accesiones 30, 41, 76, 134, 149, 150 y 185, en las que fue percibido en 4 de las 32 observaciones. Estos resultados indican que bajo las condiciones del estudio el patógeno no fue limitante para el cultivo.

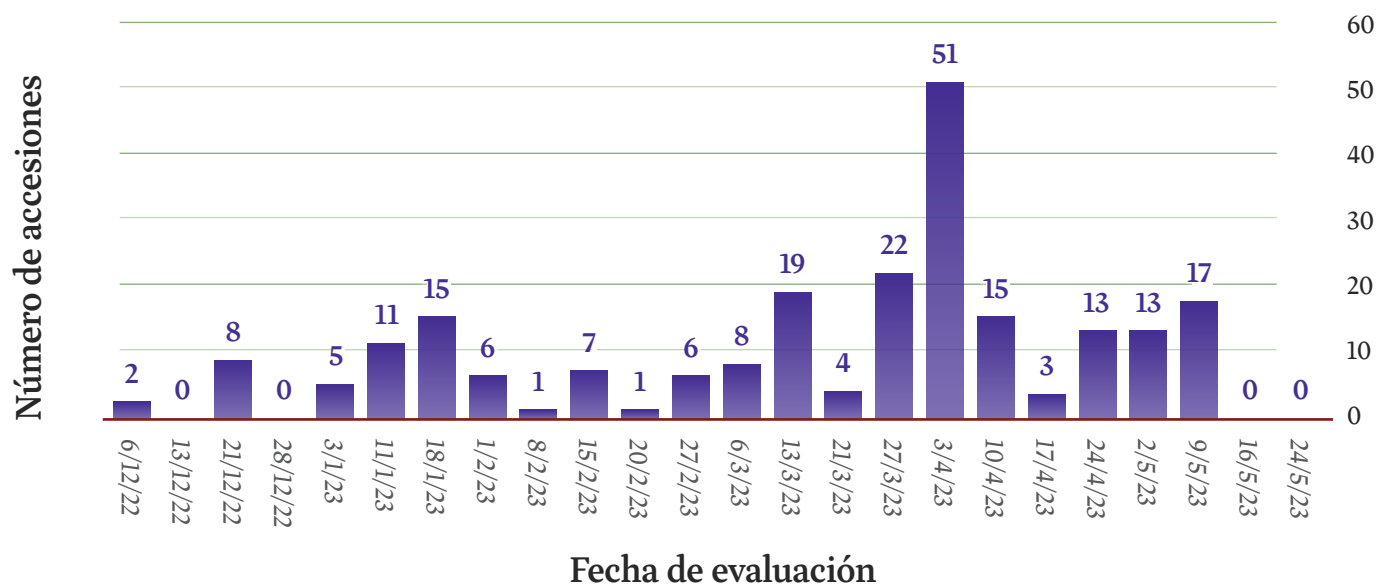


Figura 6.8. Expresión de síntomas de moho gris a través de 32 evaluaciones en 282 accesiones del género *Capsicum* bajo condiciones protegidas en el C. I. La Selva durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia

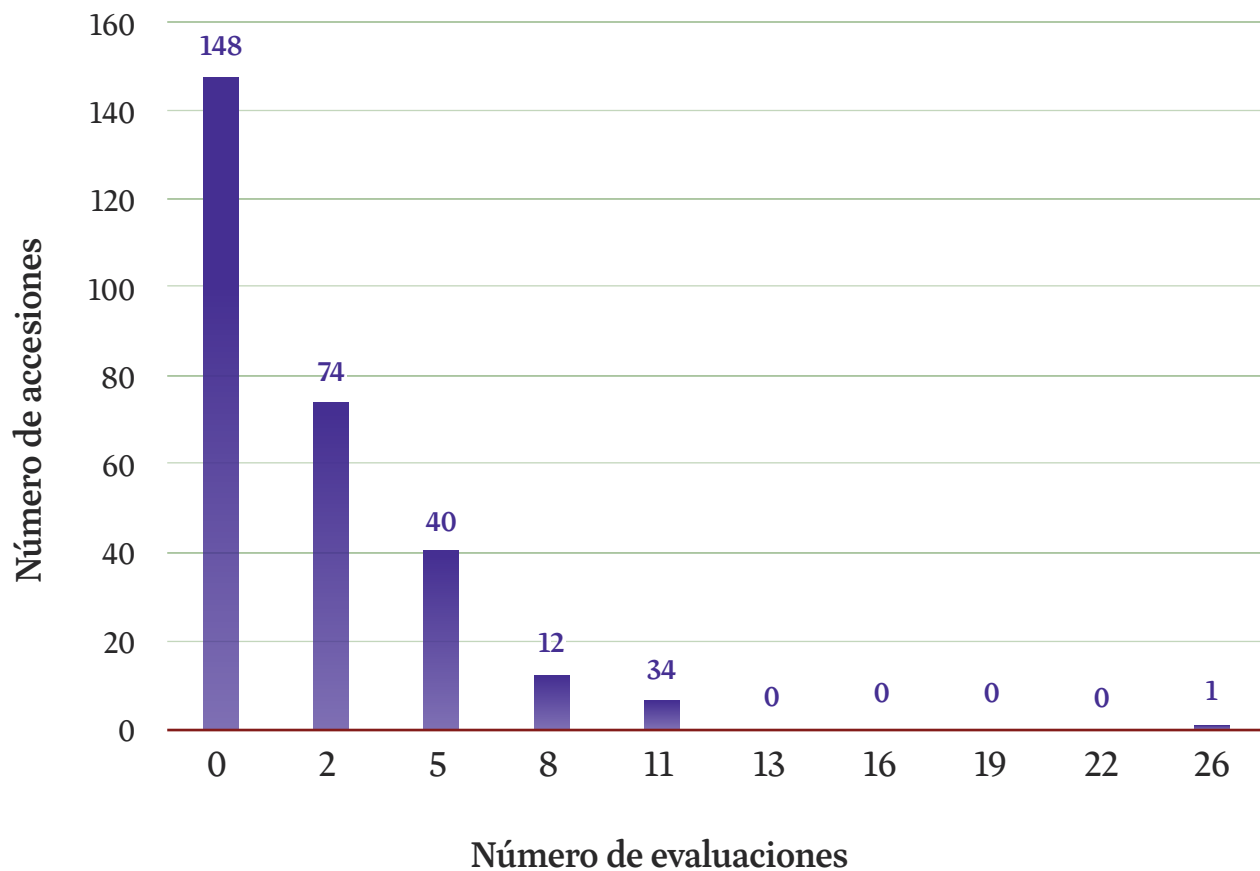


Figura 6.9. Número de accesiones por frecuencia de aparición de moho gris en la colección de *Capsicum* en el C. I. La Selva evaluadas bajo condiciones protegidas durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia

***Colletotrichum* sp. - antracnosis**

Conocida como antracnosis, esta enfermedad se presenta principalmente en condiciones de verano, infectando flores, hojas, ramas y frutos en campo, aunque puede ser problemática también en frutos cosechados; es causada por

diferentes especies de hongos del género *Colletotrichum*. El patógeno es diseminado fácilmente por el viento y la salpicadura de agua, así como mediante semilla infectada (Asalmol et al., 2001; Tamayo & Jaramillo, 2006).



La antracnosis del fruto es una enfermedad frecuente a nivel mundial en cultivos del género *Capsicum*, como pimentón, ají rocoto y ají jalapeño; es una de las mayores limitantes del cultivo y la producción de semillas en las principales regiones productoras de chile de la India (Ajithkumar et al., 2014).

Esta enfermedad causa reducción de la producción y de la calidad de los frutos. El patógeno se mantiene en restos de cultivos, y se ve favorecido por presencia de lluvias y humedad ambiental cercana al 80 % (Oo & Oh, 2016); la temperatura óptima para su desarrollo se encuentra entre 15 y 20 °C (Tamayo & Jaramillo 2006). Según Kiran et al. (2020), la enfermedad puede causar pérdidas del rendimiento entre el 20 y el 80 % de la producción a nivel mundial, y la reportan como la más común y devastadora en la India.

La infección suele iniciar cuando el cultivo está en floración. En esta etapa produce aborto de flores —estas se secan y caen— (Thangjam et al., 2020). En ramas parcialmente afectadas es posible que se presenten frutos pequeños y de mala calidad. En afecciones severas se presenta secamiento, marchitamiento y la posterior muerte de la rama. En frutos y hojas, la infección se caracteriza por generar lesiones negras, hundidas y redondas o angulares, en ocasiones con anillos concéntricos y húmedos, que eventualmente producen masas de color salmón, lo que corresponde a la esporulación del hongo. Bajo condiciones

de alta humedad las manchas pueden fusionarse (Moe & Sang-Keun, 2016).

Entre las estrategias de manejo se recomienda usar cultivares resistentes al patógeno —pero en Colombia no se cuenta con cultivares resistentes— y establecer semilleros a partir de semilla sana, que no provenga de plantaciones que hayan presentado afectaciones de este patógeno. También se indica mantener una adecuada aireación del cultivo, con distancias de siembra que permitan el flujo de aire entre las plantas; rotar el cultivo con sistemas productivos que no sean hospederos del patógeno; remover restos de cosecha, y, finalmente, realizar manejo químico, teniendo presente una rotación adecuada de productos a base de azufre y cobre.

Ajithkumar et al. (2014) y Moe y Sang-Keun (2016) indican que la mezcla de los ingredientes activos azoxystrobin + mancozeb presenta un efecto positivo en el control de la antracnosis. Kiran et al. (2020) indican que es posible controlar el patógeno con agentes de biocontrol y extracto de plantas; además, señalan que las adecuadas labores de cultivo permiten reducir la tasa de infección y minimizar la presión del inóculo.

En la figura 6.10 es posible apreciar que la mayoría de las accesiones no presentó síntomas de daño por este patógeno y que 15 de ellas mostraron síntomas en solo una de las evaluaciones realizadas. Según se presenta en la figura 6.11, la expresión de los síntomas se observó en solo una fecha de marzo de 2023.

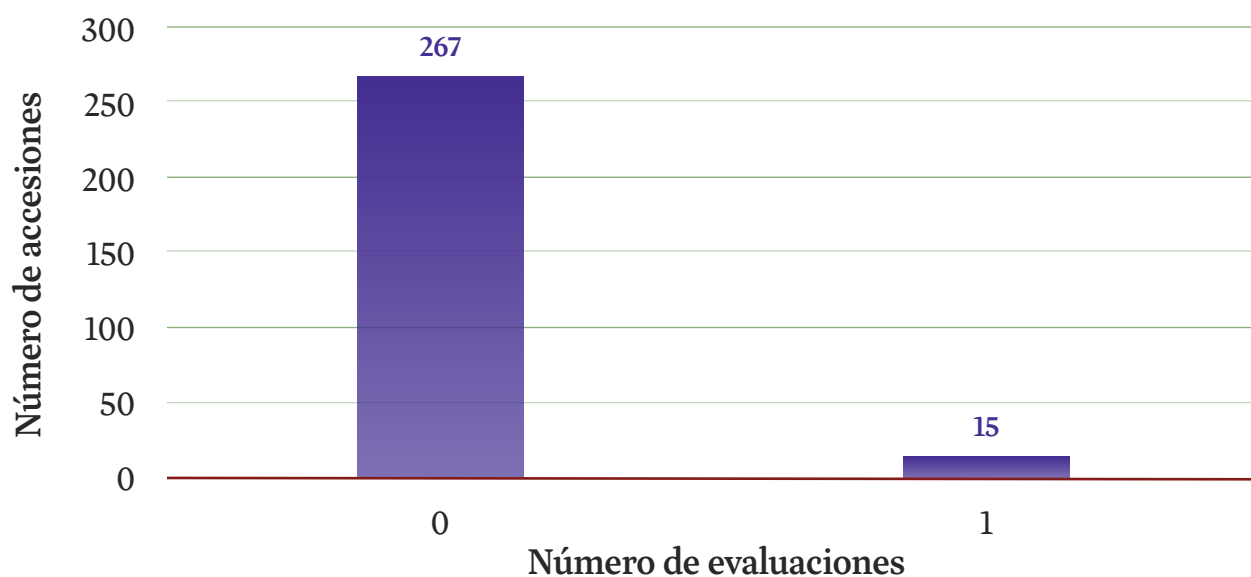


Figura 6.10. Número de accesiones por frecuencia de aparición compatibles con antracnosis en la colección de *Capsicum* spp. en el C. I. La Selva evaluadas bajo condiciones protegidas durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia

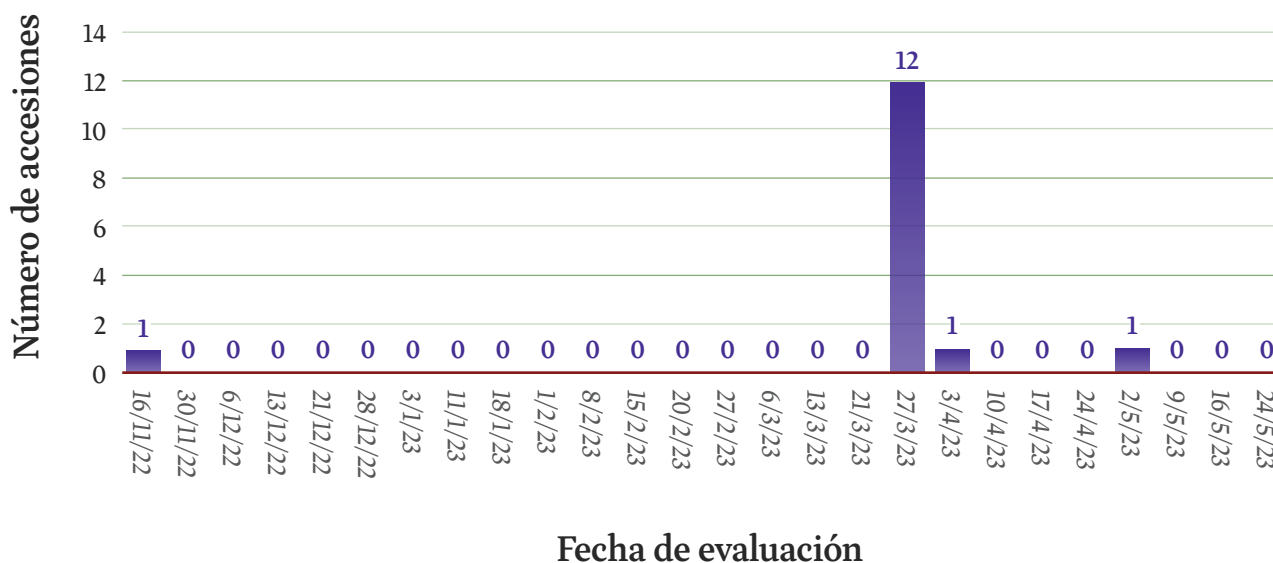


Figura 6.11. Expresión de síntomas compatibles con antracnosis a través de 32 evaluaciones en 282 accesiones del género *Capsicum* bajo condiciones protegidas en el C. I. La Selva durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia



***Cercospora* sp. - ojo de sapo**

La enfermedad es conocida, entre otros nombres, como ojo de sapo. Las estructuras del hongo permanecen en las semillas y en restos de cultivo; pueden propagarse en las herramientas, por el viento y por la lluvia, al entrar en contacto con las hojas (Ajithkumar et al., 2014; Salam et al., 2022).

Esta enfermedad se ve favorecida por temperaturas entre 20 y 30 °C, humedad relativa por encima del 90 % (Salam et al., 2022) y condiciones de estrés nutricional de la planta, mientras que su actividad se ve desfavorecida por temperaturas inferiores a 10 °C y superiores a 40 °C. Además de infectar hojas, puede afectar tallos, pecíolos y pedúnculos (Lopes & Henz, 2008).

La infección en la planta inicia por las hojas inferiores y avanza de forma ascendente hasta llegar a

las hojas nuevas, con lo cual interrumpe el proceso de fotosíntesis. Cuando la enfermedad es severa, las hojas se tornan de color amarillo y se produce defoliación que genera fruta pequeña y con forma irregular (Thangjam et al., 2020; Rosa, 2005).

Los síntomas aparecen principalmente en el follaje. Al principio, se observan pequeñas manchas circulares marrón-rojizas, que por lo general se aprecian tanto por el haz como por el envés de la hoja. Allí se presentan en forma de pequeños círculos con márgenes de color marrón oscuro y centro de color gris claro ceniciento, y un halo clorótico. Estas lesiones pueden aumentar de tamaño y en ocasiones fusionarse con otras. En daños muy avanzados, el centro de la mancha necrótica puede desprenderse y dejar un aspecto de agujeros en el tejido (figura 6.12).



Figura 6.12. Síntomas compatibles con el daño denominado ojo de sapo en accesiones de *Capsicum* spp. establecidas bajo condiciones de invernadero en el C. I. La Selva durante 2022-2023.

Foto: Nancy Yohana Grisales-Vásquez

En los tallos, la enfermedad se presenta como manchas de centro gris claro con bordes oscuros, normalmente de forma elíptica. Las hojas más viejas se pueden caer prematuramente por la infección, lo cual afecta el rendimiento del cultivo (Salam et al., 2022).

Entre las estrategias de manejo se propone el uso de semilla que provenga de cultivos sanos; además, se deben eliminar los residuos de cosecha. Entre los ingredientes activos recomendados para el manejo de este patógeno se encuentran: mancozeb, chlorothalonil y triadimefon (Thangjam et al., 2020). Salam et al. (2022) reportan que el uso de extractos

vegetales como ajo, jengibre y neem presenta resultados prometedores en el control del patógeno.

Al igual que el síntoma compatible con alternaria, la frecuencia de aparición del síntoma denominado ojo de sapo fue baja: 263 accesiones no presentaron síntomas de dicho patógeno bajo las condiciones del estudio (figura 6.13). De las accesiones, 17 presentaron síntomas en solo una de las evaluaciones realizadas, mientras que 2 presentaron síntomas en 3 de las evaluaciones. Según se presenta en la figura 6.14, la mayoría de las accesiones presentaron síntomas a final del ciclo del cultivo.

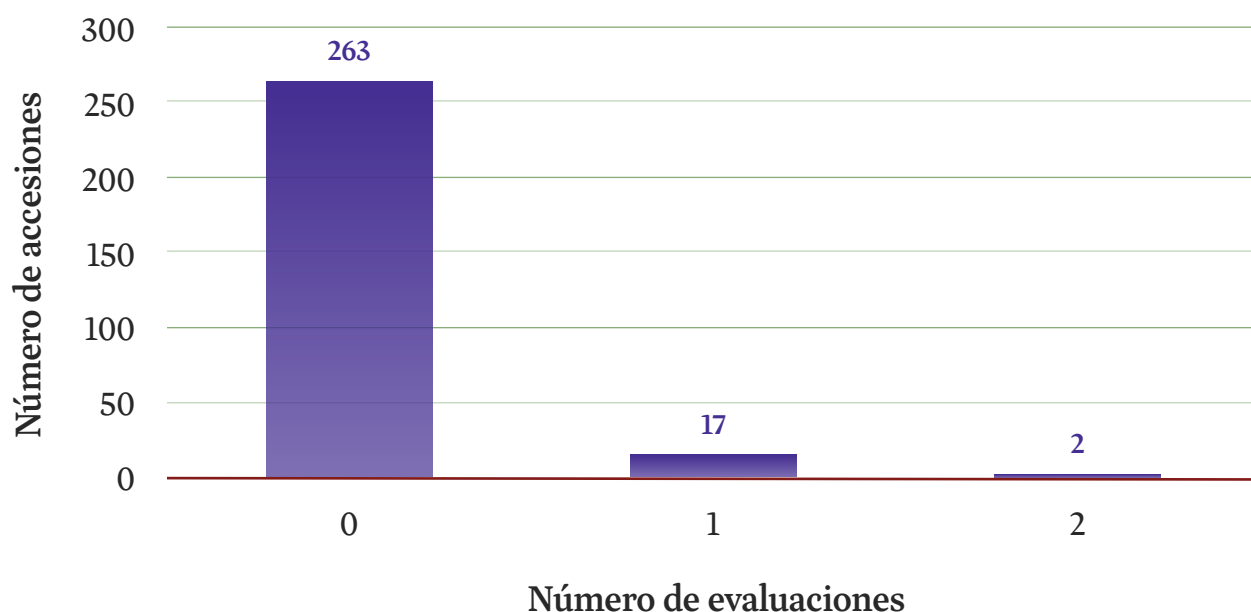


Figura 6.13. Número de accesiones por frecuencia de aparición del síntoma denominado ojo de sapo en la colección de *Capsicum* spp. en el C. I. La Selva evaluadas bajo condiciones protegidas durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia



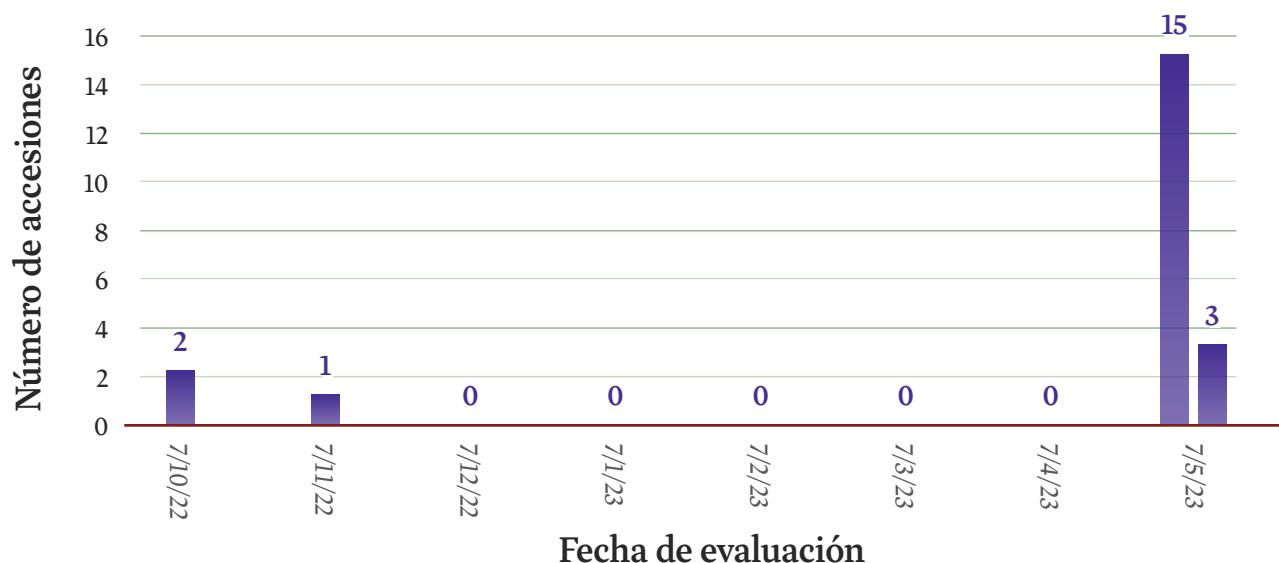


Figura 6.14. Expresión de síntomas del daño denominado ojo de sapo a través de 32 evaluaciones en 282 accesiones del género *Capsicum* bajo condiciones protegidas en el C. I. La Selva durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia

***Alternaria* sp. - mancha foliar por alternaria**

El daño conocido como mancha foliar, causado por el género *Alternaria*, se ha observado en los cultivos de *Capsicum*. Este patógeno se aloja en la parte aérea de las plantas y se disemina a través de las semillas, el aire y el agua. Si el cultivo se propaga a partir de semilla infectada, es posible que el síntoma se exprese desde la etapa de vivero. Este patógeno se aloja en restos de plantas en campo y requiere de temperaturas entre 25 y 28 °C, así como de humedad ambiental alta, por lo que las condiciones de agua libre sobre el tejido vegetal favorecen el desarrollo de la enfermedad (Khalid, 2021). Tamayo & Jaramillo (2006) reportan a *Alternaria solani* como agente causal de este daño.

Los síntomas asociados a este patógeno corresponden a manchas oscuras irregulares o circulares, con anillos o zonas concéntricas, de apariencia negra afelpada en el centro, que presentan un borde externo definido color café claro. En condiciones de humedad relativa alta, avanzan rápidamente, de manera que ocasionan una pudrición blanda al tacto que termina en pudriciones secas. El patógeno ingresa al hospedero a través de los estomas o heridas (McDougall et al., 2013).

Entre las estrategias de control del patógeno se deben considerar las adecuadas distancias de siembra, la eliminación de restos de cosecha o de podas del

cultivo, así como de los hospederos alternos. En diversos estudios se ha reportado el control de este patógeno mediante el uso de *T. harzianum* en condiciones de laboratorio, y con la implementación de casa de malla (Khalid, 2021).

Por otro lado, Devappa & Thejakumar (2016) reportaron que la mezcla de Tilt con extracto de eucalipto y *Pseudomonas fluorescens* tiene efectos positivos en el control de la enfermedad, sin embargo, estudios como el mencionado deben avanzar a su etapa de campo para concluir si el biocontrol resulta ser eficiente contra el patógeno. Otra alternativa es el tratamiento con productos de síntesis química con

ingredientes activos, como clorotalonil, captan, fludioxonil, imazalil, iprodiona, maneb, mancozeb, tiram y cobre, que resultan efectivos en el control de esta enfermedad (Khalid et al., 2021).

En la figura 6.15 se observa que 158 del total de las accesiones evaluadas no presentaron síntomas durante todo el periodo de evaluación, la mayor frecuencia de aparición de estos fue en 2 accesiones (156 y 246), en las que se presentaron en 4 de las 32 evaluaciones realizadas. En la figura 6.16 se puede ver que en el mes de abril de 2023 se da un pico de incidencia, ya que 108 accesiones fueron reportadas con presencia de este síntoma.

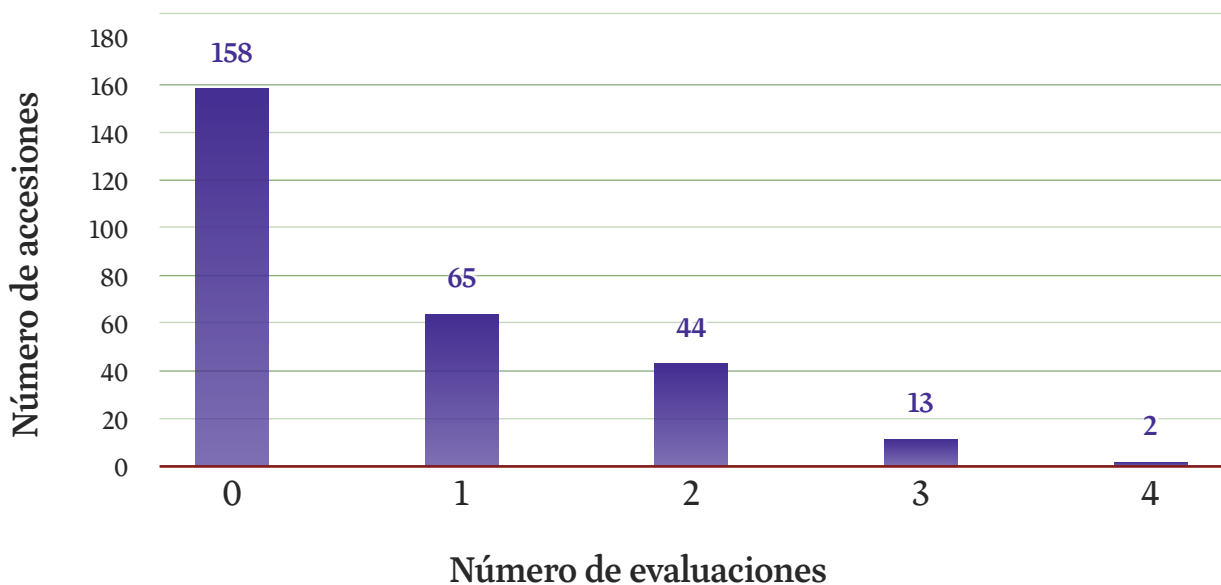


Figura 6.15. Número de accesiones por frecuencia de aparición del síntoma denominado mancha foliar por alternaria en la colección de *Capsicum* spp. en el C. I. La Selva evaluadas bajo condiciones protegidas durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia



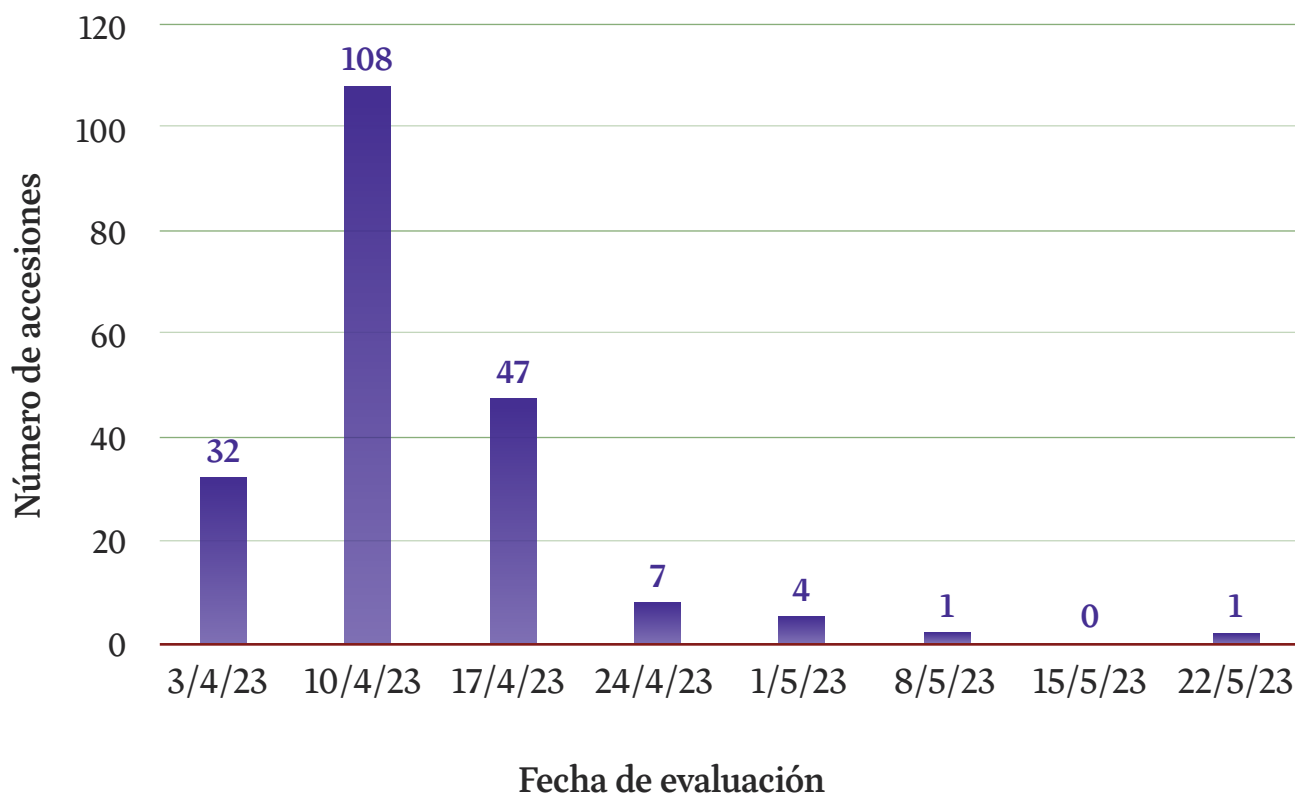


Figura 6.16. Expresión de síntomas del daño denominado mancha foliar por alternaria a través de 32 evaluaciones en 282 accesiones del género *Capsicum* bajo condiciones protegidas en el C. I. La Selva durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia

Virus

Los síntomas asociados a este grupo de fitopatógenos incluyen: enrollamientos, mosaicos, bronceado de las hojas y rayados. Entre la colección de *Capsicum* evaluada bajo condiciones protegidas en el C. I. La Selva, los más comúnmente observados correspondieron a mosaicos, por lo general aso-

ciados al virus del moteado del tomate (TSWV, por su sigla en inglés) (figura 6.17). En esta sección se hace una descripción de los principales síntomas asociados a enfermedades causadas por patógenos de origen viral y se presenta la expresión de dichos síntomas en 284 accesiones de *Capsicum* sp.

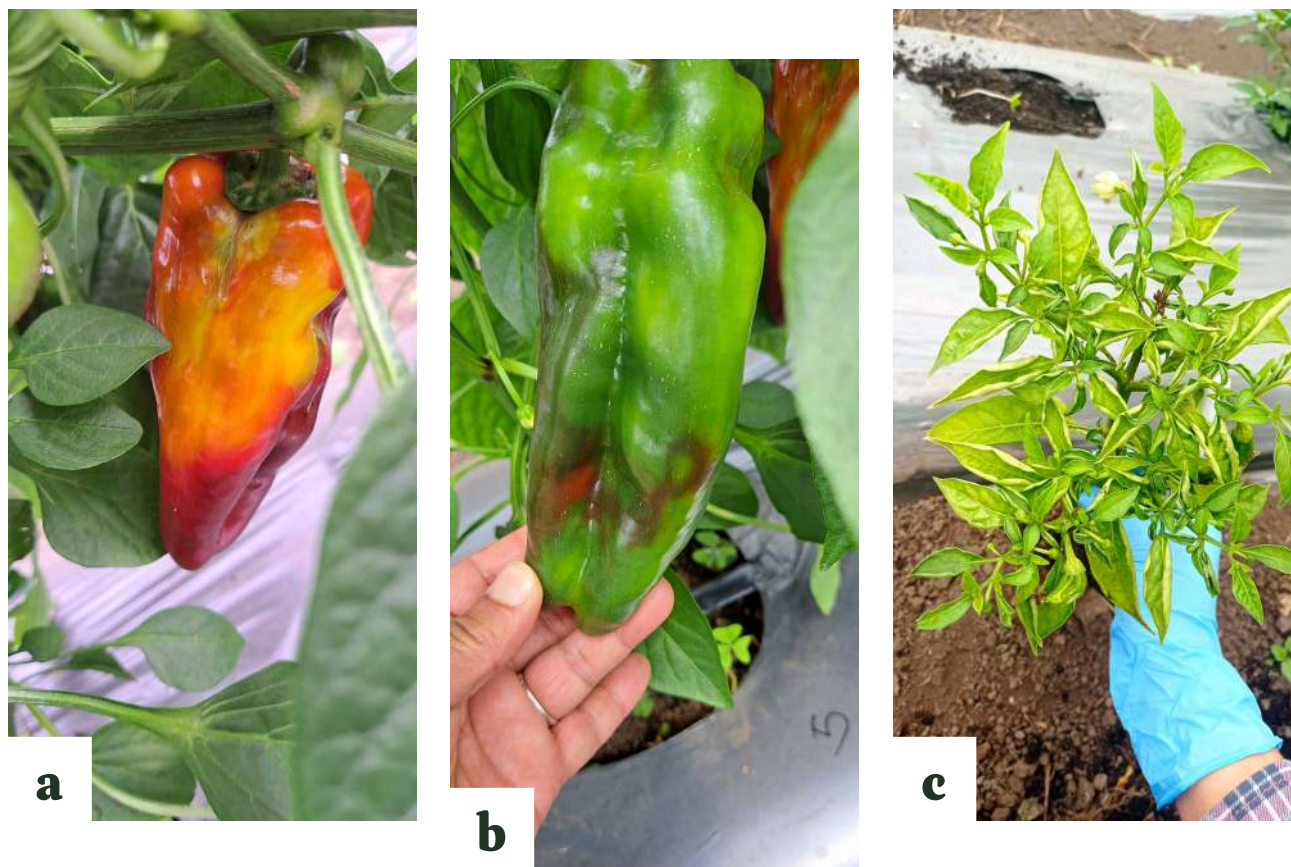


Figura 6.17. Daños por virus en accesiones de *Capsicum* spp. establecidas bajo condiciones protegidas en el C. I. La Selva durante 2022-2023. a y b. Daño del moteado, compatible con el virus TSWV; c. Síntomas compatibles con enrollamiento de hojas.

Fotos: Nancy Yohana Grisales-Vásquez y Gleyder Yeraldín Bedoya-Vélez

Enrollamiento de las hojas

Entre los principales fitopatógenos que causan este tipo de síntomas se encuentran los comprendidos en el género *Begomovirus*, denominados *tomato yellow leaf curl virus* (TYLCV) y *tomato leaf curl virus* (ToLCV). Su alta incidencia en las zonas tropicales y subtropicales los han convertido en uno de los grupos de virus de interés, ya que pueden limitar sensiblemente la producción de hortalizas. Además, han sido reportados recientemente en Colombia, en donde afectan los cultivos comerciales de ají (Vaca-Vaca et al., 2019). Estos virus son trans-

mitidos por la mosca blanca (*Trialeurodes vaporariorum*) y pueden causar pérdidas hasta del 53 % de la producción o más.

Los síntomas característicos que producen son enrollamiento y amarillamiento de las hojas, y un severo retraso en el crecimiento de las plantas. Las hojas presentan agrupamiento y márgenes curvados hacia arriba (McDougall et al., 2013); pueden presentar clorosis intervenal y generalizada, acortamiento de entrenudos, deformación de frutos y enanismo (Vaca-Vaca et al., 2019).



Foto: Yeraldin Bedoya Vélez

Mosaicos

Incluyen el *tobacco mosaic virus* (TMV), el *cucumber mosaic virus* (CMV) y el *alfalfa mosaic virus* (AMV), que son transmitidos principalmente por mosca blanca y áfidos. Estos virus producen manchas de color verde claro u oscuro en las hojas. El amarillamiento y los anillos cloróticos aparecen por lo general en los frutos y hojas de las plantas afectadas. Estos síntomas normalmente son acompañados con retraso del crecimiento en las primeras etapas. En ajís y pimentones también se presentan los virus pertenecientes al género *Cucumovirus*. Los

síntomas aparecen alrededor de 10 días después de la infección, y se manifiestan como mosaicos o patrones moteados en las hojas; los frutos también pueden mostrar deformación con manchas anulares o manchas amarillas. Se transmiten por áfidos, semillas infectadas y daño mecánico (McDougall et al., 2013). Estas enfermedades se documentaron recientemente afectando cultivos de ají en Colombia, donde también se reportó que pueden ser transmitidas por la especie *Aphis gossypii* (Rivera-Toro et al., 2020).

Bronceados

En este grupo está el *tomato torrado virus* (ToTV), causado por *Torradovirus*. Los síntomas iniciales son pequeñas manchas color café; las hojas nuevas pueden tener un área amarilla en la base. Cuando la planta está muy afectada, se torna a color café y las hojas mueren. Este virus es transmitido por mosca blanca (*T. vaporariorum* y *Bemisia tabaci*).

Entre los bronceados se encuentra así mismo el TSWV, causado por *Tospovirus*. Los síntomas son bronceado de las hojas, manchas o anillos bronceados entre las venas y manchas circulares en los frutos; dichos síntomas aparecen de 7 a 20 días después de la infección. El virus es transmitido

por *Thrips tabaci*, *Thrips palmi*, *Frankliniella occidentalis*, *Frankliniella schultzei* y *Scirtothrips dorsalis* (McDougall et al., 2013).

En la colección de ajís y pimentones establecida bajo condiciones protegidas en el C. I. La Selva, se observaron diversos síntomas compatibles con este tipo de daños. En la figura 6.18 se observa que estos fueron más comunes en febrero de 2023, alcanzando a observarse 18 accesiones afectadas. Las plantas en cuestión fueron eliminadas con la finalidad de evitar la propagación, razón por la cual este síntoma no fue observado en las evaluaciones subsecuentes.



Foto: Nancy Johanna Grisales-Vásquez

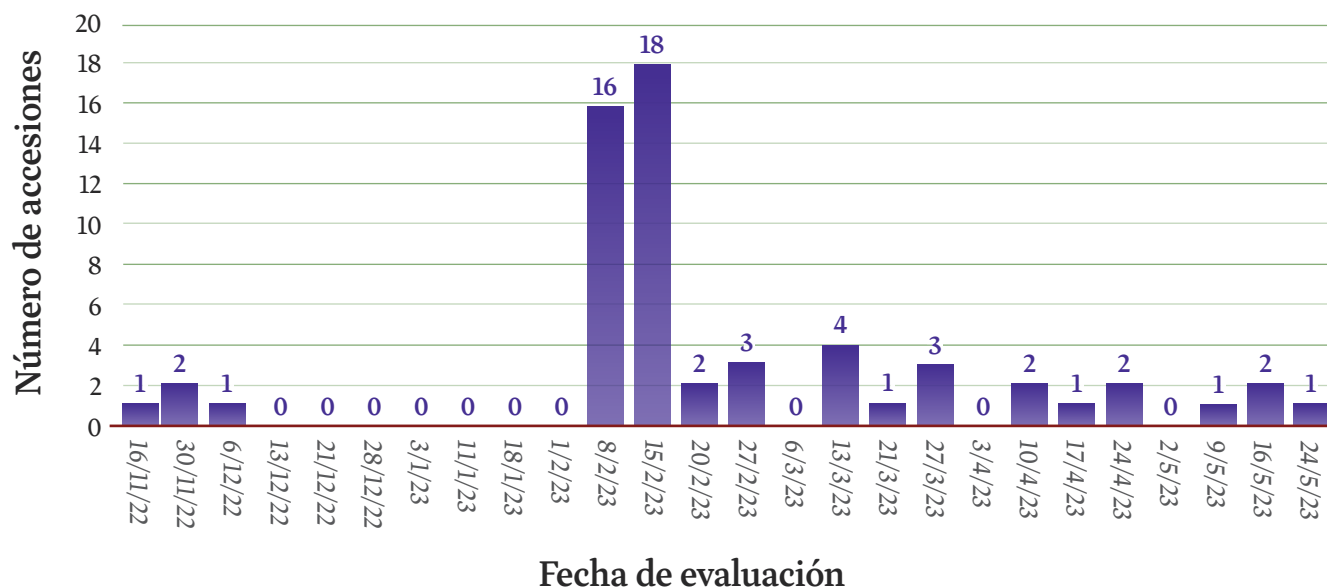


Figura 6.18. Expresión de síntomas de virus a través de 32 evaluaciones en 282 accesiones del género *Capsicum* bajo condiciones protegidas en el C. I. La Selva durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en la figura 6.19 se observa que 244 de las accesiones no presentaron síntomas compatibles con el daño asociado a microorganismos de origen viral, 24 de las accesiones los mostraron en una de

las evaluaciones, mientras que la mayor frecuencia de aparición fue en 4 de las evaluaciones, donde se reportaron 2 accesiones con síntomas de afectación por microorganismos de origen viral.

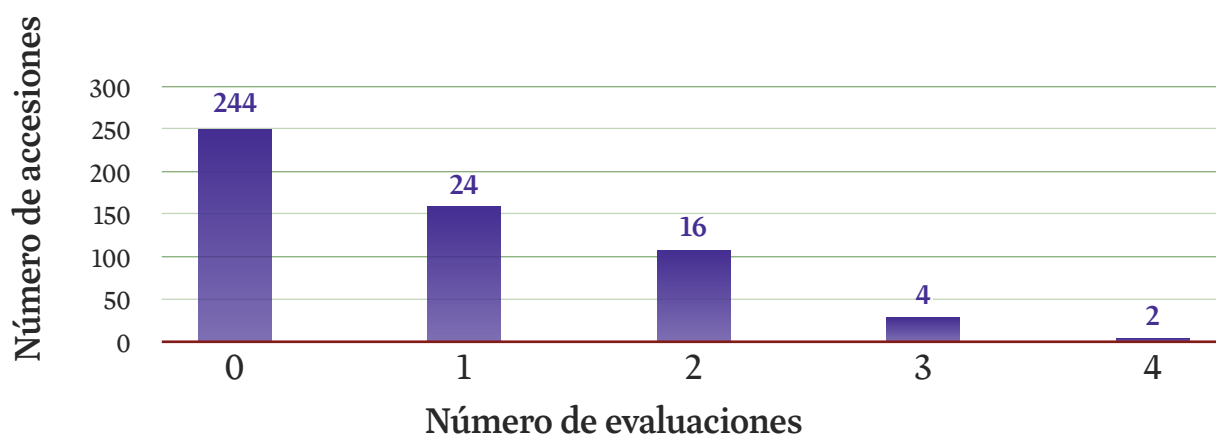


Figura 6.19. Número de accesiones por frecuencia de aparición de síntomas compatibles con infecciones virales en la colección de *Capsicum* spp. en el C. I. La Selva evaluadas bajo condiciones protegidas durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia



Foto: Nancy Johana Grisales-Vásquez

Manchas bacterianas

En *Capsicum* son diversos los síntomas y los daños de origen bacteriano que se reportan a nivel mundial. En este apartado se realiza una descripción de algunos de sus principales agentes causales; sin embargo, es de resaltar que en el trabajo de investigación se reportan los daños asociados a este grupo de patógenos, mas no se hace una identificación a nivel de laboratorio.

Los daños observados bajo condiciones protegidas en la colección de *Capsicum* son diversos. Entre ellos se encontraron: pudriciones de ápices (figura 6.20a), machas aceitosas con halos oscuros (figura 6.20b), lesiones acuosas con halos cloróticos y marchitamiento generalizado de la planta. Estos daños fueron aislados en laboratorio, donde se confirmaron como agente causal los patógenos de origen bacteriano, sin embargo, no fueron identificados.





a



b

Figura 6.20. Daños asociados a bacterias en accesiones de *Capsicum* spp. establecidas bajo condiciones protegidas en el C. I. La Selva durante 2022-2023.

Fotos: Nancy Yohana Grisales-Vásquez

Mancha bacteriana (*Xantomonas* spp.)

Los síntomas de la enfermedad se presentan principalmente en plantas adultas. En las hojas viejas aparecen lesiones irregulares en forma de pudriciones acuosas de color verde oscuro a negro. En condiciones de humedad relativa y temperaturas altas, las hojas enfermas eventualmente se vuelven amarillentas y empiezan a caer (Lopes & Henz, 2008).

En frutos se puede observar el crecimiento protuberante de puntos negros encerrados por un halo de apariencia acuosa. Cuando la enfermedad avanza, las lesiones crecen hasta formar pústulas; estas se

tornan de color marrón y eventualmente negro, con textura áspera. Por último, las lesiones se agrietan y el centro adquiere color gris (Rosa, 2005).

El patógeno ingresa a la planta a través de heridas ocasionadas por insectos, el viento o por aberturas naturales, como estomas, hidatodos y lenticelas. Aunque la infección es predominante en épocas de lluvia, debido a salpicaduras, calor acentuado o ventiscas, el rocío de la mañana es suficiente para que el proceso de infección se vea favorecido (Rosa, 2005).

Marchitez bacteriana (*R. solanacearum*)

La marchitez bacteriana es una importante patología en ambientes con alta temperatura y humedad relativa. Generalmente se expresa en la etapa de fructificación, cuando produce un marchitamiento generalizado que inicia por las hojas más jóvenes y que se agudiza en las horas más calurosas del día. Además, la enfermedad genera el necrosamiento del tejido vascular en tallos, donde se aprecia un color marrón al retirar la capa más externa del tejido (Lopes & Henz, 2008).

A pesar de que la bacteria no es transmisible mediante semilla, puede ingresar en el cultivo al emplear plántulas enfermas o agua de riego contaminada, así como por el transporte de suelo en maquinaria, en el calzado y por el uso de herramientas contaminadas (Lopes & Henz, 2008).

La severidad de la infección puede variar en función de la cepa, las condiciones ambientales y el material de siembra. En Colombia han sido reportadas como hospederas alternas arvenses como *Amaranthus dubius* Mart. (bledo), *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik. (bolsa de pastor, empanaditas), *Brassica rapa* L. (alpiste), *Chenopodium giganteum* D. Don. (cenizo rojo), *Chenopodium acuminatum* Willd. (paico), *Chenopodium petiolaris* Kunth (cenizo), *Datura stramonium* L. (chamico), *Erodium moschatum* (L.) L'Hér. (alfileres), *Galinsoga parviflora* Cav. (guasca), *Gnaphalium*

elegans H.B.K. (esponjilla o lanilla), *Hypochoeris radicata* L. (diente de león), *Lepidium bipinnatifidum* Desv. (mastuerzo), *Fuertesimalva peruviana* (L.) Fryxell (malva blanca), *Malva sylvestris* L. (malva morada), *Persicaria segetum* (Kunth) Small (gualola, barbasco), *Plantago rugelii* Decne. (llantén), *Rumex acetosella* L. (sangre de toro), *Rumex obtusifolius* L. y *Rumex crispus* L. (lenquevaca), *Senecio vulgaris* L. (cerrajilla), *Silene gallica* L. (cascabelito), *Solanum caripense* Humb. & Bonpl. ex Dunal. (llorones), *Solanum americanum* Mill. (yerba mora), *Sonchus oleraceus* L. (cerraja), *Spergula arvensis* L. (abrojito), *Schizotechium monospermum* (Buch.-Ham. ex D. Don.) Pusalkar & S. K. Srivast. (pajarera), *Verbena litoralis* Kunth (verbena), *Veronica persica* Poir. (violetilla), *Viola tricolor* L. (pensamiento), *Soliva anthemifolia* R. Br. (roseta) y *Jaegeria hirta* (Lag.) Less. (botón de oro) (Tamayo & Jaramillo, 2006).

A pesar de que hasta 2006, según Tamayo y Jaramillo (2006), no se conocían casos de infección en cultivos de pimentón en el país, en los últimos años, gracias a colectas desarrolladas por la Universidad Nacional de Colombia de plantas sintomáticas, se ha encontrado la enfermedad en zonas productoras de cultivos de ají y pimentón en el departamento del Valle del Cauca (Agencia de Noticias UNAL, 2017).





Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Pudrición blanda o tallo hueco (*Pectobacterium* spp.)

La enfermedad afecta tallos y frutos que presentan daños mecánicos por herramientas o insectos, generando pudrición de tejidos. Los puntos de la planta más susceptibles son aquellos en los cuales se produce estancamiento o acumulación de agua proveniente del ambiente, como en los brotes axilares del tallo o en la zona del pedúnculo en los frutos.

Cuando la enfermedad ataca el tallo, este se oscurece debido a la pudrición de la médula. En los frutos, se produce una pudrición blanda y de olor fétido, a nivel de campo y en poscosecha (Lopes & Henz, 2008).

En campo, la infección de los frutos comienza generalmente en el extremo que está más cercano a la planta, y pasa rápidamente al pedúnculo y al cáliz. Inicialmente, la infección presenta lesiones acuosas, deprimidas y arrugadas, con una ligera despigmentación de la zona afectada, y que se convierten en bolsas de agua a medida que avanza la enfermedad (Rosa, 2005).

La pudrición por *Pectobacterium* spp. es una enfermedad favorecida por lluvias constantes —debido a la salpicadura—, uso de herramienta contaminada, trabajos de poda y daños por insectos. En Colombia se reporta como una enfermedad de importancia económica en cultivos a campo abierto en los departamentos de Antioquia y Valle del Cauca (Tamayo & Jaramillo, 2006).

En la figura 6.21 se observa, en términos generales, durante todo el ciclo de observación de enfermedades, un aumento en la frecuencia de aparición de este daño en los meses de abril y mayo, en los cuales se presentó el mayor número de accesiones con presencia del síntoma. Así, se superaron las 50 accesiones afectadas en cada una de las evaluaciones realizadas en este periodo, y el día 9 de mayo llegaron a presentarse 155 accesiones afectadas, es decir, más del 50 % presentó síntomas de afectación por bacterias.

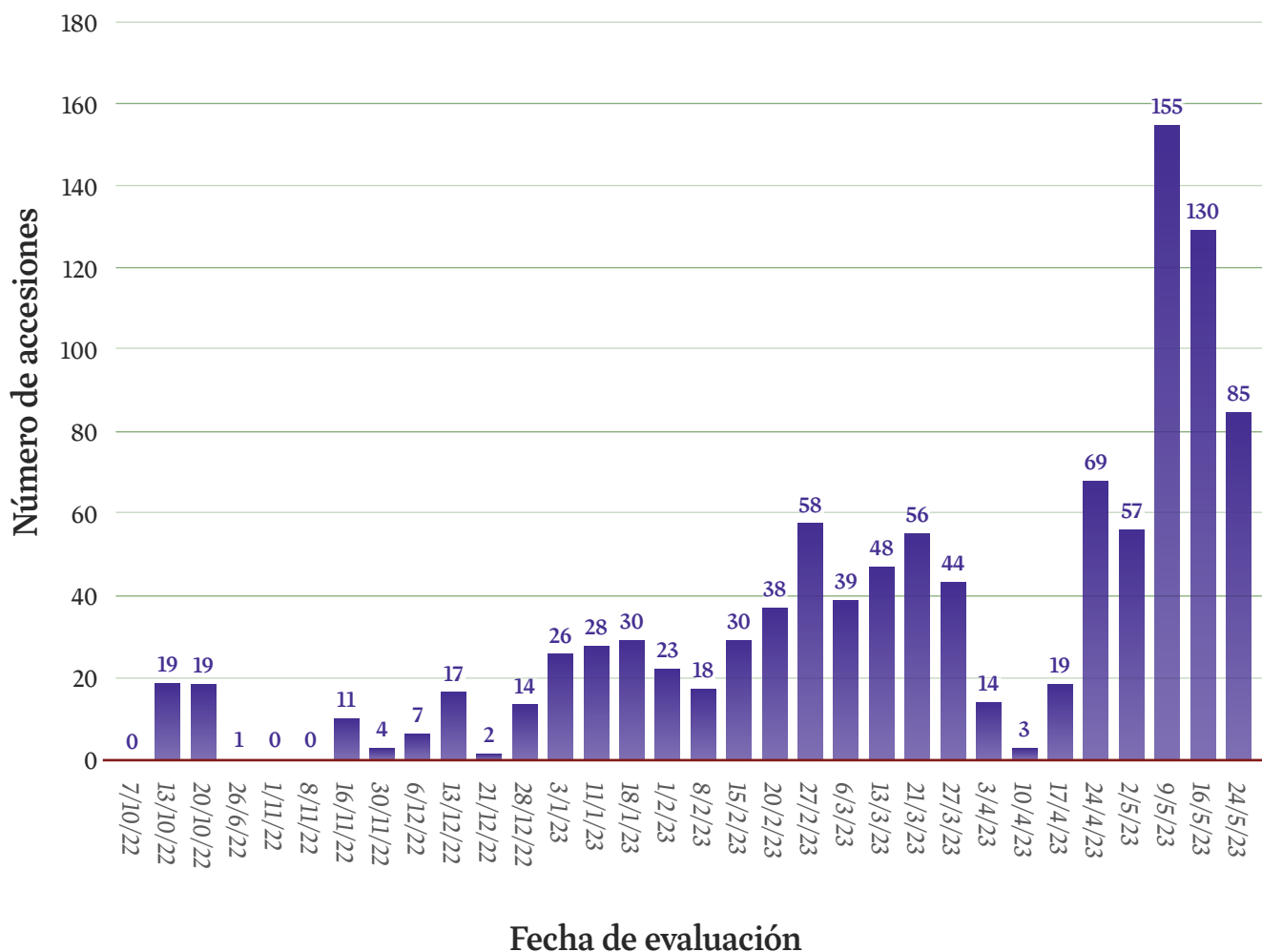


Figura 6.21. Expresión de síntomas del daño denominado mancha bacteriana a través de 32 evaluaciones en 282 accesiones del género *Capsicum* bajo condiciones protegidas en el C. I. La Selva durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, la figura 6.22 permite identificar que 54 de las accesiones no presentaron síntomas compatibles con este daño, de las cuales 7 no presentaron síntomas de mildew polvoso y 2 de estas (accesiones 26 y 103) no presentaron ningún tipo de afección asociada a microorganismo fitopatógeno, lo que podría significar que son accesiones con características de respuesta

sanitaria óptima para ser incluidas en futuros programas de mejoramiento genético de la especie, por respuesta de resistencia o tolerancia a los principales fitopatógenos que afectan el género. Sin embargo, se resalta que estos estudios deben ser realizados en diversos ambientes contrastantes que permitan confirmar la respuesta de las plantas a los patógenos.



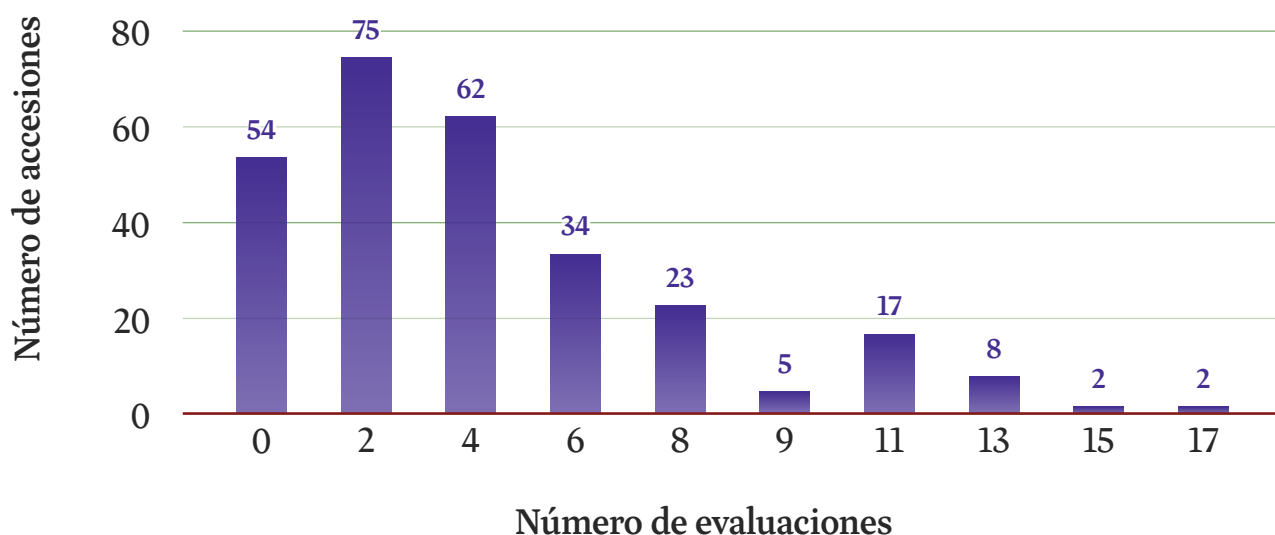


Figura 6.22. Número de accesiones por frecuencia de aparición del síntoma denominado mancha bacteriana en la colección de *Capsicum* spp. en el C. I. La Selva evaluadas bajo condiciones protegidas durante 2022-2023.

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Los síntomas que aparecieron con mayor frecuencia en la colección de *Capsicum* correspondieron a mildew polvoso y manchas bacterianas.

Los síntomas con expresión media en la colección de *Capsicum*, bajo las condiciones de invernadero en el C. I. La Selva, correspondieron a moho blanco, moho gris y virosis.

Por otro lado, los síntomas compatibles con ojo de sapo, antracnosis y alternaria fueron los que se presentaron con menor frecuencia en las evaluaciones.

Las accesiones 26 y 103 fueron las dos únicas que no presentaron ningún síntoma de daño compatible con alguno de los fitopatógenos asociados al cultivo.

Reflexión

Al igual que sucede con los insectos, es indispensable conocer los microorganismos asociados al *Capsicum* e identificar sus principales signos o síntomas en el cultivo, lo cual permite tomar decisiones a tiempo. Según el tipo de agente causal identificado, se pueden diseñar las estrategias de control más apropiadas de acuerdo con la etapa fenológica del cultivo, la época de aparición, las condiciones climáticas y los requerimientos de calidad del fruto, ya que el mercado de exportación para *Capsicum* tiene mayores exigencias sanitarias. Adicionalmente, conocer la dinámica y las condiciones que favorecen la diseminación del agente causal hace posible controlarlo con mayor eficacia y eficiencia. Finalmente, tener claridad respecto a los materiales de *Capsicum* más tolerantes o sensibles a las enfermedades ayuda a elegirlos o descartarlos en un proceso de selección con características de interés.

Referencias

- Agencia de Noticias UNAL. (2017). *Líneas élite de ají muestran tolerancia a enfermedades bacterianas*. Universidad Nacional de Colombia. <https://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/lineas-elite-de-aji-muestran-tolerancia-a-enfermedades-bacterianas>
- Agrios, G. N. (1997). *Plant pathology* (4.^a ed.). Lybrary of Congress.
- Ajithkumar K., Savitha, A. S., Biradar, S. A., Rajanna, B., & Ramesh, G. (2014). Management of powdery mildew and anthracnose diseases of chilli (*Capsicum annuum* L.). *Pest Management in Horticultural Ecosystems*, 20(1). 80-83. <https://agris.fao.org/search/en/providers/122535/records/65de5dbb0f3e94b9e5ce72f0>
- Arauz Cavallini, L. F. (2011). *Fitopatología: un enfoque agroecológico* (2.^a ed.). Universidad de Costa Rica.
- Asalmol, M. N., Kale, V. P., & Ingle, S. T. (2001). Seedborne fungi of chilli, incidence and effect on seed germination. *Seed Research*, 29, 76-79. <https://www.tib.eu/en/search/id/BLSE:RN104974030/Seedborne-Fungi-of-Chilli-Incidence-and-Effect?cHash=d6ab0fecc89d1d5b15a67b7eb91cb607>
- Bae Y. S. & Knudsen G. R. (2007). Effect of sclerotial distribution pattern of *Sclerotinia sclerotiorum* on biocontrol efficacy of *Trichoderma harzianum*. *Applied Soil Ecology*, 35(1), 21-24. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.05.014>
- Barnett, H. L., & Hunter, B. B. (1998). *Illustrated genera of imperfect fungi* (4.^a ed.). The American Phytopathology Society.
- Blazquez, C. H. (1976). A powdery mildew of chilli caused by *Oidiopsis* sp. *The American Phytopathology*, 66, 1155-1157. <https://www.apsnet.org/PUBLICATIONS/PHYTOPATHOLOGY/BACKISSUES/1976/Pages/Number10.aspx>

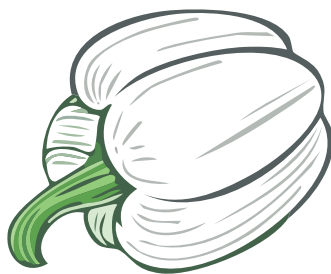


- Bolton, M. D., Thoma, B. P. H. J., & Nelson, B. D. (2006). *Sclerotinia sclerotiorum* (Lib.) de Bary: biology and molecular traits of a cosmopolitan pathogen. *Molecular Plant Pathology*, 7(1), 1-16. <https://doi.org/10.1111/J.1364-3703.2005.00316.X>
- Devappa, V., & Thejakumar, M. B. (2016). Integrated management of chilli leaf spot caused by *Alternaria alternata* and *Cercospora capsici* under field conditions. *International Journal of Advanced Research*, 4, 1468-1474. <https://www.journalijar.com/article/9266/integrated-management-of-chilli-leaf-spot-caused-by-alternaria-alternata-and-cercospora-capsici-under-field-conditions/>
- Droby, S., & Lichter, A. (2007). Post-harvest botrytis infection: etiology, development and management. En Y. Elad, B. Williamson, P. Tudzynski, & N. Delen (Eds.), *Botrytis: biology, pathology and control*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2626-3_19
- Ellis, M. B. (1971). *Dematiaceous hyphomycetes*. Commonwealth Mycological Institute. <https://www.cabdigitallibrary.org/doi/book/10.1079/9780851986180.0000>
- Huaman Pilco, A. F., Chichipe Vela, I., Calderón Ordóñez, E., Leiva Espinoza, S. T., & Oliva, M. (2019). Diagnóstico de plagas y enfermedades de cinco genotipos de ajíes (*Capsicum* spp.) en invernadero. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 3(3), 1-8. <https://revistas.untrm.edu.pe/index.php/INDESPOS/article/view/475>
- Hussain, F., & Abid, M. (2011). Pests and diseases of chilli crop in Pakistan: a review. *International Journal of Biology and Biotechnology*, 8(2), 325-332. <https://ijbbku.com/assets/custom/journals/2011/2/PESTS%20AND%20DISEASES%20OF%20CHILLI%20CROP%20IN%20PAKISTAN%20A%20REVIEW.pdf>
- Jeon, Y. J., Kwon, H. W., Nam, J. S., & Kim, S. H. (2006). Characterization of *Sclerotinia sclerotiorum* isolated from paprika. *Mycobiology*, 34(3), 154-157. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24039491/>
- Jiménez-Pérez, O., Gallegos-Morales, G., Espinoza-Ahumada, C. A., Delgado-Luna, C., Preciado-Rangel, P., & Espinosa-Palomeque, B. (2024). Potential of chitosan for the control of powdery mildew (*Leveillula taurica* (Lév.) Arnaud) in a jalapeño pepper (*Capsicum annuum* L.) cultivar. *Plants*, 13(7), 915. <https://doi.org/10.3390/plants13070915>
- Kamara, A., El-Argawy, E., El-Korany, A., & Amer, G. (2016). Potential of certain cultivars and resistance inducers to control gray mould (*Botrytis cinerea*) of pepper (*Capsicum annuum* L.). *African Journal of Microbiology Research*, 10(45), 1926-1937. <https://academicjournals.org/journal/AJMR/article-abstract/F2D0F7F61927>
- Karkanis, A., Bilalis, D., Efthimiadou, A., & Katsenios, N. (2012). Effects of field bindweed (*Convolvulus arvensis* L.) and powdery mildew (*Leveillula taurica* (Lev.) Arn.) on pepper growth and yield - Short communication. *Horticultural Science*, 39(3), 135-138. <https://ideas.repec.org/a/caa/jnlhor/v39y2012i3id213-2011-hortsci.html>
- Khalid, I., Riasat, H., Khan, M. J., Tariq, A., Abbas, A., & Arif, M. U. (2021) Isolation, identification and management of fungal pathogen responsible for chilli leaf spot disease. *Life Science Journal*, 18(11), 42-66. <https://doi.org/10.7537/marslsj181121.05>

- Kiran, R., Akhtar, J., Kumar, P., & Shkhar, M. (2020). Anthracnose of chilli: status, diagnosis and management. En A. Dekebo (Ed.), *Capsicum* (pp. 27-42). IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.87455>
- Kusch, S., Németh, M. Z., Vaghefi, N., Ibrahim, H. M. M., Panstruga, R., & Kiss, L. (2020) A short-read genome assembly resource for *Leveillula taurica* causing powdery mildew disease of sweet pepper (*Capsicum annuum*). *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 33(6), 782-786. <https://doi.org/10.1094/MPMI-02-20-0029-A>
- Li, Y., Zhang, D., Xu, W., Wu, Z., Guo, M., & Cao, A. (2011). *Alternaria tenuissima* causing leaf spot and fruit rot on pepper (*Capsicum annuum*): first report in China. *New Disease Reports*, 24(1), 2044-0588. <https://bsppjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.5197/j.2044-0588.2011.024.003>
- McDougall, S., Watson, A., Stodart, B., Napier, T., Kelly, G., Troidahl, D., & Tesoriero, L. (2013). *Tomato, Capsicum, chilli and eggplant: a field guide for the identification of insect pests, beneficials, diseases and disorders in Australia and Cambodia*. Australian Centre for International Agricultural Research. https://www.aciar.gov.au/sites/default/files/legacy/teccipm-14-web-04-18dec13_.pdf
- Mukhtar, T., Vagelas, I., & Javaid, A. (2023). Editorial: new trends in integrated plant disease management. *Frontiers in Agronomy*, 4. <https://doi.org/10.3389/fagro.2022.1104122>
- Nageswararao Naik, B. N., Malmathanraj, R., & Palanisamy, P. (2022). Detection and classification of chilli leaf disease using a squeeze-and-excitation-based CNN model. *Ecological Informatics*, 69, 101663. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101663>
- Oo, M.M., y Oh, S.-K. (2016). Chilli anthracnose (*Colletotrichum* spp.) disease and its management approach. *Korean Journal of Agricultural Science*, 43, 153-162. <http://dx.doi.org/10.7744/kjoas.20160018>
- Ordóñez-Valencia, C., Ferrera-Cerrato, R., Alarcón, A., Hernández-Cuevas, L. V., & Larsen, J. (2018). Desarrollo morfológico temprano de esclerocios por *Sclerotinia sclerotiorum* en presencia de bicarbonato de potasio. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 36(3), 363-378. <https://www.redalyc.org/journal/612/61257782001/html/>
- Palma-Martínez, E., Aguilar-Rincón, V. H., Corona-Torres, T., & Gómez-Rodríguez, O. (2017). Resistencia a *Phytophthora capsici* Leo. en líneas de chile Huacle (*Capsicum annuum*, L.). *Revista Fitotecnia Mexicana*, 40(3), 359-363. <https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/40-3/13a.pdf>
- Polat, İ., Baysal, Ö., Mercati, F., Gümrükcü, E., Sülü, G., Kitapçı, A., Araniti, F., & Carimi, F. (2018). Characterization of *Botrytis cinerea* isolates collected on pepper in Southern Turkey by using molecular markers, fungicide resistance genes and virulence assay. *Infection, Genetics and Evolution*, 60, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.meegid.2018.02.019>
- Lopes, C. A., & Henz, G. P. (2008). Doenças e métodos de controle. En C. S. da C. Ribeiro, C. A. Lopes, S. I. Costa de Carvalho, G. P. Henz, & F. J. B. Reifschneider (Eds.), *Pimentas 'Capsicum'* (pp. 109-126). Embrapa Hortaliças. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/781198/1/Pimentas-Capsicum.pdf>
- Rivera-Toro, D. M., Vaca-Vaca, J. C., & López-López, K. (2020). Detection and molecular characterization of the cucumber mosaic virus in chili pepper (*Capsicum* spp. L.) crops. *Agronomía Colombiana*, 38(2), 218-225. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v38n2.82975>



- Romanazzi, G., & Feliziani, E. (2014). *Botrytis cinerea* (Gray Mold). En S. Bautista-Baños (Ed.), *Postharvest decay: control strategies* (pp. 131-146). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411552-1.00004-1>
- Rosa, E. (2005). Enfermedades. En *Conjunto tecnológico para la producción de pimiento: tipos “cubanelle” y “campana”*. Universidad de Puerto Rico, Colegio de Ciencias Agrícolas.
- Rugeles, L., Ávila, J., Morales, A., Huertas, A., Guaitero, B., & Bonilla, C. (2010). *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena de hortalizas en Colombia: salsa de ají*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/fa209c8e-7077-4ddb-ad85-25384fa97473/content>
- Salam, R., Kripalini, N., Imotomba, S., Supriya, L., & Bumpy, K. (2022). Studies on leaf spot of chilli caused by *Cercospora capsici* and its management in Manipur. *The Pharma Innovation Journal*, SP-11(7), 4363-4374. <https://www.thepharmajournal.com/archives/2022/vol11issue7S/PartAY/S-11-7-461-758.pdf>
- Sutton, B. (1980). *The Coelomycetes: fungi imperfect with pycnidia acervuli and stroma*. Commonwealth Mycological Institute. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19801366283>
- Tamayo, P. J., & Jaramillo, J. (2006). *Enfermedades del tomate, pimentón, ají y berenjena en Colombia. Guía para su diagnóstico y manejo*. Corpoica. <https://repository.agrosavia.co/items/126cf006-37e9-4bc0-a029-06d696ca853f>
- Thangjam, B., Chanu, W. T., & Mayanglambam, B. (2020). Fungal diseases of chilli and their management. *AgriCos e-Newsletter*, 1(03), 47-49. https://www.agricosemagazine.com/_files/ugd/93e822_e1af0fb4d3dc45e6956c4f817219bcf2.pdf?index=true
- Vaca-Vaca, J. C., Morales-Euse, J., Rivera-Toro, D. M., & López-López, K. (2019). Primer reporte de begomovirus infectando cultivos de ají (*Capsicum* spp.) en Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 24(3), 452-462. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n3.79367>
- Wang, L., Hu, J., Li, D., Reymick, O. O., Tan, X., & Tao, N. (2022). Isolation and control of *Botrytis cinerea* in postharvest green pepper fruit. *Scientia Horticulturae*, 302, 111159. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111159>







Título de la obra

Atributos de calidad nutricional y agroindustrial

Técnica

Ilustración digital con tableta, pincel en
textura de carboncillo

Autora

Laura Stefanny López Cortés (Sstefcore)



@sstefcore



Stefanny López

- Capítulo VII -

Atributos de calidad nutricional y agroindustrial de los ajís en Colombia: descripción de la diversidad fisicoquímica de frutos de *Capsicum* spp. provenientes del BGV

Esteban Castaño Llanos, Jaison Martínez Saldarriaga, Gleyder Yeraldín Bedoya Vélez,
Maira Alejandra Vega Muñoz, Juan Camilo Henao Rojas,
Guillermo León Montoya Peláez

Este capítulo presenta la caracterización fisicoquímica de 245 genotipos de *Capsicum* spp. pertenecientes al banco de germoplasma de la Nación, con el propósito de evaluar su aptitud agroindustrial. Mediante un análisis de agrupamiento K-means, se identificaron 12 categorías con propiedades homogéneas, definidas a partir de variables como pH, sólidos solubles, materia seca y parámetros de textura. Los frutos analizados mostraron un pH ligeramente ácido (4,5-5,5), contenidos de sólidos solubles entre 5,3 y 12,9 °Brix y porcentajes de materia seca del 7,8 al 20,5 %. Las pruebas de textura registraron niveles de firmeza de hasta 1.970 g y consistencias de

3.175 g/s, asociadas a la presencia de polisacáridos estructurales. Se cuantificaron carotenoides totales de hasta 18,47 mg/g y capsaicinoides de hasta 1.260 ppm, equivalentes a niveles de picor superiores a 100.000 unidades Scoville. Estos perfiles permiten definir usos comerciales específicos: el grupo 7 es idóneo para condimentos en polvo por su alta firmeza, mientras que los grupos 2, 8 y 10 destacan para la extracción de colorantes y la producción de salsas por su elevada consistencia y pigmentación. En conjunto, esta diversidad genética constituye un recurso estratégico para la innovación en las industrias alimentaria, farmacéutica y agrícola nacional.





Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Introducción

En el amplio universo de la agricultura, los pimientos y ajís del género *Capsicum* spp. se destacan como elementos emblemáticos de una riqueza biológica sin precedentes. En este capítulo se ofrecerá información sobre la diversidad fisicoquímica de los frutos provenientes de la colección de germoplasma de AGROSAVIA. Con una perspectiva holística, se explorarán los atributos que definen la calidad nutricional y agroindustrial de este género. También se abordará la importancia vital de la seguridad alimentaria y la calidad nutricional en su producción y comercialización. En estas páginas se invita a descubrir la diversidad agrícola colombiana que cobra vida a través del lente de la investigación.



Foto: Esteban Castaño Llanos

Calidad y nutrición

En la era moderna, el conocimiento y el deseo de los consumidores por adquirir alimentos de mayor nutrición y estética han experimentado un apreciable aumento. En este contexto, surgen dos requisitos fundamentales que deben seguirse para su comercialización: seguridad y calidad (Hew et al., 2024). La seguridad alimentaria implica que todas las personas tengan acceso físico y económico a suficiente alimento inocuo y nutritivo para satisfacer sus necesidades y preferencias nutricionales con miras a una vida activa y saludable. Por otro lado, cuando se habla de calidad alimentaria, se hace referencia a las características físicas, químicas y microbiológicas que afectan el valor nutricional y la aceptabilidad por parte del consumidor (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO, por su sigla en inglés], 2011). Es así como, bajo estas dos premisas, la seguridad alimentaria, sus prácticas y principios siempre estarán ligadas al aseguramiento de la calidad de los alimentos (Gordillo & Méndez Jerónimo, 2013; Hew et al., 2024).

Por lo anterior, hablar de calidad en este escenario implica entender que cada alimento posee características distintivas en sabor, textura, apariencia y nutrición, que contribuyen a la aceptabilidad por parte de los consumidores. No obstante, la composición química de los alimentos o de sus productos derivados es la principal característica que los distingue. Esta composición es el resultado de numerosos y diversos compuestos, cada uno con propiedades únicas (Ali et al., 2023). Estas pueden ser sustancias como proteínas, lípidos, carbohidratos, aminoácidos, metabolitos, vitaminas, minerales, entre otras (De Man et al., 2018; Granato et al., 2011; Pace et al., 2020). Por eso, conocer, identificar y conservar esta composición química es de suma importancia para asegurar la calidad de los alimentos en el tiempo.

Existen diversos aspectos que definen la calidad de estos: lo higiénico y lo sanitario; la inocuidad; la calidad bromatológica; las propiedades nutricionales y su composición química, y la calidad sensorial u organoléptica, por ejemplo, son algunos ti-

pos de calidad en lo que concierne a los alimentos. La calidad abarca una gran variedad de aspectos, incluyendo seguridad higiénica y sanitaria, inocuidad, composición bromatológica, propiedades nutricionales, así como perfil sensorial y organoléptico. Estos son solo algunos ejemplos de los diferentes aspectos que contribuyen a la calidad de la comida (Prieto et al., 2008; Ali et al., 2023). Cada alimento puede describirse mediante variables físicas, químicas y microbiológicas que, según la percepción y las preferencias del consumidor, se traducen en características o atributos de calidad. Es imprescindible para las industrias comprender la relación entre las propiedades de lo que se consume, evaluadas a través de las diferentes variables, y los atributos de calidad percibidos. De esta manera, un conocimiento adecuado de estas propiedades y de sus valores mínimos permitiría incorporar los atributos de calidad deseados al producto final, gestionando los procesos de la cadena alimentaria (Prieto et al., 2008). En el contexto actual, se ha observado un aumento en la demanda de productos alimenticios que, además de cumplir con los estándares de calidad anteriormente mencionados, posean cualidades biofuncionales. Esto se debe a que las personas son cada vez más conscientes de los posibles efectos sobre la salud que posee el consumo de la comida adecuada (Tripathy et al., 2023). Por consiguiente, los alimentos biofuncionales han ganado popularidad, ya que dentro de su composición química se encuentran minerales, vitaminas, carotenoides, antioxidantes

y fitoesteroides, los cuales son funcionales y beneficiosos para la salud (Hew et al., 2024; Ahmad et al., 2019; Balahbib et al., 2021; Hassan et al., 2019; Karaman et al., 2023; Średnicka-Tober et al., 2022). Al analizar la diversidad de los cultivares de los ajís y pimentones, es evidente que sus características morfológicas, como el tamaño, la forma y el color, son criterios fundamentales para su clasificación. Sin embargo, la calidad de estos frutos va más allá de su apariencia externa. En particular, el color, la pungencia y el sabor son aspectos cruciales que no solo definen la aceptabilidad del consumidor, sino que también revelan la presencia de compuestos bioactivos cruciales para la salud. Entre estos compuestos se encuentran los carotenoides, los capsaicinoides y otros metabolitos volátiles responsables de los atributos sensoriales distintivos del ají (Hassan et al., 2019). La amplia variedad de fitoquímicos presentes en estos frutos, como flavonoides, vitaminas, terpenos y polifenoles, influye tanto en sus cualidades organolépticas como en su valor nutricional (Cervantes-Hernández et al., 2019). Esta relación entre los metabolitos y las características del ají resalta la importancia de comprender su composición química y sus propiedades funcionales, en la búsqueda de alimentos de alta calidad y valor nutricional.

El color, por ejemplo, que desempeña un papel crucial en la calidad del ají, está estrechamente relacionado con el contenido de pigmentos presente en sus tejidos. Entre estos pigmentos, los

Foto: Esteban Castaño Llanos



carotenoides son especialmente relevantes, ya que son los responsables de dar el característico rojo a muchos productos alimenticios. Por ejemplo, xantofilas, como la capsantina y la capsorubina, pertenecientes a los carotenoides, predominan como moléculas responsables del tono rojo en los ajís (Alamu et al., 2023; Hassan et al., 2019). Además, existen otros carotenoides, como el β -caroteno y la zeaxantina, relacionados con las tonalidades naranjas, mientras que la luteína y la violaxantina se relacionan con tonalidades amarillas. Además de su contribución al color, los carotenoides poseen propiedades nutricionales y farmacológicas significativas. Se ha demostrado que tienen efectos antioxidantes, neuroprotectores, cardioprotectores y beneficios para la salud visual (Li et al., 2024). Debido a estas cualidades, los carotenoides están ganando interés en diferentes áreas de investigación, por ejemplo, en la formulación de colorantes alimentarios y como suplemento en alimentación animal (Abd El-Hack et al., 2022; Alamu et al., 2023).

Los capsaicinoides, al igual que los carotenoides, juegan un papel crucial en la composición y características del ají. Sus dos moléculas principales son la capsaicina y la dihidrocapsaicina, que constituyen la mayoría de los capsaicinoides presentes en el fruto y que son las responsables de su característica pungencia, de manera que producen una sensación de calor o picor al ser consumidas, a diferencia de los capsinoides, que se encuentran en los pimientos dulces del género *Capsicum* y no

producen esta sensación. El capsiato y el dihidrocapsiato son los dos principales análogos de los capsinoides (Cervantes-Hernández et al., 2019). La influencia de los capsaicinoides en mamíferos es notable debido a su interacción con los receptores nerviosos denominados TRPV1, localizados en las terminaciones de las fibras nerviosas mediadoras del dolor y presentes en la lengua y el intestino, tanto grueso como delgado. Estos receptores, además de transmitir el dolor, desempeñan un papel importante en el control del peso corporal, lo que hace que los capsaicinoides tengan aplicaciones médicas significativas. Por un lado, se utilizan como tratamiento para modular el dolor neuropático y actúan reduciendo la sustancia P en la sangre, para aliviar el dolor en pacientes afectados. Por otro lado, moléculas como la capsaicina y su análogo, el capsiato, influyen en el metabolismo humano estimulando la secreción de hormonas como las catecolaminas, lo que promueve la reducción del tejido adiposo: mediante el aumento del consumo de oxígeno, la oxidación de lípidos genera una sensación de saciedad y aumenta, en consecuencia, el gasto energético (García Fernández, 2018).

Otro ejemplo de compuestos químicos de interés en los ajís son los fenólicos, que presentan una gran variedad en términos de solubilidad, polaridad y estructura. Sin embargo, su cualidad más relevante es su fuerte actividad antioxidante, por la cual pueden proteger al cuerpo de enfermedades provocadas por el estrés oxidativo (Vaz et al., 2022).

Esto se debe a que ciertos trastornos se encuentran relacionados con la edad y pueden ser provocados por radicales libres, lo que implica la generación de estrés oxidativo y, por ende, una oxidación de los componentes celulares. En este caso, los antioxidantes y, en especial, este grupo de moléculas protegen al organismo al neutralizar o eliminar estas especies reactivas (Granato et al., 2011).

Las dietas ricas en vegetales se han relacionado con un menor riesgo de desarrollar algunas enfermedades, como diabetes, cáncer, padecimientos cardiovasculares y problemas neurológicos y cognitivos. Estos impactos en la salud están relacionados con la cantidad de sustancias bioactivas en los alimentos, particularmente los compuestos fenólicos (Neis et al., 2022). En el ají es posible encontrar el ácido p-cumárico, el ácido ferúlico, la miricetina, la luteolina y la quercetina, que son los principales compuestos presentes en el género *Capsicum* (Karaman et al., 2023; Sutliff et al., 2021).

Estos beneficios para la salud, relacionados con la diversidad química de los ajís, confirman los efectos nutraceuticos que posee su consumo o, en pocas palabras, hacen referencia a esa calidad biofuncional, innata de estos frutos. De hecho, existen diversos estudios clínicos que soportan las propiedades de los ajís y sus efectos en el cuerpo. Un ejemplo son los trabajos relacionados con tratamientos contra dolores crónicos causados por diferentes enfermedades. En este

caso, el compuesto activo presente es la capsaicina, el cual ha sido incluido en formulaciones tópicas para el tratamiento de afecciones como la neuropatía diabética dolorosa, la neuropatía por VIH y la neuralgia posherpética. De hecho, la capsaicina tópica en altas concentraciones (8 al 10 %) tiene efectos comparables a los de otros tratamientos tradicionales para el dolor crónico (Derry et al., 2013). En la misma línea de aplicaciones médicas, existen estudios relacionados con la creación y aplicación de parches tópicos terapéuticos con presencia de capsaicina (8 %) para el tratamiento de dolor crónico, los cuales han sido utilizados en terapias similares a las mencionadas anteriormente. En la actualidad, se adelantan ensayos enfocados en la evaluación de la eficacia de estos parches en el tratamiento del dolor neuropático periférico de pacientes con cáncer, es decir, del dolor causado por tratamientos anticancerígenos comunes, como la radiación, la quimioterapia y la cirugía (Morisson, 2022), y también como terapia médica para el tratamiento del dolor en el pecho causado por isquemia miocárdica (Menzies, 2021).

Otro ejemplo de desarrollos clínicos en relación con los ajís son los estudios que se adelantan referentes a la ingesta de carotenoides o la inclusión de estos en la alimentación, los cuales, gracias a sus propiedades antioxidantes, y en especial al β -caroteno como precursor de la vitamina A, poseen un rol importante en la dieta hu-



mana. Es el caso del estudio clínico desarrollado por Moran (2024), en el que se pretende comprender el efecto de la ingesta de carotenoides en la nutrición durante el embarazo y cómo puede mejorar la comprensión de las necesidades nutricionales de las mujeres embarazadas y sus bebés, a través de mediciones de carotenoides en los ojos, la piel y la sangre en diferentes etapas del embarazo, debido a que estos pueden combatir la inflamación e incluso pueden beneficiar la memoria y la capacidad de pensamiento.

La búsqueda de alimentos de calidad y con valor nutricional se ha convertido en prioridad en la era moderna, en la cual la seguridad alimentaria y la calidad intrínseca son requisitos fundamentales para su comercialización. Comprender las interacciones entre la composición química de los alimentos y sus propiedades funcionales es esencial para garantizar su calidad y utilidad. En este sentido, los ajís representan un caso de estudio interesante, pues su diversidad química y sus beneficios a la salud ofrecen oportunidades en diferentes industrias. En este contexto, los estudios fisicoquímicos proporcionan información valiosa sobre las características de estos frutos y su impacto comercial. Así, al entender sus características fisicoquímicas y su relación con la calidad es posible apreciar cómo la ciencia alimentaria ofrece una comprensión más profunda de los alimentos, así como herramientas para seleccionar los frutos con mayor potencial comercial.



Foto: Esteban Castaño Llanos

Diversidad fisicoquímica

Se ha observado que algunos ajís tienen un sabor más fresco que otros. Esto se explica a través de la ciencia detrás de los alimentos, específicamente, mediante las características fisicoquímicas, las cuales permiten medir, en estos y en otros alimentos, su nivel de calidad y deseabilidad, que se establece según determinados rasgos:

» **Humedad:** indica la cantidad de agua presente en los frutos, siendo el opuesto directo de la materia seca.

» **Sólidos disueltos:** también conocidos como grados Brix, están relacionados con la dulzura de los frutos y abarcan una amplia gama de compuestos, incluyendo azúcares, flavonoides o ácidos que afectan el sabor del ají.

» **pH:** proporciona información sobre la seguridad alimentaria del ají y también afecta la percepción del sabor en la boca.

» **Color:** para la colorimetría, la percepción del color puede ofrecer información sobre algunos compuestos presentes en el fruto y sobre su grado de madurez.

» **Textura:** es la sensación táctil que se obtiene al comer el producto, que puede variar entre lo suave y lo jugoso, o entre lo duro y lo fibroso, y que está asociada a las moléculas presentes en aquel.

Al comprender estas características, es posible evaluar la calidad de los frutos y elegir aquellos con mayor impacto comercial. Para entender mejor estos parámetros fisicoquímicos se llevan a cabo estudios en diversos lugares del mundo, donde se ofrecen los productos en diferentes presentaciones, como deshidratados, en pasta o en polvo, y se evalúa cómo esto afecta la calidad durante su procesamiento y almacenamiento, lo que permite tener un control en su comercialización (Joshi et al., 2017, Mi et al., 2023, Woldemariam et al., 2021).

Por ende, velando por la seguridad alimentaria, y con el objetivo de encontrar frutos de ají con características diferenciales que permitan incursionar en el mercado con competencias específicas de agronomía, se ha llevado a cabo un estudio que involucró todos los genotipos del género *Capsicum* bajo custodia de AGROSAVIA, y se estableció un umbral del peso del fruto mayor a un gramo para considerarlo apto agroindustrialmente.

Se caracterizaron 245 pastas de ají de acuerdo con el pH, los sólidos solubles, la materia seca, la firmeza, la consistencia, la cohesión entendida como la fuerza de los enlaces internos que mantienen la integridad del alimento y el trabajo de cohesión que define área bajo la curva del segundo ciclo de compresión, cuantificando la energía necesaria para vencer dichas fuerzas internas. También se consideraron parámetros de colorimetría triestímulo que permitieron obtener un pseudocolor para cada una. A partir de estas, se realizó una correlación de Spearman al 5 % de significancia, con la que se descartaron variables que tuvieran una correlación dependiente. A partir de las variables resultantes se realizó un análisis de agrupamiento por el método *K-means*, por el cual se encontró la presencia de 12 tipos de ají con características fisicoquímicamente homogéneas y diferencias significativas entre ellos. Este flujo de proceso estadístico puede verse en la figura 7.1.



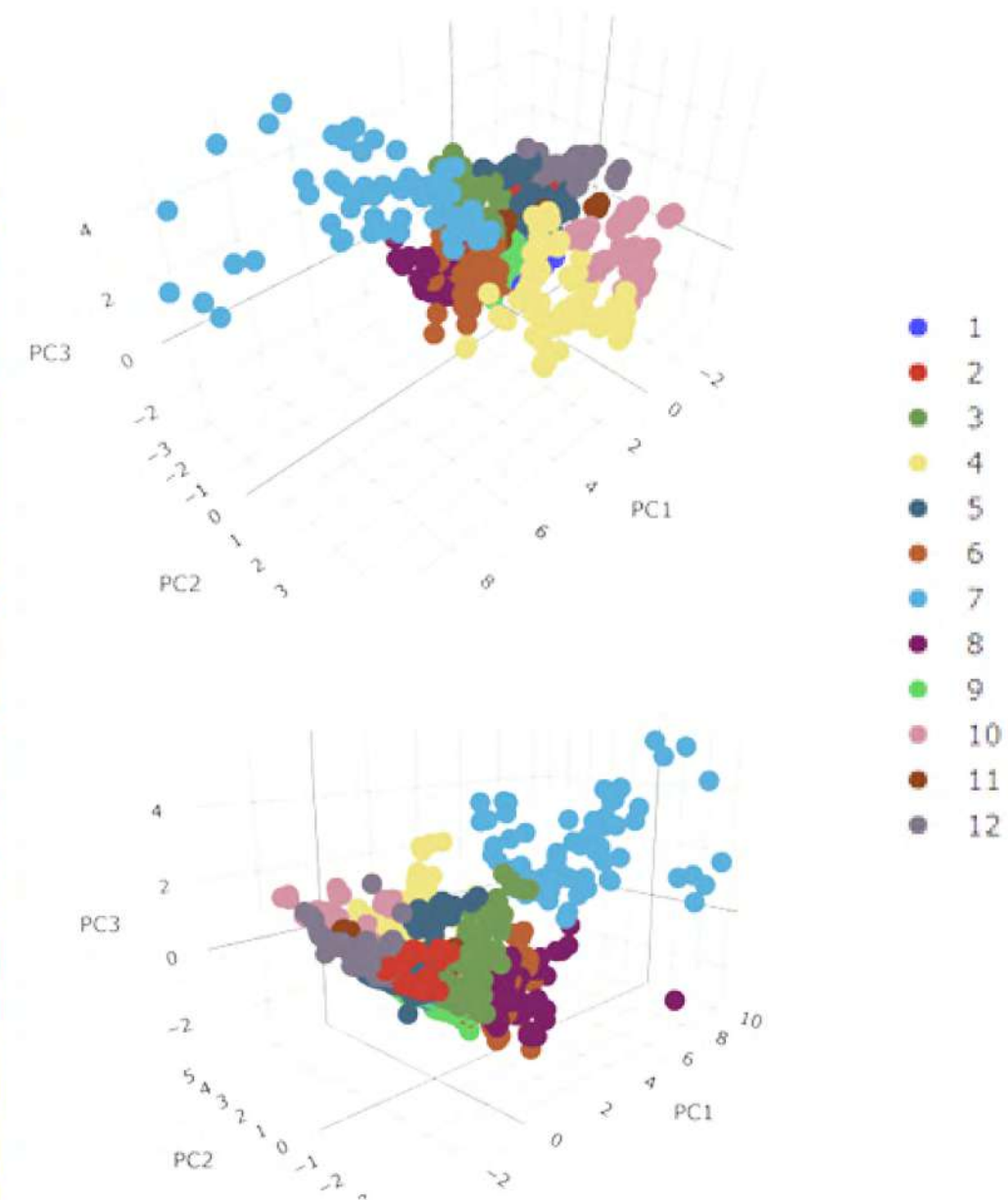
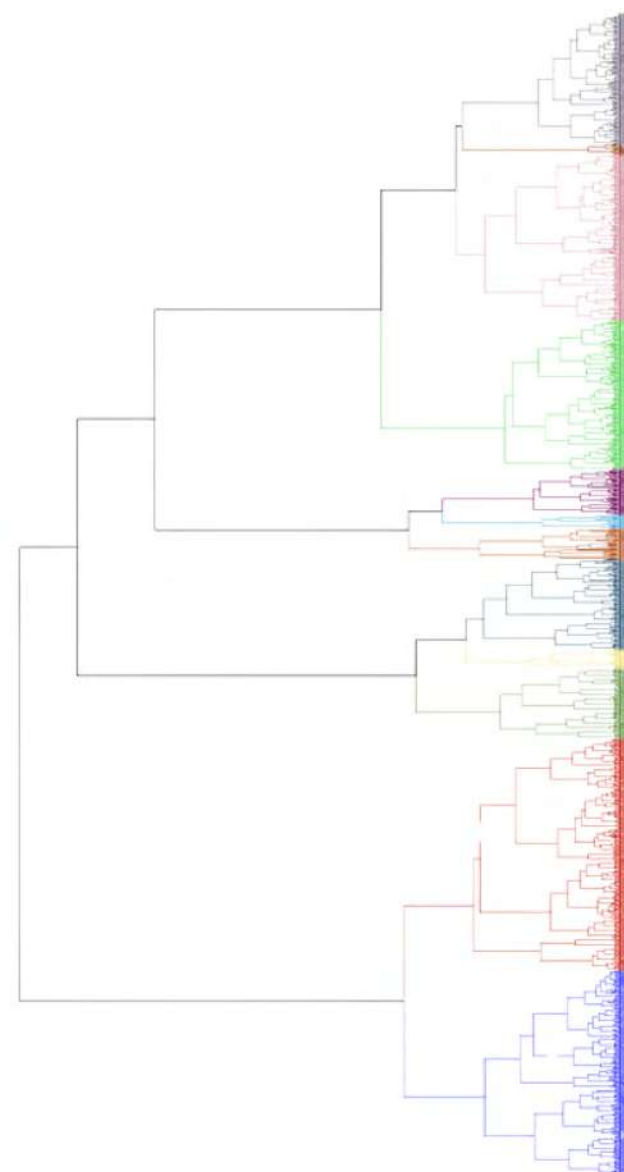
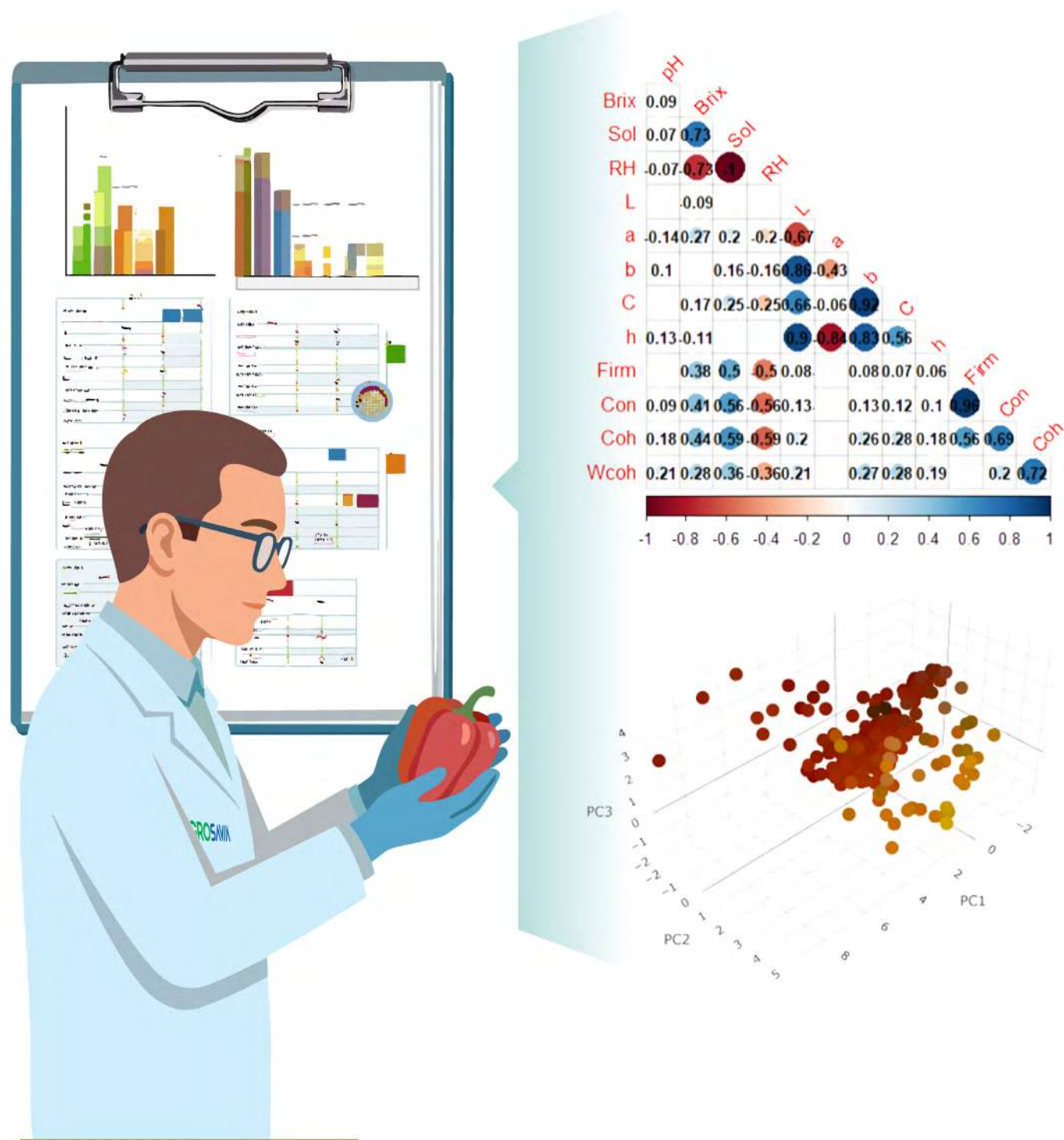


Figura 7.1. Resultados del análisis estadístico para la identificación del número de tipos de ají.

Fuente: Elaboración propia

A partir de estos 12 tipos, se seleccionaron aleatoriamente múltiples frutos de estos grupos para comprender su contenido de carotenoides y capsaicinoides, los cuales están directamente relacio-

nados con el potencial antioxidante y la pungencia, respectivamente. En las figuras 7.2 a 7.13 se puede observar el comportamiento de estos grupos y el pseudocolor que los identifica.

Grupo 1

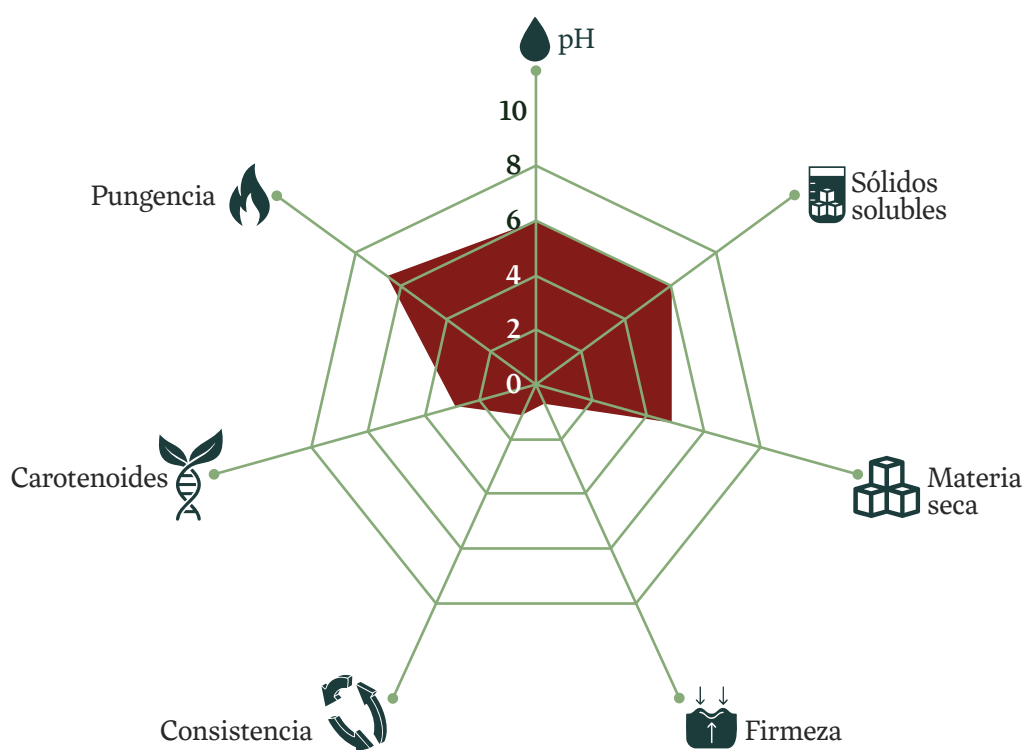


Figura 7.2. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 1.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 2

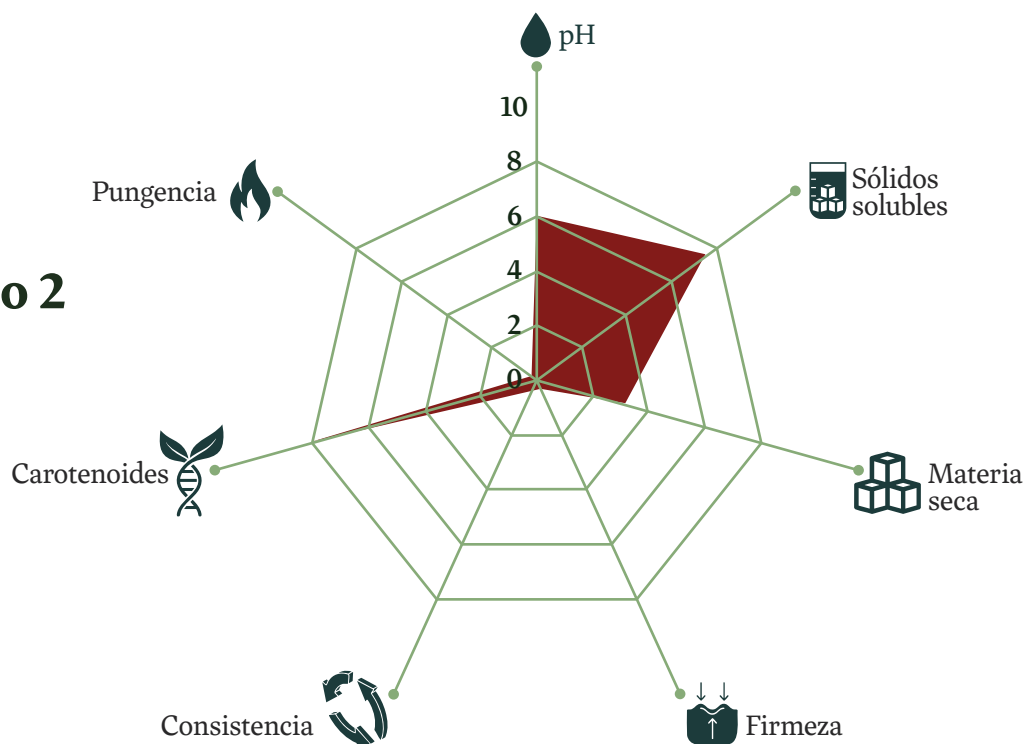


Figura 7.3. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 2.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 3

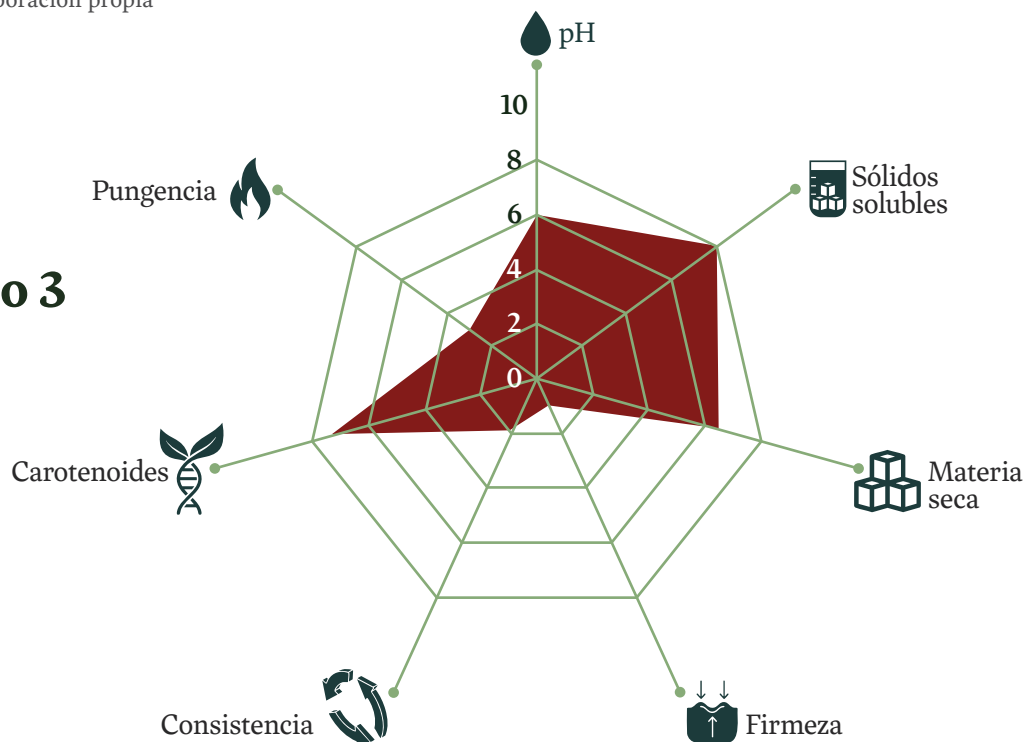


Figura 7.4. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 3.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 4

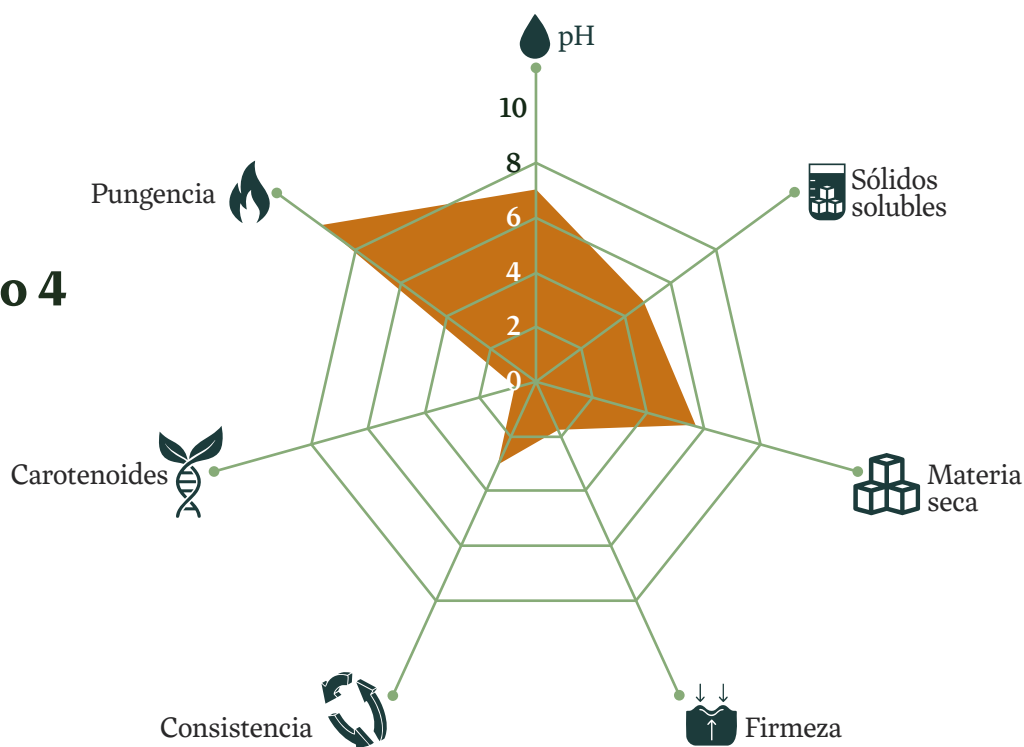


Figura 7.5. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 4.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 5

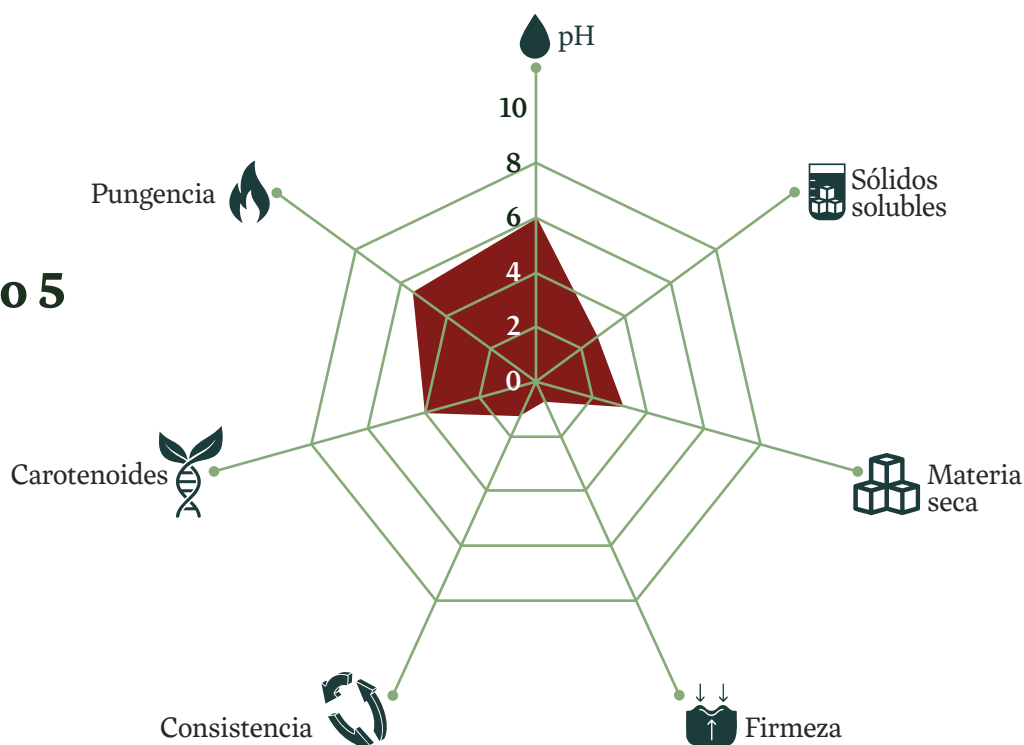


Figura 7.6. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 5.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 6

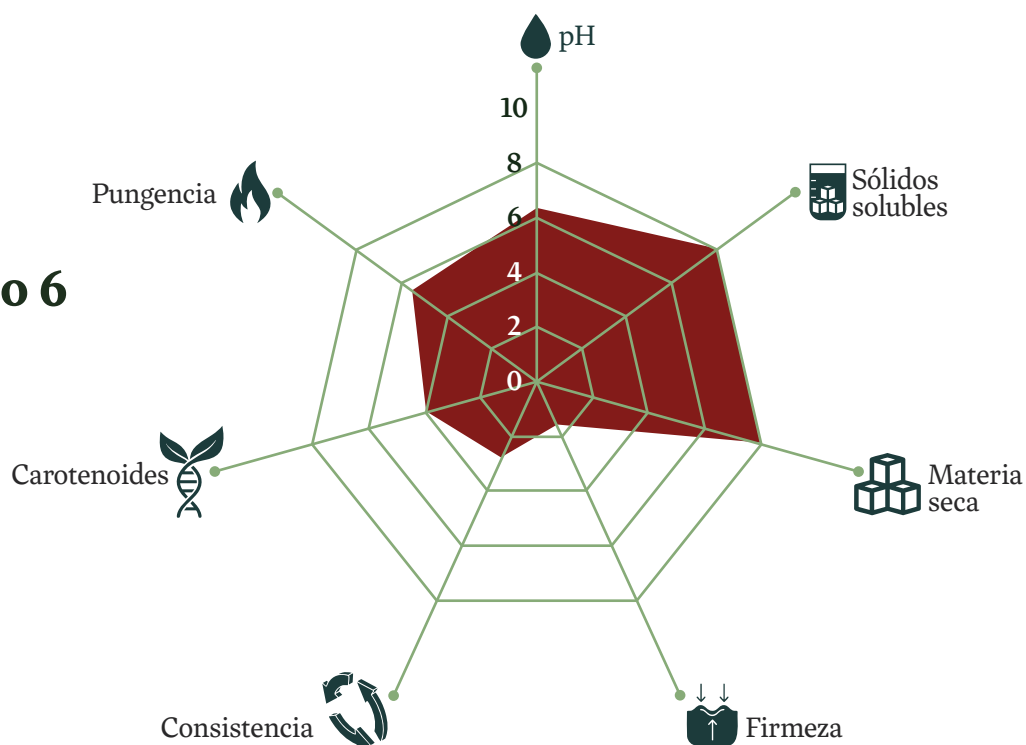


Figura 7.7. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 6.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 7

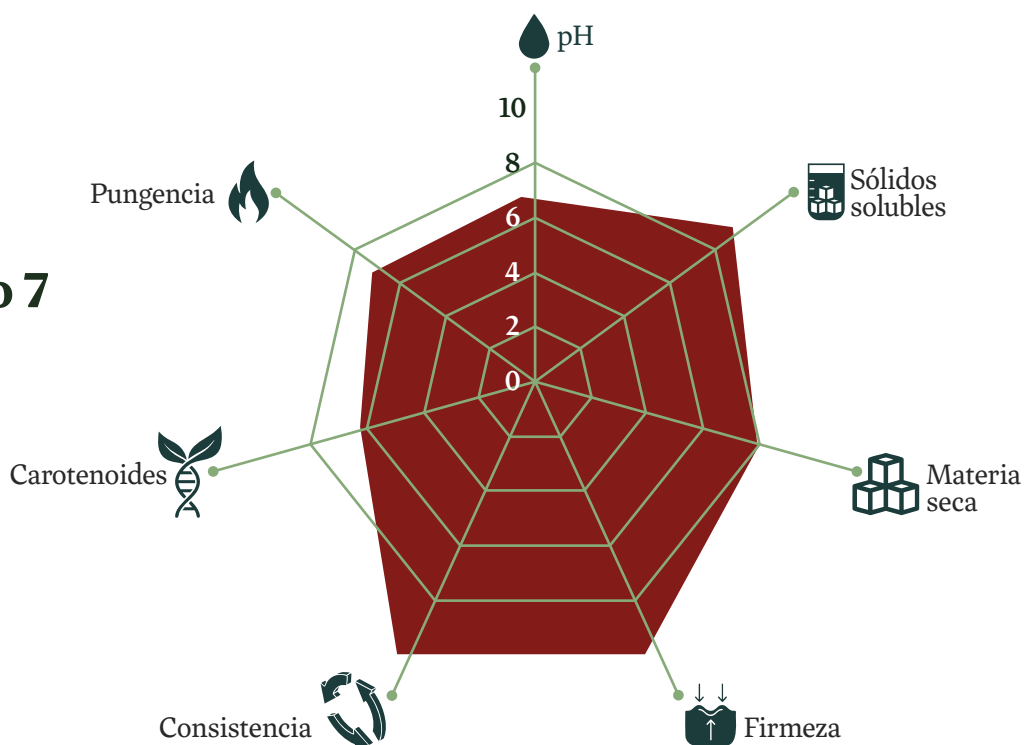


Figura 7.8. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 7.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 8

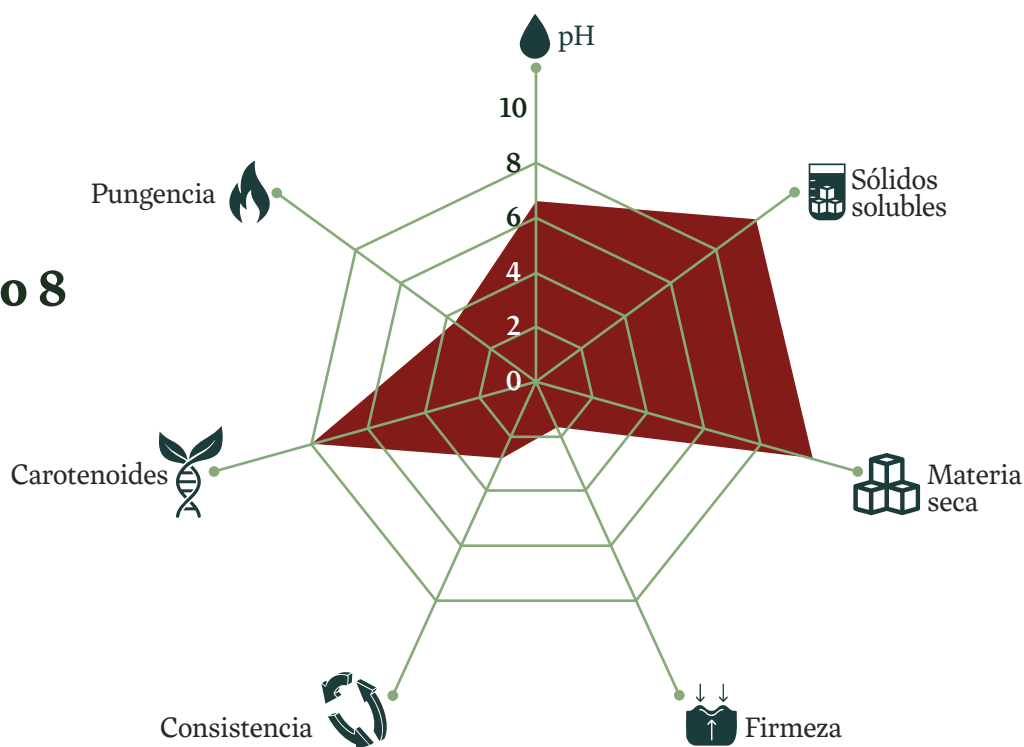


Figura 7.9. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 8.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 9

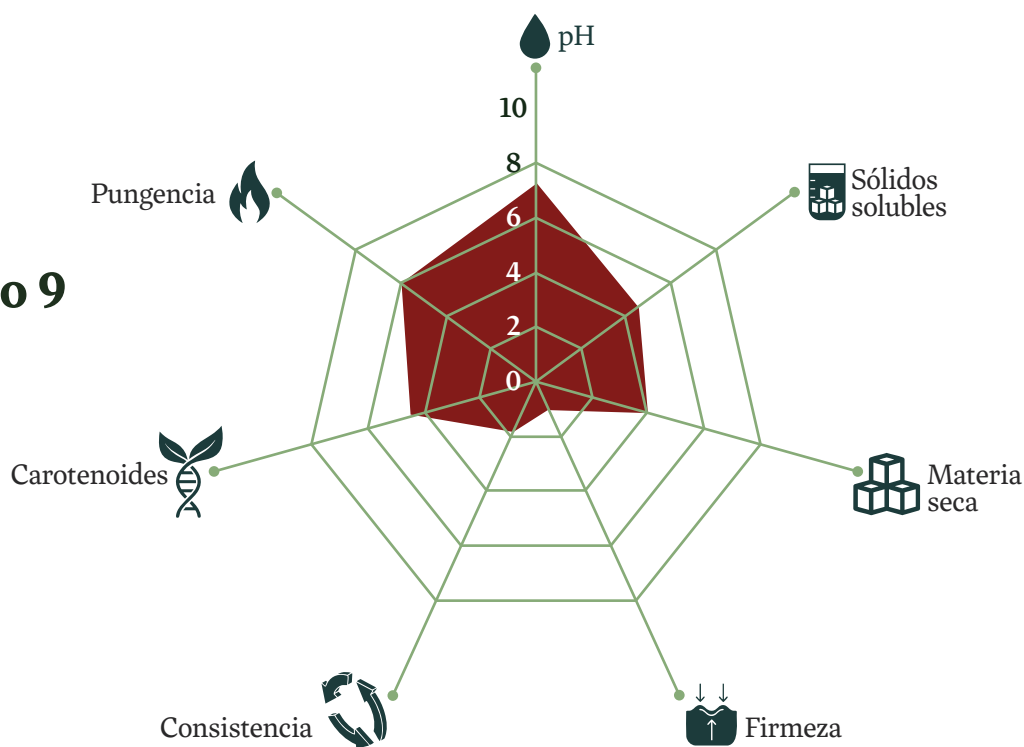


Figura 7.10. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 9.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 10

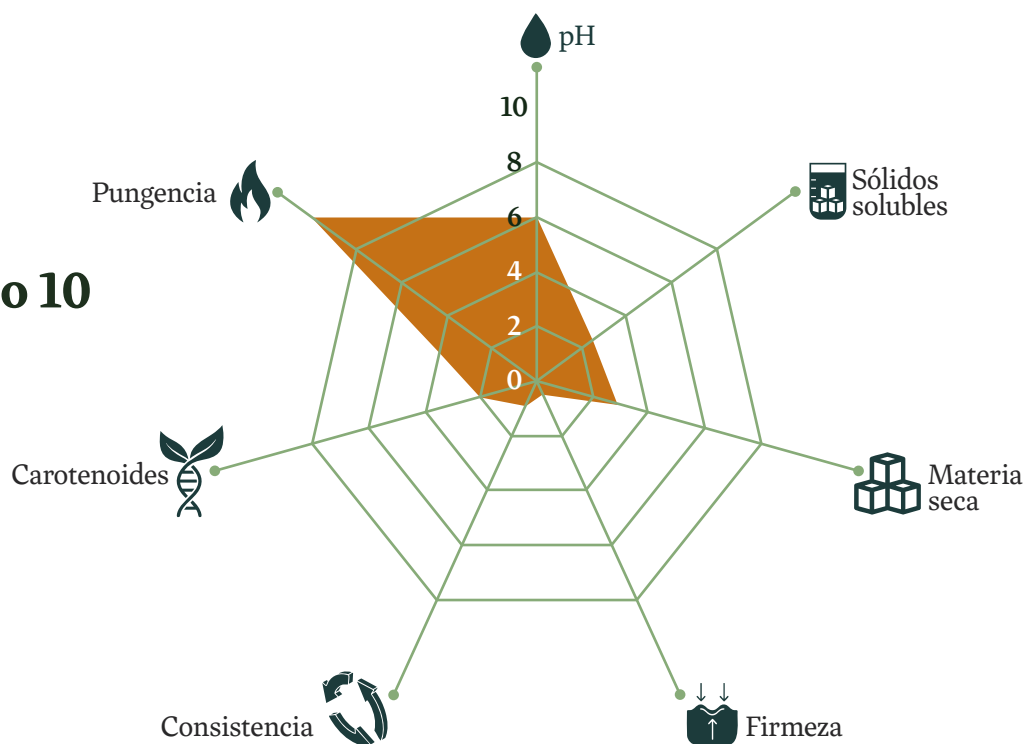


Figura 7.11. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 10.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 11

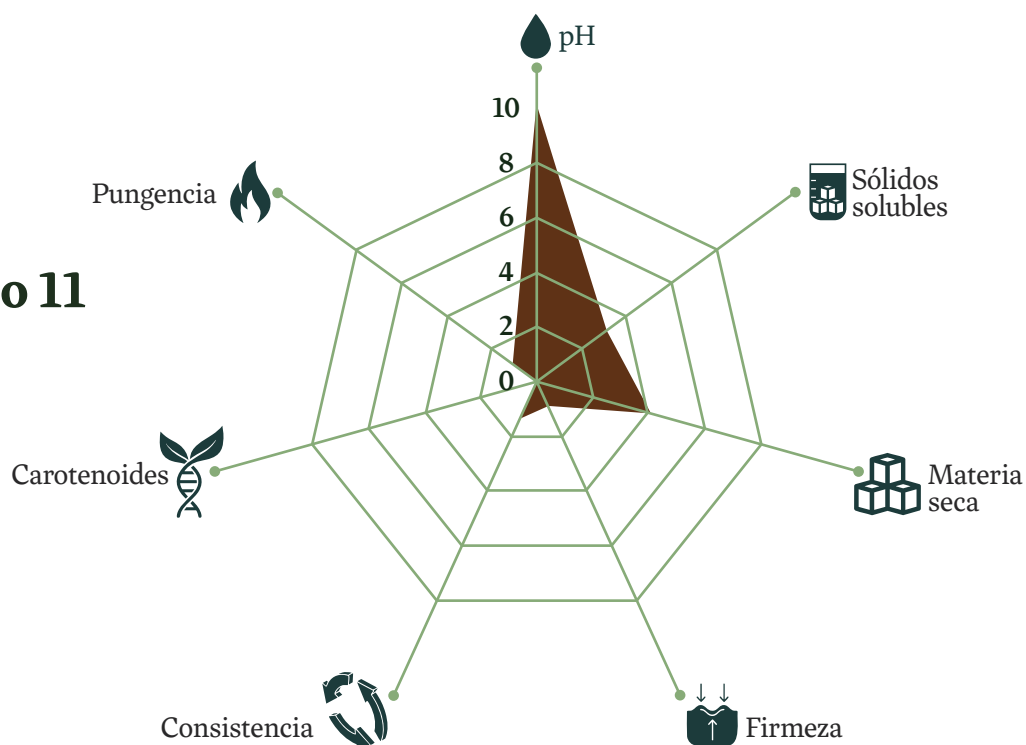


Figura 7.12. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 11.

Fuente: Elaboración propia

Grupo 12

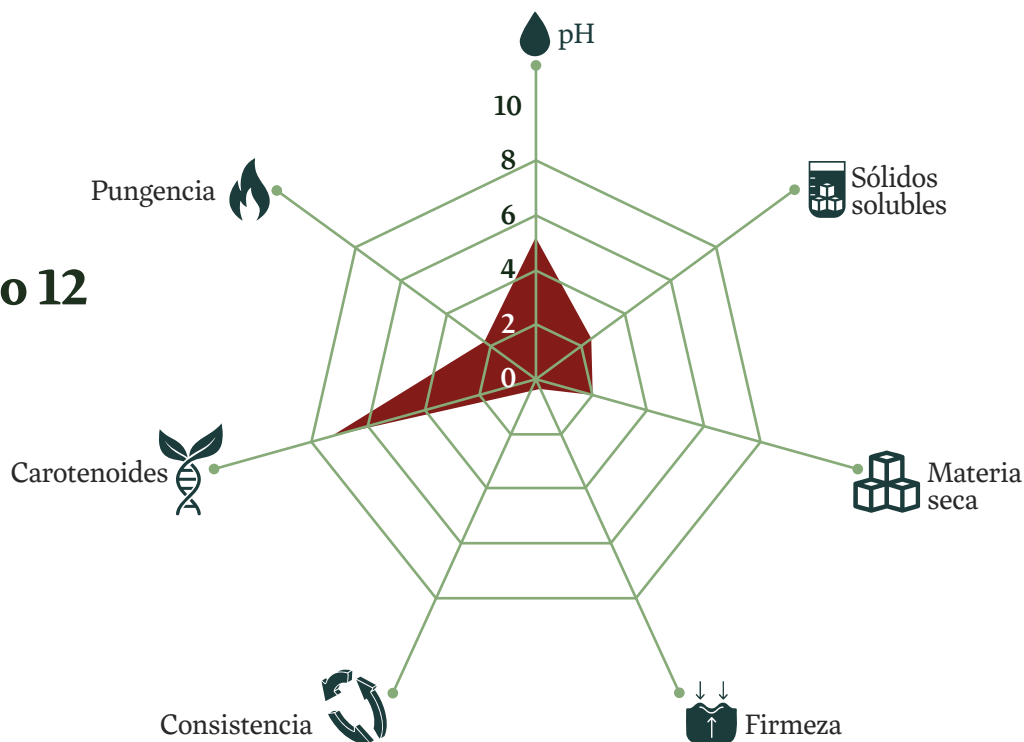


Figura 7.13. Distribución normalizada de las características fisicoquímicas del grupo de ají 12.

Fuente: Elaboración propia

Para interpretar estos resultados se debe comprender en profundidad qué representa y cómo afecta cada característica fisicoquímica la calidad del fruto. Se iniciará por entender el pH (o acidez), que es una escala que va desde 0 hasta 14 y mide la cantidad de iones de hidrógeno presentes en una solución. En otros términos, un pH de 0 indica una alta acidez, mientras que un pH de 14 indica alta alcalinidad; un pH de 7 es considerado neutro, como es el caso del agua. En lo que se refiere a los frutos de ají, su pH se encuentra en un rango de entre 4,5 y 5,5, lo que los clasifica como ligeramente ácidos. Por lo tanto, los grupos que muestran una tenden-

cia alta hacia 10 tienen un pH menos ácido (5,2), como el grupo 11 (figura 7.12), mientras que aquellos que muestran una medida cercana a “0” son más ácidos (4,5), como el grupo 12 (figura 7.13).

Según Bello y Palacios (2013), el pH juega un papel importante en el procesamiento de los alimentos, con efectos que incluyen la desnaturalización de proteínas; la gelificación de compuestos; actividades enzimáticas asociadas a las proteínas presentes; crecimiento e inactivación de microorganismos, y reacciones químicas, como la de Maillard. En el caso de los componentes bioactivos, como

los carotenoides y las vitaminas, se ha demostrado que presentan una mayor inestabilidad química ante una prolongada o alta presencia de ácidos, lo que genera reacciones de protonación, isomerización y degradación (Bello et al., 2013).

Un pH bajo puede deberse a la alta concentración de ácidos orgánicos, que tiene incidencia directa en el sabor y el aroma del fruto. En ajís se han reportado el éster butílico del ácido butanoico, el éster hexílico del ácido acético, el salicilato de metilo, entre otros (Mi et al., 2023), que son característicos de notas frutales. Sin embargo, un pH bajo puede ser benéfico, dependiendo del propósito final de los frutos. Según un estudio realizado por Liu et al. (2023), un pH bajo inhibe la proliferación de ciertos microorganismos, lo que permite extender la vida útil de los alimentos.

Los resultados obtenidos en el presente estudio mostraron diferencias estadísticamente significativas en los valores de pH entre las distintas clasificaciones fisicoquímicas (análisis de varianza [Anova, por su sigla en inglés] $p < 0,001$), lo cual confirma la existencia de grupos diferenciables según su grado de acidez. En general, los materiales pertenecientes a la clasificación 1 presentaron los valores más bajos de pH ($4,88 \pm 0,16$), mientras que los de la clasificación 4 mostraron los valores más altos ($5,02 \pm 0,15$), seguidos por las clasificaciones 11, 10 y 9, que conforman un grupo estadísticamente homogéneo según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Estas diferencias, aunque sutiles, son relevantes estadísticamente. Desde una perspectiva sensorial y tecnológica: los frutos con pH más bajo tienden a expresar perfiles gustativos más ácidos y frescos, mientras que los materiales con pH más elevado pueden percibirse como más dulces o balanceados, lo cual influye directamente en la aceptación del consumidor (Castaño et al., 2025).

Del mismo modo, el pH puede activar las enzimas encargadas de la degradación de la pectina y, de esta manera, modificar la textura que se percibe del fruto. Adicionalmente, algunos estudios han demostrado que el pH tiene un efecto considerable en la percepción de sabores dulces y ácidos (Bello et al., 2013; Baccichet et al., 2021). Es por esto por lo que el pH es un indicador de calidad asociado tanto al producto como al proceso productivo, siendo imperativa su comprensión y optimización, con el fin de alcanzar las características organolépticas demandadas y así garantizar la seguridad alimentaria del consumidor final.

Para el caso de los sólidos solubles, es una medida que proporciona información sobre la cantidad de compuestos disueltos en el agua del fruto, incluyendo principalmente azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, compuestos fenólicos, carotenoides, vitaminas, algunos alcaloides y flavonoides. Sin embargo, es común encontrar en frutas y hortalizas que esta medida tiene una alta correlación con los azúcares. Para los frutos de ají estudiados, se encontró una me-



dida promedio para sólidos solubles entre 5,3 y 12,9 grados Brix, lo que corresponde a 0 y 10, respectivamente. Según la figura 9, el grupo 8 tiene la población con mayor valor para este atributo, a diferencia del grupo 12 (figura 7.13), que tiene el menor.

Aunque el ají ha sido juiciosamente estudiado, principalmente en sus características de contenido de capsaicinoides, carotenoides y vitaminas, aún hacen falta estudios que logren mapear más características de interés agroindustrial. Uno de los estudios que logra cuantificar estas características y tiene en cuenta un perfil más detallado en la composición de los frutos fue realizado por Kim et al. (2019) en Corea del Sur, donde lograron caracterizar 12 cultivos de ají *Capsicum annuum* L. bajo múltiples variables bromatológicas. Así, encontraron que la cantidad de azúcares libres estaba altamente afectada por el genotipo del cultivo,

las condiciones del suelo y la maduración del fruto, siendo los dos últimos rasgos los más beneficiados con cultivos a mayores temperaturas. También se tuvo en cuenta el perfil de aminoácidos y el de ácidos grasos, variables relevantes dado que el ají es una fuente considerable de aminoácidos como: ácido glutámico y prolina, y ácidos grasos como ácido palmítico, linoleico y linolénico, siendo estos entre el 10 y 5 %, y 19, 40 y 15 % de la materia seca, perteneciente a estos dos nutrientes respectivamente.

En general, los frutos de ají cuentan con un 10 % de proteína con respecto a la materia seca. Esta se encuentra parcialmente soluble, lo que constituye su perfil de aminoácidos, el cual puede variar según la especie de *Capsicum* spp. Estos aminoácidos tienen un efecto importante en la percepción sensorial del producto, siendo responsables directos del sabor amargo (tirosina, leucina, isoleucina, valina, fenila-



Foto: Estreban Castaño Llanos



lanina, lisina, histidina y arginina), el sabor dulce (treonina, serina, glicina, alanina y metionina) y el sabor umami (ácido glutámico y ácido aspártico). Este último, considerado el sabor “delicioso”, es uno de los elementos que más contribuye a la percepción sensorial característica del ají; sin embargo, por el contenido de proteína que contiene puede pasar desapercibido (Liu et al., 2023).

Los sólidos solubles también son una medida que se emplea comúnmente para determinar el tiempo de cosecha de los frutos; pueden asociarse a concentraciones del 80 % de azúcares disueltos en el jugo del fruto, aunque estas medidas varían principalmente por el genotipo del cultivo y por factores abióticos. El aumento en la acumulación de azúcares disueltos se debe principalmente al transporte de nutrientes por la savia y a la descomposición de las reservas de almidón dentro del fruto, lo que coinci-

de con el aumento en el grado de madurez fisiológica, que alcanza su mayor valor cuando el fruto está maduro. Aunque está ampliamente documentada y es bastante asequible, la determinación de madurez asociada a la concentración de sólidos solubles mediante la refractometría se considera una técnica destructiva (Villaseñor-Aguilar et al., 2020).

La materia seca, también conocida como sólidos totales, es la proporción del fruto que queda después de retirar toda el agua presente en él, razón por la cual es el directo inverso de la humedad, ya que da cuenta de los componentes que no son agua. Esta medida abarca un amplio espectro de tipos de compuestos, en el que se encuentran principalmente carbohidratos, proteínas, grasas, minerales, vitaminas, compuestos fenólicos y bioactivos. Para los frutos de ají estudiados se tiene una medida media de 7,8 a 20,5 %, lo que corresponde a 0 y 10, respectivamente, en las figuras 7.1 a 7.13.

Para industrias como la alimentaria o la agrícola, la materia seca permite entender a grandes rasgos la calidad nutricional de los frutos: entre mayor sea su valor, mayor será su potencial nutricional. Sin embargo, este valor juega un papel importante al estar altamente correlacionado con la textura, el sabor, el aroma, la vida útil y la seguridad alimentaria de los productos. Otros estudios mapean esta característica como primer acercamiento, para luego considerar aspectos nutricionales, como las proporciones de la materia seca en relación con la cantidad de ácidos grasos, fibras solubles e insolubles, proteínas, carbohidratos, entre otros elementos (Kim et al., 2019; Pino et al., 2007; Hernández et al., 2021; Solís-Marroquín et al., 2017).

La cantidad de agua presente en los frutos puede incidir de manera perjudicial en la correcta preservación de los alimentos. El estudio realizado por Aşkin Uzel (2017) para pastas de ají demuestra que hubo una mayor cantidad de microorganismos proliferantes que afectan de manera negativa la calidad de la pasta. Para controlar el crecimiento de microorganismos hubo que añadir múltiples preservantes, como benzoato de sodio o sorbato de potasio, los cuales demostraron tener una mejora significativa en la percepción tanto del color como del aroma y el sabor de la pasta. En alimentos como el polvo de ají, la susceptibilidad en contaminación es mucho menor, dado que la proporción de agua presente, aproximadamente $< 10\%$, reduce la actividad de microorganismos y enzimas, responsables del dete-

rioro del producto (Kim et al., 2019; Woldemariam et al., 2021). Esto es importante ya que al reducir el riesgo de contaminación se asegura que aquel sea apto para el consumo humano, con lo que se protege la salud de los consumidores finales.

Otra característica de especial interés es la textura. Esta se considera un conjunto de propiedades que describen cómo el alimento se comporta y se percibe al tacto. En este estudio se tuvieron en cuenta características como la firmeza, la consistencia, la cohesión y el trabajo de cohesión; sin embargo, solo se hará referencia a la firmeza y a la consistencia.

La firmeza es la resistencia que ejerce el alimento cuando se le aplica una presión al manipularlo, es decir, qué tan compacto o sólido resulta. En este caso, habría que imaginar la resistencia que haría la pasta de ají al ser extendida con un cuchillo. Mientras menos firmeza posea, se comportará más como un líquido acuoso. Por otra parte, la consistencia se refiere a la uniformidad y homogeneidad del alimento; es una fuerza manifestada en términos de qué tan unidos se mantienen sus componentes. Aquí ha de imagine la pasta de ají con uniformidad, sin percepción de grumos o separación de fases, entre mayor sea su valor. Para las pastas de ají estudiadas, se encontraron frutos con firmezas de 30 y 1.970 g, y consistencias de 93 g/s y 3.175 g/s, respectivamente, para 0 y 10, en las figuras 7.1 a 7.13. Las medidas de “g” y “g/s” corresponden al sistema internacional de unidades para gramos fuerza y gramos fuerza por segundo, respectivamente.

La textura está altamente relacionada a la composición química del alimento, por ejemplo, se han identificado algunos polímeros y polisacáridos que tienen incidencia directa en la firmeza y consistencia de los frutos. Algunos de estos biopolímeros son la cutina y el cután, que están asociados a la cutícula de la fruta. Su función estructural les permite hacer más rígida la pared celular, con lo que una mayor proporción de estos indica un grado de firmeza mayor (Shechter et al., 2010). Sin embargo, al ser completamente insolubles y tener una alta resistencia a la degradación mecánica, no aportan a propiedades de la textura, como la consistencia (Tafolla-Arellano et al., 2013). Por otra parte, la pectina es el polisacárido más incidente en la textura; su capacidad de solubilizarse en agua le permite formar agregados con polímeros y poseer propiedades reológicas elásticas y viscoelásticas (Konishi et al., 2022 y Hernández-Pérez et al., 2020), lo que la convierte en un elemento clave en la consistencia de las pastas.

También es importante tener presente el color de los frutos, que está relacionado directamente con los carotenoides. Los carotenoides

son pigmentos lipofílicos con alta capacidad antioxidante y algunos de ellos son precursores de vitamina A. Los más representativos para el género *Capsicum* son capsantina, capsantina-3,6-epóxido, capsorrubina, β -caroteno, β -criptoxantina, luteína, zeaxantina, antheraxantina y violaxantina (Hassan et al., 2019). Dependiendo del grado de madurez y del cultivo, los frutos pueden presentar diferentes coloraciones, como verde, marrón, amarillo, naranja y rojo, cada una de ellas con una proporción diferente de cada carotenoide. En este estudio se realizó la valoración total de carotenoides, por lo que no fue posible cuantificar la proporción de cada uno. Sin embargo, se ha reportado en diferentes estudios cómo es la distribución de estos de acuerdo con la coloración del fruto (figura 7.14). Para los frutos de ají estudiados, se encontró una media para los carotenoides totales entre 0,15 y 18,47 mg/g, que corresponde a 0 y 10, respectivamente, en las figuras 7.1 a 7.13. El grupo 2 (figura 7.3) es el que contiene mayor promedio y el grupo 11 (figura 7.12), el de menor contenido medio de esta característica.



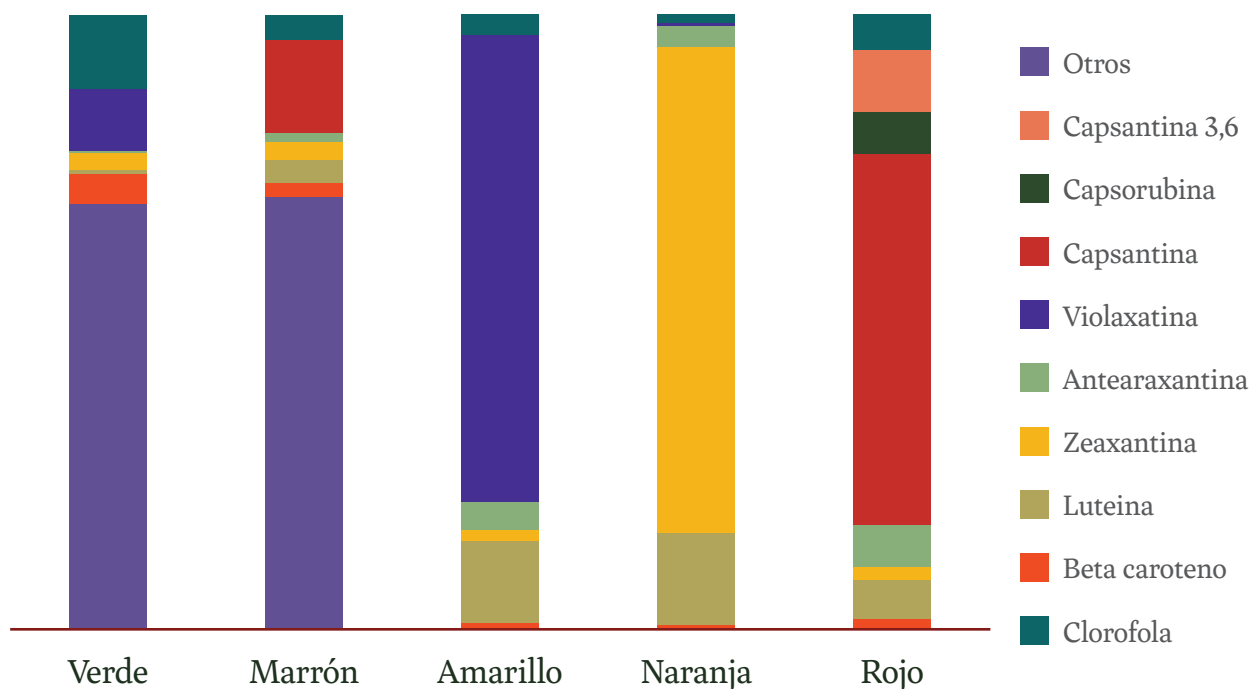


Figura 7.14. Distribución de carotenoides según la coloración del fruto.

Fuente: Elaboración propia con base en Hassan et al. (2019)

La coloración rojiza está dada mayoritariamente por capsantina, capsorubina y criptoxantina, mientras que la coloración amarilla-anaranjada se debe al β -caroteno, zeaxantina, violaxantina y β -criptoxantina (Hernández-Pérez et al., 2020). La combinación de estos con la clorofila, que es de tonalidad verde, da como resultado un color característico de algunos frutos de *Capsicum* marrones. Sin embargo, la concentración de estos carotenoides depende mayoritariamente del estado de madurez del fruto. Existen modelos predictivos del estado de cosecha de estos frutos mediante la

coloración que poseen; a diferencia de la técnica de los grados Brix, estos no son destructivos, lo que no implica una pérdida en los rendimientos de la productividad agrícola (Villaseñor-Aguilar et al., 2020). Adicionalmente, estos compuestos tienen un alto potencial antioxidante y permiten conservar la coloración ante factores oxidantes, como la luz y el oxígeno. Se ha demostrado también, en múltiples estudios, que el consumo de estos reduce el estrés oxidativo y ayuda a prevenir enfermedades cardiovasculares (Hassan et al., 2019; Hernández-Pérez et al., 2020).

Finalmente, la pungencia de los ajís es su característica más representativa. Relacionado con este tema, aunque se postula que las plantas del género *Capsicum* desarrollaron estas moléculas como una estrategia evolutiva de defensa frente a depredadores y patógenos —tales como roedores y hongos (Perry et al., 2007; Tewksbury & Gary, 2001)—, se ha evidenciado que el consumo de capsaicinoides estimula la liberación de endorfinas y dopamina. Este proceso neuroquímico mitiga la percepción del dolor y promueve sensaciones de placer o euforia en el ser humano (Pasierski & Szulczyk, 2022). Es por ello por lo que a muchas personas les gusta consumir ají, sin embargo, la sensación de bienestar puede variar de persona a persona y depende de factores individuales, como la tolerancia al picante y las preferencias personales. Para los frutos de ají estudiados, se encontró una media para los capsaicinoides totales entre 0 y 1.260 ppm, que corresponden a 0 y 10, respectivamente, en las figuras 7.1 a 7.13.

Entender los capsaicinoides totales proporciona información sobre la intensidad del picor de los ajís. La escala de Scoville (1912) ha perdurado como una herramienta de clasificación de los fru-

tos según el grado de picante. La escala define 5 niveles: no pungente (0-700 SHU), medianamente pungente (700-3.000 SHU), moderadamente pungente (3.000-25.000 SHU), altamente pungente (25.000-70.000 SHU) y extremadamente pungente (> 80.000 SHU). Para convertir la concentración de capsaicinoides en ppm o $\mu\text{g/g}$ a unidades Scoville SHU, simplemente se multiplica el valor por 15 (Penagos-Calvete, et al., 2019; Hernández—Pérez, et al., 2020). Así, se tienen frutos que van desde ser libres de picante hasta extremadamente picantes, con valores superiores a 100.000 SHU.

Tras explorar en detalle las características fisicoquímicas que influyen en la calidad del fruto, queda claro que aún queda mucho por entender. Sin embargo, estos resultados ofrecen una visión más profunda de la complejidad del género *Capsicum* y abren la puerta a un vasto campo de estudio. Comprender a fondo cómo estas características afectan la calidad del fruto permite apreciar mejor su diversidad y potencial, lo que traza un camino para futuras aplicaciones y usos de este germoplasma. Para finalizar, las tabla 7.1 y 7.2 resumen las variaciones encontradas en los distintos tipos de ají.



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Tabla 7.1. Resumen de características fisicoquímicas para los 12 grupos fisicoquímicamente homogéneos de ají del germoplasma vegetal de AGROSAVIA

Clúster	pH	Brix (°)	Sólidos (%)	Firmeza (g)	Consistencia (g/s)	Carotenoides (mg/g)	Capsaicinoides (ppm)	Clasificación Scoville	Pseudocolor	Código HEX
1	4,89	9,90	13,98	139,99	410,54	5,12	818,94	Moderado		#A22A00
2	4,92	10,90	12,03	74,81	213,15	18,47	46,04	No pungente		#821400
3	4,93	11,10	16,02	214,14	609,78	14,00	317,99	Mediano		#891A00
4	4,97	8,90	15,07	365,44	1.064,45	1,32	1.161,32	Moderado		#C37200
5	4,90	7,40	11,85	149,54	439,84	7,40	693,97	Moderado		#8B1D00
6	4,94	11,10	18,04	329,62	967,87	7,57	720,16	Moderado		#972500
7	4,97	12,30	18,55	1.969,18	3.175,37	10,53	806,83	Moderado		#902200
8	4,95	12,90	20,51	338,36	942,29	14,64	449,08	Moderado		#8F1B00
9	4,98	8,70	12,48	212,89	653,29	8,46	735,32	Moderado		#921F00
10	4,93	7,20	11,58	133,80	383,53	3,32	1.260,36	Moderado		#B66F00
11	5,18	7,60	12,60	181,77	521,37	0,16	131,90	Mediano		#4E2400
12	4,87	7,00	10,21	58,50	171,56	13,24	278,13	Mediano		#831C00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.2. Desviación estándar de las características fisicoquímicas para los 12 grupos fisicoquímicamente homogéneos de ají del germoplasma vegetal de AGROSAVIA

Clúster	pH	Brix (°)	Sólidos (%)	Firmeza (g)	Consistencia (g/s)	Carotenoides (mg/g)	Capsaicinoides (ppm)
1	0,16	1,02	2,00	32,18	79,06	2,34	1.051,99
2	0,18	1,20	1,57	79,41	142,30	8,64	97,10
3	0,15	1,28	1,86	305,00	518,01	9,32	296,24
4	0,15	1,46	2,48	332,00	603,16	1,32	754,76
5	0,15	1,00	1,87	181,67	320,20	3,95	707,04
6	0,16	1,04	1,67	152,26	386,27	4,44	813,68
7	0,14	2,32	4,68	689,52	840,47	7,30	335,10
8	0,10	1,56	5,81	199,13	454,92	9,28	589,83
9	0,10	1,27	1,47	56,25	163,00	4,71	864,23
10	0,25	1,04	1,27	121,63	266,16	3,37	1.723,22
11	0,24	0,91	2,95	150,44	333,50	-	160,29
12	0,15	0,88	1,70	78,28	135,91	7,77	433,85

Fuente: Elaboración propia

Aplicabilidad de los resultados obtenidos

El género *Capsicum*, con su amplia variedad de especies, ofrece múltiples oportunidades de transformación agroindustrial que tienen un impacto significativo en la economía. Como se ha descrito, los frutos de este género contienen una diversidad de metabolitos valiosos en la industria alimentaria y que pueden incursionar en los mercados cosmético, farmacéutico y químico. En Colombia se dispone de aproximadamente 1.000 genotipos del género *Capsicum*. Esta amplia diversidad constituye una oportunidad estratégica para el fortalecimiento de la producción comercial y la exportación de productos derivados.

Además, los productos derivados del *Capsicum*, como el ají fermentado y la paprika, ofrecen beneficios económicos significativos. El ají fermentado, rico en antioxidantes, como los flavonoides, ácidos fenólicos, estilbenos y lignanos, tiene aplicaciones tanto en la industria alimentaria como en la farmacéutica (Liu et al.,2023), lo que amplía su potencial comercial. Por otro lado, la paprika, obtenida de los ajís dulce y maduro, se utiliza en varios productos, desde encurtidos hasta salsas, lo que contribuye a diversificar la oferta agroindustrial y genera más ingresos para los productores (Rugeles et al., 2010).

Además de su impacto en la industria alimentaria, los frutos de *Capsicum* también tienen aplicaciones comerciales en otros sectores económicos. La capsaicina, uno de los ingredientes activos del *Capsicum*, se utiliza en la industria farmacéutica para el trata-

miento de diversas afecciones, desde artritis hasta dolores musculares; sirve además como protección cardiovascular, y llega incluso a ser un suplemento dietario para disminuir la incidencia del cáncer (Hernández—Pérez et al., 2020; Rugeles et al., 2010). En el sector agrícola, el *Capsicum* se emplea como insecticida y controlador de plagas, lo que proporciona una alternativa sostenible para el manejo de cultivos, y contribuye a la seguridad alimentaria y la productividad agrícola. Los frutos del género también podrían ser empleados en la producción de cosméticos para labios y mejillas, pues por su contenido de antioxidantes darían beneficios a la apariencia cutánea,

mientras que por su moderada o baja pungencia podrían fungir como voluminizadores.

En el marco de este estudio, se pueden explorar posibles aplicaciones para cada grupo de ají identificado en función de sus características físico-químicas. A continuación, se desglosa al menos una aplicación para cada grupo:

» **Grupo 1:** por su moderada pungencia, contenido medio de carotenoides y color naranja intenso, podría emplearse para la producción de salsas picantes con una tonalidad diferencial (figura 7.15).



Figura 7.15. Aspecto promedio de la pasta del grupo 1.

Foto: Esteban Castaño Llanos

» **Grupo 2:** por su casi nula pungencia, alta consistencia y contenido de carotenoides, es ideal para extraer pigmentos con tonos rojos profundos o como aditivo capaz de pigmentar y espesar diferentes salsas y aderezos.

» **Grupo 3:** por su moderada pungencia, apreciable firmeza y consistencia, así como por su alto contenido de sólidos y su tono rojo quemado, podría emplearse como aderezo líquido —gracias a sus grados Brix—, aprovechando el equilibrio de sus propiedades.

» **Grupo 4:** dada su moderada pungencia, pero baja firmeza y alta consistencia, resulta perfecto para salsas con un tono amarillo dorado (figura 7.16).



Figura 7.16. Aspecto promedio de la pasta del grupo 4.

Foto: Esteban Castaño Llanos

podría ser empleado en la fabricación de adobos que resalten tanto el sabor como el color de las carnes. También podría ser un aditivo fitogénico, por su alto contenido de carotenoides, como suplemento alimenticio para humanos y animales.

» **Grupo 9:** con propiedades medias, una pungencia moderada y color rojo quemado, podría emplearse como acompañamiento en múltiples platos, así como en salsas que aporten tanto color como picor.

» **Grupo 10:** por sus propiedades medias, una pungencia entre moderada y alta, y su amarillo quemado, podría emplearse como acompañamiento de variadas preparaciones, así como en salsas que aporten picor y un color distintivo (figura 7.17).

» **Grupo 5:** pese a que tiene bajo contenido de sólidos y pocos grados Brix, su firmeza y tonalidad rojo sangre lo convierten en un buen suplemento nutricional, como fruto fresco, gracias a su contenido medio de carotenoides.

» **Grupo 6:** con moderada pungencia, apreciable consistencia y alto contenido de sólidos, además de su tono rojo terracota, resulta ideal como condimento líquido.

» **Grupo 7:** por su moderada pungencia, notoria firmeza, alto contenido de sólidos y color rojo ladrillo, destaca como posible condimento en presentación en polvo.

» **Grupo 8:** por su tono rojo fuego, junto con sus altos valores en consistencia, sólidos y grados Brix,



Figura 7.17. Aspecto promedio de la pasta del grupo 10.

Foto: Esteban Castaño Llanos



» **Grupo 11:** por su color café intenso y llamativo, junto con sus propiedades medias en consistencia y grados Brix, podría emplearse en la producción de salsas picantes de nivel medio (figura 7.18).

Figura 7.18. Aspecto promedio de la pasta del grupo 11.

Foto: Esteban Castaño Llanos

» **Grupo 12:** de color marrón rojizo quemado, bajo en firmeza y consistencia, pero con un contenido alto de carotenoides, podría servir como acompañamiento de comidas y como suplemento alimenticio (figura 7.19).

Figura 7.19. Aspecto promedio de la pasta del grupo 12.

Foto: Esteban Castaño Llanos



Las propiedades agroindustriales de estos frutos ofrecen una amplia gama de aplicaciones comerciales y beneficios económicos en diferentes sectores. En el capítulo 8 se explorarán con mayor detalle las posibles transformaciones del *Capsicum* y los sectores de interés relacionados con él. Allí podrá descubrirse cómo estos frutos versátiles pueden ser aprovechados para impulsar el desarrollo económico, la innovación y la sostenibilidad en múltiples industrias.

Reflexión

En este capítulo se analizaron de manera integral las características fisicoquímicas que determinan la calidad del fruto de *Capsicum* spp., así como su potencial de aprovechamiento agroindustrial en el contexto colombiano. Los resultados obtenidos evidencian que variables como el pH, los sólidos solubles, la firmeza y la consistencia desempeñan un papel determinante en la definición de atributos sensoriales y tecnológicos. En particular, se observó que los materiales con mayor contenido de sólidos solubles y menor pH presentan un perfil idóneo para la elaboración de productos procesados, como salsas y encurtidos, mientras que los frutos con mayor firmeza y contenido de agua se proyectan como materias primas adecuadas para consumo fresco o deshidratado.

Estos hallazgos reafirman el valor de la diversidad genética del género *Capsicum* en Colombia como fuente de innovación para las industrias alimentaria, farmacéutica y agrícola. Las variaciones observadas en los perfiles fisicoquímicos entre especies y variedades sugieren un potencial diferencial para la extracción de compuestos bioactivos, pigmentos naturales y metabolitos secundarios, con aplicaciones en el desarrollo de bioingredientes funcionales, productos nutraceuticos y biopesticidas de origen vegetal.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, el aprovechamiento de esta biodiversidad debe enmarcarse en estrategias de conservación *in situ* y *ex situ*, acompañadas del fortalecimiento de cadenas de valor que promuevan la participación de productores locales. La integración de prácticas agrícolas sostenibles y la gestión responsable de los recursos genéticos no solo aseguran la continuidad de este patrimonio biológico, sino que consolidan una base científica para impulsar modelos bioeconómicos regionales. De este modo, la biodiversidad del *Capsicum* se posiciona como un eje estratégico para la competitividad agroindustrial y la construcción de un futuro sostenible basado en la riqueza natural de Colombia.



Foto: Esteban Castaño Llanos

Referencias

- Abd El-Hack, M. E., El-Saadony, M. T., Elbestawy, A. R., Gado, A. R., Nader, M. M., Saad, A. M., El-Tahan, A. M., Taha, A. E., Salem, H. M., & El-Tarabily, K. A. (2022). Hot red pepper powder as a safe alternative to antibiotics in organic poultry feed: an updated review. *Poultry Science*, 101(4), 101684. <https://doi.org/10.1016/J.PSJ.2021.101684>
- Ahmad, T., Cawood, M., Iqbal, Q., Ariño, A., Batool, A., Sabir Tariq, R. M., Azam, M., & Akhtar, S. (2019). Phytochemicals in daucus carota and their health benefits—review article. *Foods*, 8(9), 424. <https://doi.org/10.3390/FOODS8090424>
- Alamu, A. E., Ade-Omowaye, B. I. O., Akinwande, B. A., Dudu, O. E., & Obori, F. O. (2023). Pigments and colour characteristics: influence of drying methods on Nigerian pepper (*Capsicum frutescence*). *Journal of Agriculture and Food Research*, 14, 100760. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2023.100760>
- Ali, S., Rezende, V. T., Ullah, S., De Paiva, E. L., Tonin, F. G., Abdullah, Corassin, C. H., & De Oliveira, C. A. F. (2023). Food processing and challenges in the food production and quality: the foodomics approach. *Food Bioscience*, 56, 103217. <https://doi.org/10.1016/J.FBIO.2023.103217>
- Alimentarius, C. (2011). *Codex standard*. FAO.
- Andrés-Bello, A., Barreto-Palacios, V., García-Segovia, P., Mir-Bel, J., & Martínez-Monzó, J. (2013). Effect of pH on color and texture of food products. *Food Engineering Reviews*, 5(3), 158-170. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12393-013-9067-2>
- Aşkin Uzel, R. (2017). Alternative methods to preserve sweet red pepper paste quality: effect of temperature and protective agents. *Anadolu University Journal of Science and Technology*, 18(3), 695-704. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/332459>
- Balahbib, A., Omari, N., El Hachlafi, N., El Lakhdar, F., Menyiy, N., El Salhi, N., Mrabti, H. N., Bakrim, S., Zengin, G., & Bouyahya, A. (2021). Health beneficial and pharmacological properties of p-cymene. *Food and Chemical Toxicology*, 153, 112259. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2021.112259>
- Cervantes-Hernández, F., Alcalá-González, P., Martínez, O., & Ordaz-Ortiz, J. J. (2019). Placenta, pericarp, and seeds of tabasco chili pepper fruits show a contrasting diversity of bioactive metabolites. *Metabolites*, 9(10), 206. <https://doi.org/10.3390/metabo9100206>
- DeMan, J. M., Finley, J. W., Hurst, W. J., & Lee, C. Y. (2018). *Principles of food chemistry*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-63607-8>
- Derry, S., Sven-Rice, A., Cole, P., Tan, T., & Moore, R. A. (2013). Topical capsaicin (high concentration) for chronic neuropathic pain in adults. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 28(2), CD007393. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23450576/>
- García Fernández, N. (2018). *Actividad biológica de los principales compuestos bioactivos presentes en Capsicum sp.* [Tesis de pregrado, Universitat de les Illes Balears] <http://dspace.uib.es/xmlui/handle/11201/147267>



- Gordillo, G., & Méndez Jerónimo, O. (2013). *Seguridad y soberanía alimentaria*. FAO. <https://www.fao.org/3/ax736s/ax736s.pdf>
- Granato, D., Katayama, F. C. U., & De Castro, I. A. (2011). Phenolic composition of South American red wines classified according to their antioxidant activity, retail price and sensory quality. *Food Chemistry*, 129(2), 366-373. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2011.04.085>
- Hassan, N. M., Yusof, N. A., Yahaya, A. F., Rozali, N. N. M., & Othman, R. (2019). Carotenoids of *Capsicum* fruits: pigment profile and health-promoting functional attributes. *Antioxidants*, 8(10), 469. <https://doi.org/10.3390/antiox8100469>
- Hernández—Pérez, T., Gómez—García, M. del R., Valverde, M. E., & Paredes—López, O. (2020). *Capsicum annuum* (hot pepper): an ancient Latin—American crop with outstanding bioactive compounds and nutraceutical potential: a review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 2972-2993. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33337034/>
- Hernández-Salinas, G., Arenas-Lozano, A. E., Luna-Cavazos, M., Ramírez-Rivera, E. de J., Purroy-Vásquez, R., Sotelo-Leyva, C., & Castillo-Zamudio, R. I. (2021). Composición proximal en morfotipos de chile Comapeño (*Capsicum annuum* L.) de Oaxaca y Veracruz, México, y su relación con factores climáticos. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 7. <https://doi.org/10.30973/aap/2021.7.0071018>
- Hew, P. S., Jinap, S., Jambari, N. N., Murugesu, S., Sanny, M., Khatib, A., & Sukor, R. (2024). Quality and safety of food product - current assessment, issues, and metabolomics as a way forward. *Food Chemistry Advances*, 4, 100632. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHA.2024.100632>
- Joshi, D. D., Changkija, S., Sujata, W., Somkuwar, B. G., Rana, V. S., & Talukdar, N. C. (2017). Nutraceutical from *Capsicum chinense* fruits in shelf-stable herbal matrix. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 42, 130-137. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.06.006>
- Karaman, K., Pinar, H., Ciftci, B., & Kaplan, M. (2023). Characterization of phenolics and tocopherol profile, capsaicinoid composition and bioactive properties of fruits in interspecies (*Capsicum annuum* x *Capsicum frutescens*) recombinant inbred pepper lines (RIL). *Food Chemistry*, 423, 136173. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2023.136173>
- Kim, E.-H., Lee, S.-Y., Baek, D.-Y., Park, S.-Y., Lee, S.-G., Ryu, T.-H., Lee, S.-K., Kang, H. J., Kwon, O.-H., Kil, M., & Oh, S.-W. (2019). A comparison of the nutrient composition and statistical profile in red pepper fruits (*Capsicum annuum* L.) based on genetic and environmental factors. *Applied Biological Chemistry*, 62, 48. <https://doi.org/10.1186/s13765-019-0456-y>
- Konishi, A., Terabayashi, S., & Itai, A. (2022). Relationship of cuticle development with water loss and texture of pepper fruit. *Canadian Journal of Plant Science*, 102(1), 103-111. <https://cdnsiencepub.com/doi/10.1139/cjps-2021-0031>
- Li, Y., Li, T., Yan, Z., Bariami, W., Wu, C., Yan, S., Fan, G., Li, X., Zhou, D., Cong, K., & Cheng, J. (2024). Carotenoids in berries: composition, benefits, metabolic processes and influencing factors - A review. *Scientia Horticulturae*, 329, 112956. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2024.112956>

- Liu, Z., Cai, S., Zhang, S., Xiao, Y., Devahastin, S., Guo, C., Wang, Y., Wang, T., & Yi, J. (2023). A systematic review on fermented chili pepper products: sensorial quality, health benefits, fermentation microbiomes, and metabolic pathways. *Trends in Food Science & Technology*, 141, 104189. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104189>
- Menzies, D. (2021). *Chest pain perception and capsaicin sensitivity*. National Library of Medicine. <https://clinicaltrials.gov/study/NCT02346916>
- Mi, S., Li, T., Sang, Y., Wang, X., & Duan, Y. (2023). Effect of cold shock precooling on the physicochemical, physiological properties and volatile profiles of chili peppers during postharvest storage. *LWT*, 187, 115300. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115300>
- Moran, N. E. (2024). *Maternal Carotenoids Across Pregnancy Study (MCAPS)*. National Library of Medicine. <https://clinicaltrials.gov/study/NCT06004479?intr=Carotenoid%20%20Intake&rank=2&tab=table>
- Morisson, S. (2022). *Clinical Trial Assessing the Efficacy of Capsaicin Patch (Qutenza®) in Cancer Patients With Neuropathic Pain*. National Library of Medicine. <https://clinicaltrials.gov/study/NCT03317613?intr=-Capsaicin&rank=2#publications>
- Neis, E. R., Covinich, M. M., & Scipioni, G. P. (2022). Polyphenol content, color and acceptability of carrot pickles added with yerba mate powder extract. *Brazilian Journal of Food Technology*, 25, e2021013. <https://doi.org/10.1590/1981-6723.01321>
- Pace, B., Capotorto, I., Cefola, M., Minasi, P., Montemurro, N., & Carbone, V. (2020). Evaluation of quality, phenolic and carotenoid composition of fresh-cut purple Polignano carrots stored in modified atmosphere. *Journal of Food Composition and Analysis*, 86, 103363. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103363>
- Pasierski, M., & Szulczyk, B. (2022). Beneficial effects of capsaicin in disorders of the central nervous system. *Molecules*, 27(8), 2484. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35458680/>
- Penagos-Calvete, D., Guauque-Medina, J., Villegas-Torres, M. F., & Montoya, G. (2019). Analysis of triacylglycerides, carotenoids and capsaicinoids as disposable molecules from *Capsicum* agroindustry. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 60, 227-238. <https://doi.org/10.1007/s13580-018-0111-2>
- Pino, J., González, M., Ceballos, L., Centurion-Yah, A., Trujillo-Aguirre, J., Latournerie-Moreno, L., & Sauri-Duch, E. (2007). Characterization of total capsaicinoids, colour and volatile compounds of Habanero chilli pepper (*Capsicum chinense* Jack.) cultivars grown in Yucatan. *Food Chemistry*, 104(4), 1682-1686. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.12.067>
- Prieto, M., Mouwen, J. M., López Puente, S., & Cerdeño Sánchez, A. (2008). Concepto de calidad en la industria agroalimentaria. *Interciencia*, 33(4), 258-264. <https://www.redalyc.org/pdf/339/33933405.pdf>
- Rugeles, L., Ávila, J., Morales, A., Huertas, A., Guaitero, B., & Bonilla, C. (2010). *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena de hortalizas en Colombia: salsa de ají*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). <https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/fa209c8e-7077-4ddb-ad85-25384fa97473/content>
- Scoville, W. L. (1912). Note on *Capsicum*. *Journal of the American Pharmaceutical Association*, 1, 453-454. <https://www.sizes.com/library/metrhist/scoville.pdf>



- Shechter, M., Xing, B., & Chefetz, B. (2010). Cutin and cutan biopolymers: their role as natural sorbents. *Soil Science Society of America Journal*, 74(4), 1139-1146. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0313>
- Solís-Marroquín, D., Lecona-Guzmán, C. A., Ruiz-Lau, N., Ocampo, P., Rodas-Trejo, J., Gonzáles-Santiago, C., González-Mejía, O., & Gordillo-Páez, L. (2017). Análisis bromatológico de frutos de chile “siete caldos” (*Capsicum annuum*) cultivados en condiciones de cielo abierto y casa sombra. *Agroproductividad*, 10(9), 34-40. <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/249320055.pdf>
- Średnicka-Tober, D., Kopczyńska, K., Góralska-Walczak, R., Hallmann, E., Barański, M., Marszałek, K., & Kazimierczak, R. (2022). Are organic certified carrots richer in health-promoting phenolics and carotenoids than the conventionally grown ones? *Molecules*, 27(13), 4184. <https://doi.org/10.3390/molecules27134184>
- Sutliff, A. K., Saint-Cyr, M., Hendricks, A. E., Chen, S. S., Doenges, K. A., Quinn, K., Westcott, J., Tang, M., Borengasser, S. J., Reisdorph, R. M., Campbell, W. W., Krebs, N. F., & Reisdorph, N. A. (2021). Lipidomics-based comparison of molecular compositions of green, yellow, and red bell peppers. *Metabolites*, 11(4), 241. <https://doi.org/10.3390/metabo11040241>
- Tafolla-Arellano, J. C., González-León, A., Tiznado-Hernández, M. E., Zacarías García, L., & Báez-Sañudo, R. (2013). Composición, fisiología y biosíntesis de la cutícula en plantas. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 36(1), 3-12. <https://revfitotecnia.mx/index.php/RFM/article/view/249>
- Tripathy, S., Verma, D. K., Gupta, A. K., Srivastav, P. P., Patel, A. R., Chávez González, M. L., Utama, G. L., & Aguilar, C. N. (2023). Nanoencapsulation of biofunctional components as a burgeoning nanotechnology-based approach for functional food development: a review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 53, 102890. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2023.102890>
- Vaz, A. A., Odriozola-Serrano, I., Oms-Oliu, G., & Martín-Belloso, O. (2022). Physicochemical properties and bioaccessibility of phenolic compounds of dietary fibre concentrates from vegetable by-products. *Foods*, 11(17), 2578. <https://doi.org/10.3390/foods11172578>
- Villaseñor-Aguilar, M.-J., Bravo-Sánchez, M.-G., Padilla-Medina, J.-A., Vázquez-Vera, J. L., Guevara-González, R.-G., García-Rodríguez, F.-J., & Barranco-Gutiérrez, A.-I. (2020). A maturity estimation of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) by artificial vision system for quality control. *Applied Sciences*, 10(15), 5097. <https://doi.org/10.3390/app10155097>
- Woldemariam, H. W., Admassu Emire, S., Getachew Teshome, P., Toepfl, S., & Aganovic, K. (2021). Physicochemical, functional, oxidative stability and rheological properties of red pepper (*Capsicum annuum* L.) powder and paste. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 1416-1437. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1969945>







Título de la obra

Oportunidades de transformación

Técnica

Ilustración digital con tableta, pincel en textura de carboncillo

Autora

Laura Stefanny López Cortés (Sstefcore)



@sstefcore



Stefanny López

- Capítulo VIII -

Oportunidades de transformación de frutos de *Capsicum* en Colombia

Maira Alejandra Vega Muñoz, Rafael Chamorro, Esteban Castaño Llanos, Juan Camilo Henao-Rojas, Guillermo León Montoya Peláez, Ana Lía Restrepo

*Los frutos de *Capsicum* sp. fueron quizás los más utilizados durante mucho tiempo como ingrediente dietético en la antigua civilización de México y el norte de América del Sur. Los chiles se usaban para aumentar la ingesta de alimentos, a través del aumento de la salivación, el picor y el rubor en la boca debido a su efecto fuerte y estimulante.*

Govindarajan & Sathyanarayana (1991)

El capítulo analiza el mercado global y nacional de *Capsicum* spp., destacando su potencial agroindustrial y comercial como materia prima estratégica para las industrias alimentaria, nutracéutica y farmacológica. A nivel mundial, la producción de fruto fresco alcanzó 38,31 millones de toneladas en 2023, con Asia como líder predominante, mientras que América mantiene una participación menor, lo que representa una oportunidad estratégica para Colombia. En Colombia, la producción

supera las 100.000 toneladas y se concentra en departamentos como Antioquia y Valle del Cauca, consolidando una base para la exportación de ají seco y productos transformados. Este capítulo examina las dinámicas de comercio internacional, los valores unitarios diferenciados y nichos de alto valor, así como cinco categorías de uso: fruto fresco, procesados, especias, ornamentales y extractos industriales como oleorresinas y capsaicinoides. Se resaltan innovaciones en alimentos funcionales y el potencial farmacológico de la capsaicina, junto con el caso empresarial de Hugo Restrepo y Cía., que evidencia la articulación exitosa entre ciencia e industria. Se concluye que la transformación agroindustrial, el aprovechamiento integral de subproductos y el fortalecimiento del fitomejoramiento son claves para aumentar competitividad, mitigar efectos del cambio climático y posicionar la agrobiodiversidad colombiana en mercados de alto valor agregado.



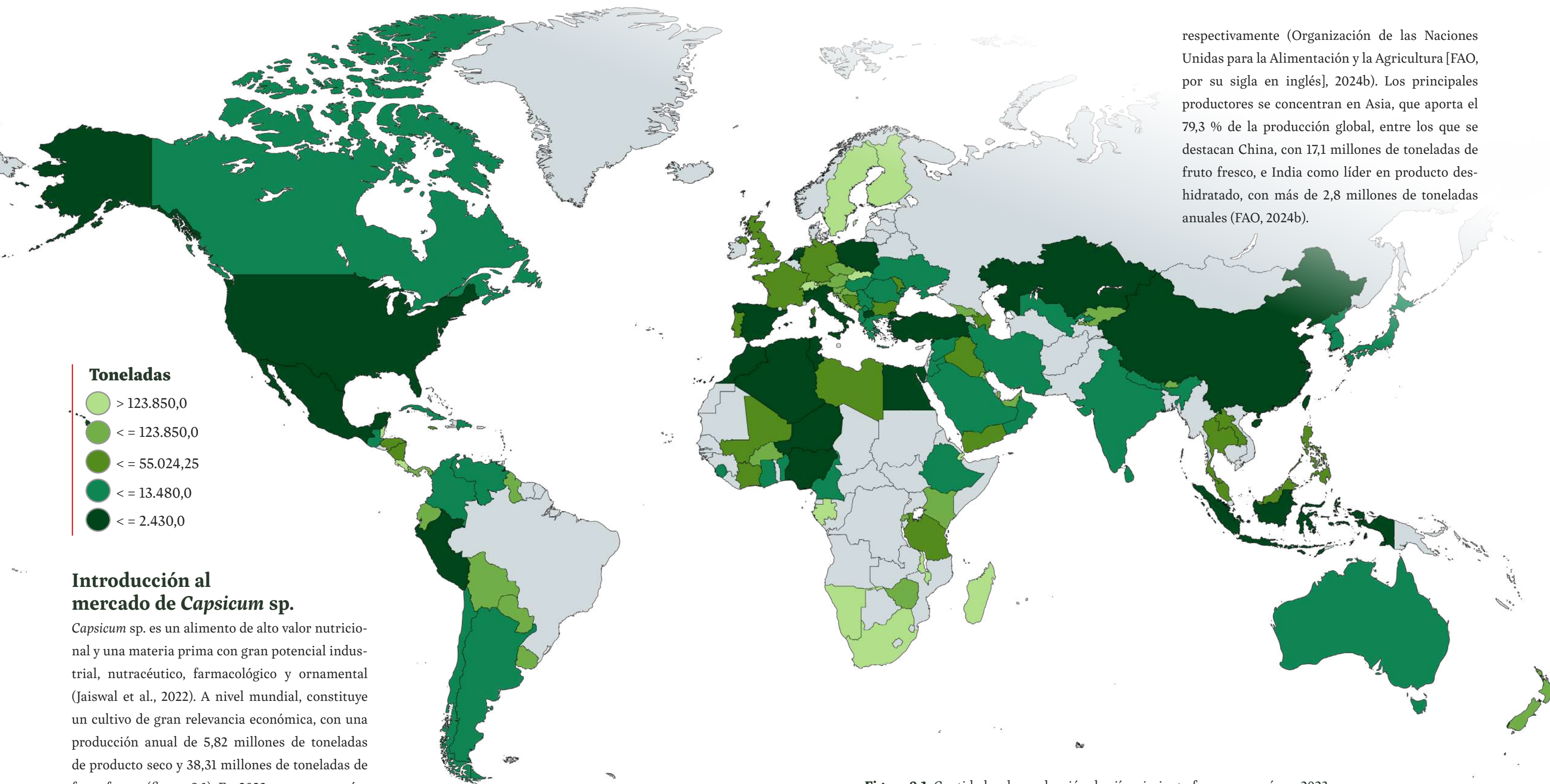


Figura 8.1. Cantidades de producción de ají y pimiento fresco por país en 2023.

Fuente: Elaboración propia con base en FAO (2024b)

En cuanto al comercio internacional, el ají se distribuye por todos los continentes. Los principales importadores de producto deshidratado son Estados Unidos, China y Tailandia (figura 8.2), y en cuanto a fruto fresco son Estados Unidos, Alemania y Reino Unido (FAO, 2024a). Aunque es la especia más consumida del mundo, su producción y su consumo se concentran en pocos países, lo que genera un mercado dominado por los mismos actores (figura 8.3). Sin embargo, existen excepciones notables, como Estados Unidos, destacado importador, y Perú, importante exportador en América del Sur (FAO, 2024a; Xavier & Pérez-Gálvez, 2016). El comercio mundial también refleja diferencias en el valor unitario (tabla 8.1), entre las que se destacan los casos de India y Alemania, por sus altos precios de importación (International Trade Centre, 2025).

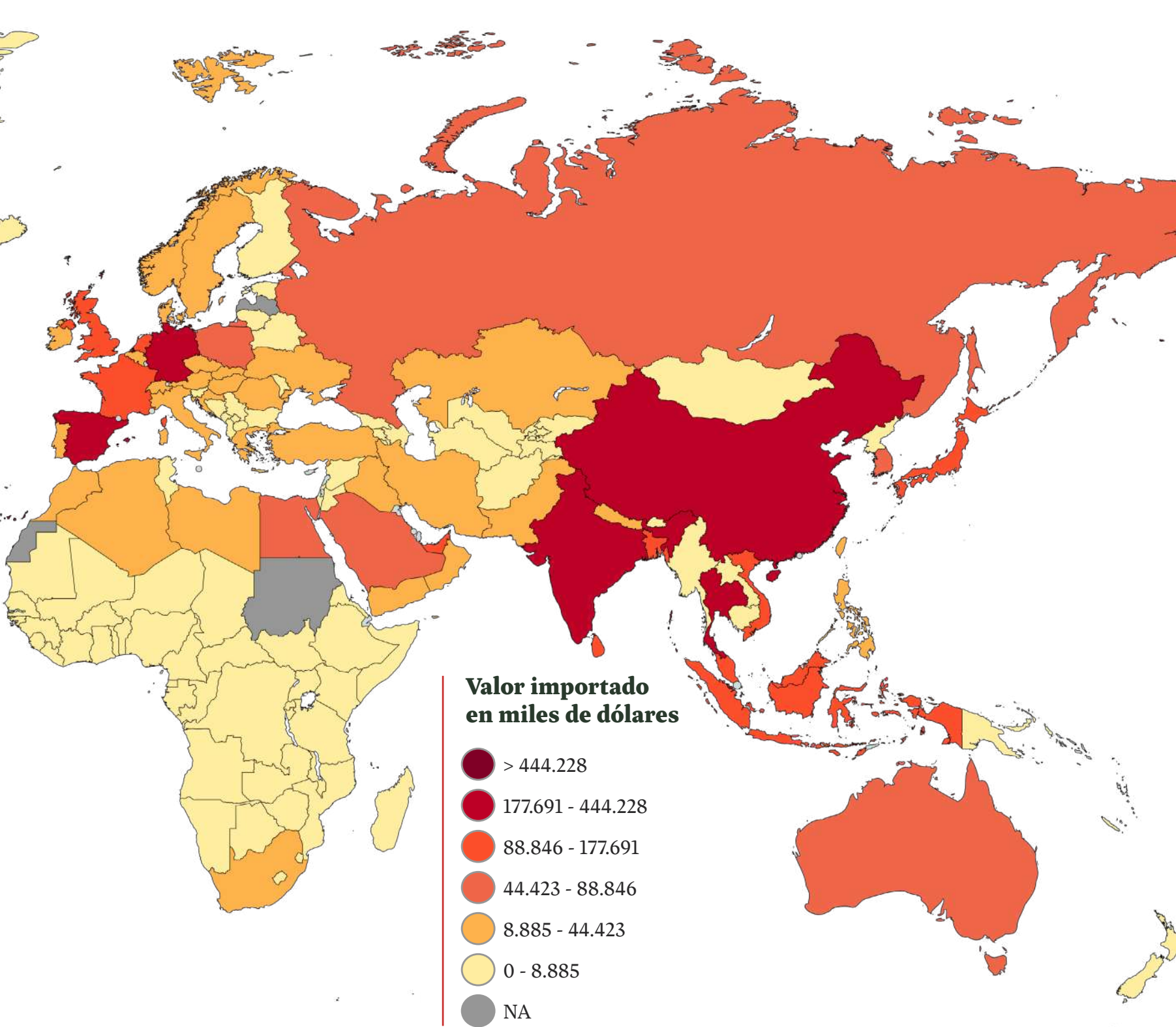


Figura 8.2. Países importadores de frutos del género *Capsicum* (secos, triturados o pulverizados) en 2023.

Fuente: Elaboración propia con base en International Trade Centre (2025)

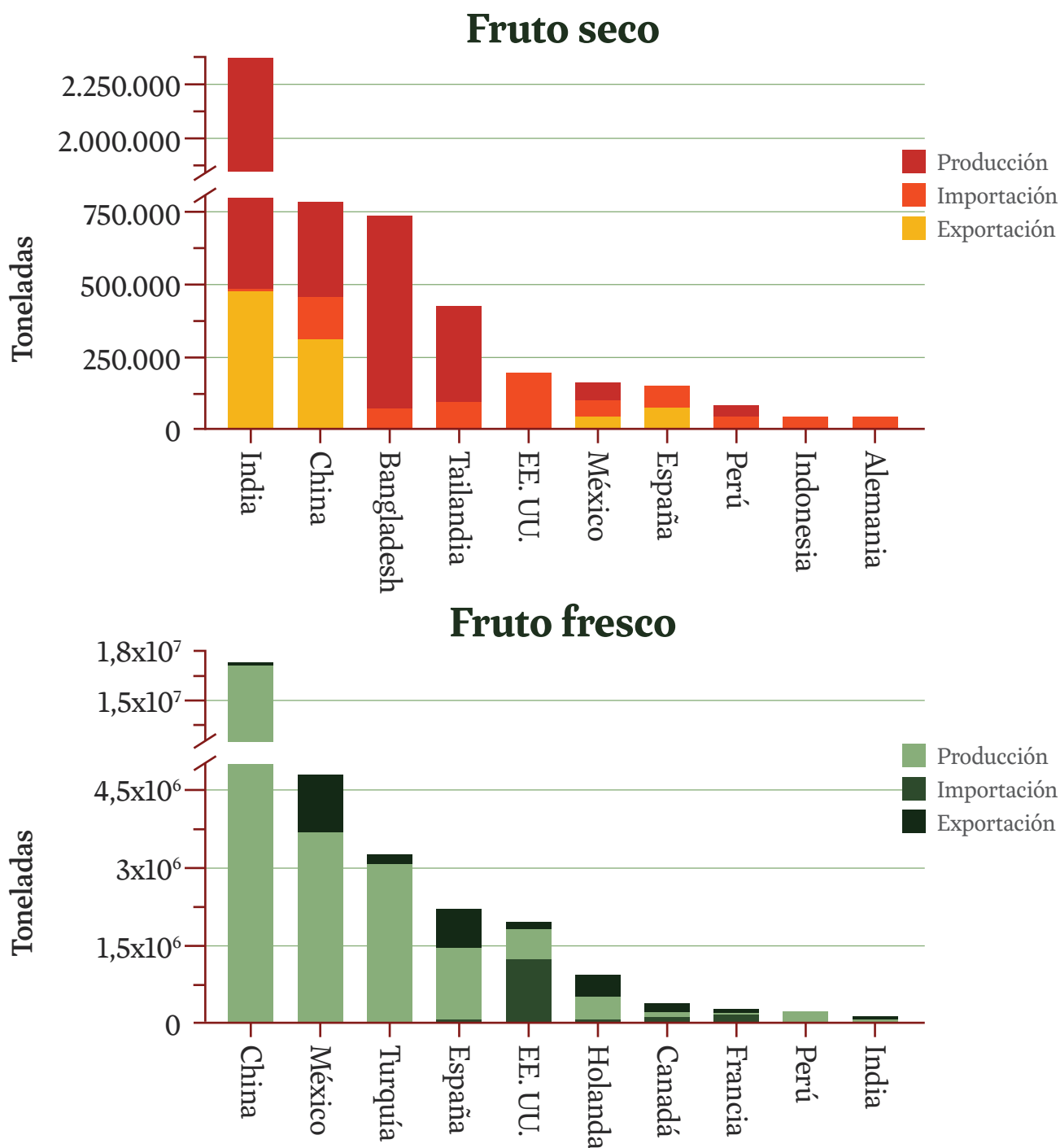


Figura 8.3. Principales países en la producción, importación y exportación de ají y pimientos secos y frescos.

Fuente: Elaboración propia con base en FAO (2024a, 2024b)

Tabla 8.1. Valores en dólares para los principales países importadores de frutos del género *Capsicum* (secos, triturados o pulverizados) en 2023

Importadores	Valor importado en 2023 (miles de USD)	Valor unitario (USD/ unidad)
Estados Unidos	888.458	3.413
China	436.115	2.839
Tailandia	260.938	2.862
Alemania	198.704	4.475
India	178.377	4.387

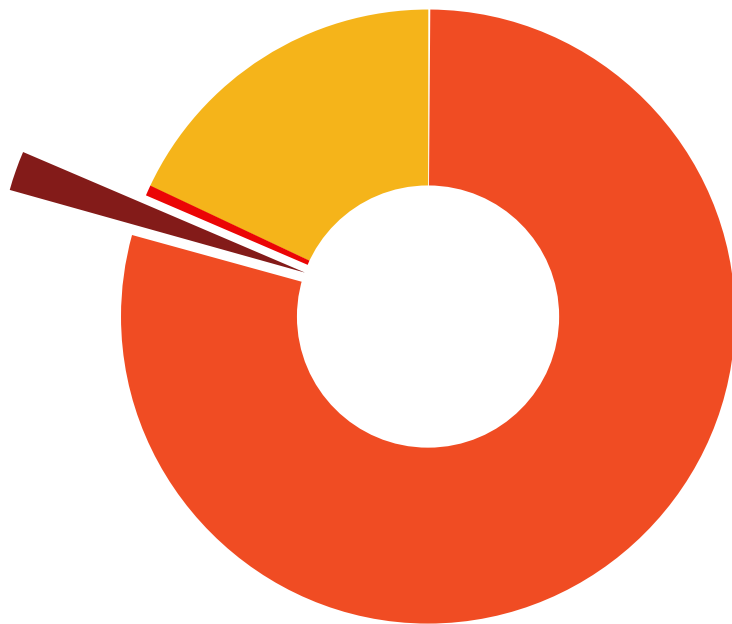
Fuente: Elaboración propia con base en International Trade Centre (2025)

Por su parte, la producción del continente americano mantiene una participación limitada en el mercado global, con apenas 14,2 y 2,1 % del consumo total, y se representa en las categorías de fruto fresco y deshidratado, respectivamente (figura 8.4). Esta baja participación contrasta con las favorables condiciones agroclimáticas de la región, que podrían potenciar la expansión del cultivo y fortalecer su competitividad en los mercados internacionales.



Foto: Esteban Castaño Llanos

Fruto seco



0,56 % Europa 79,32 % Asia
18,03 % África 2,09 % Américas

Fruto fresco



66,00 % Asia 10,48 % África
9,11 % Europa 0,26 % Oceanía
14,15 % Américas

Figura 8.4. Producción de frutos de ají y pimientos frescos y secos de América en el contexto global en 2023.

Fuente: Elaboración propia con base en FAO (2024b)

En este contexto, Colombia ha mostrado un desarrollo sostenido. En 2020, los ingresos del mercado de ají y pimientos alcanzaron los USD 748.239 (Ministerio de Agricultura, 2021). Para 2023, el cultivo se extendió a 238 municipios de 28 departamentos, siendo los más productivos Antioquia, Valle del Cauca, Magdalena, Bolívar, Santander y Norte de Santander, que en conjun-

to aportaron el 80,7 % de la producción nacional (figura 8.5). Ese mismo año, la producción total alcanzó 101.324 toneladas en 8.284 hectáreas, con exportaciones de 3.036,91 toneladas de ají seco y 135,58 toneladas de ají fresco, aunque también se registraron importaciones de 634,07 toneladas de ají seco, triturado o pulverizado (Agronet, 2024; FAO, 2024a, 2024b).

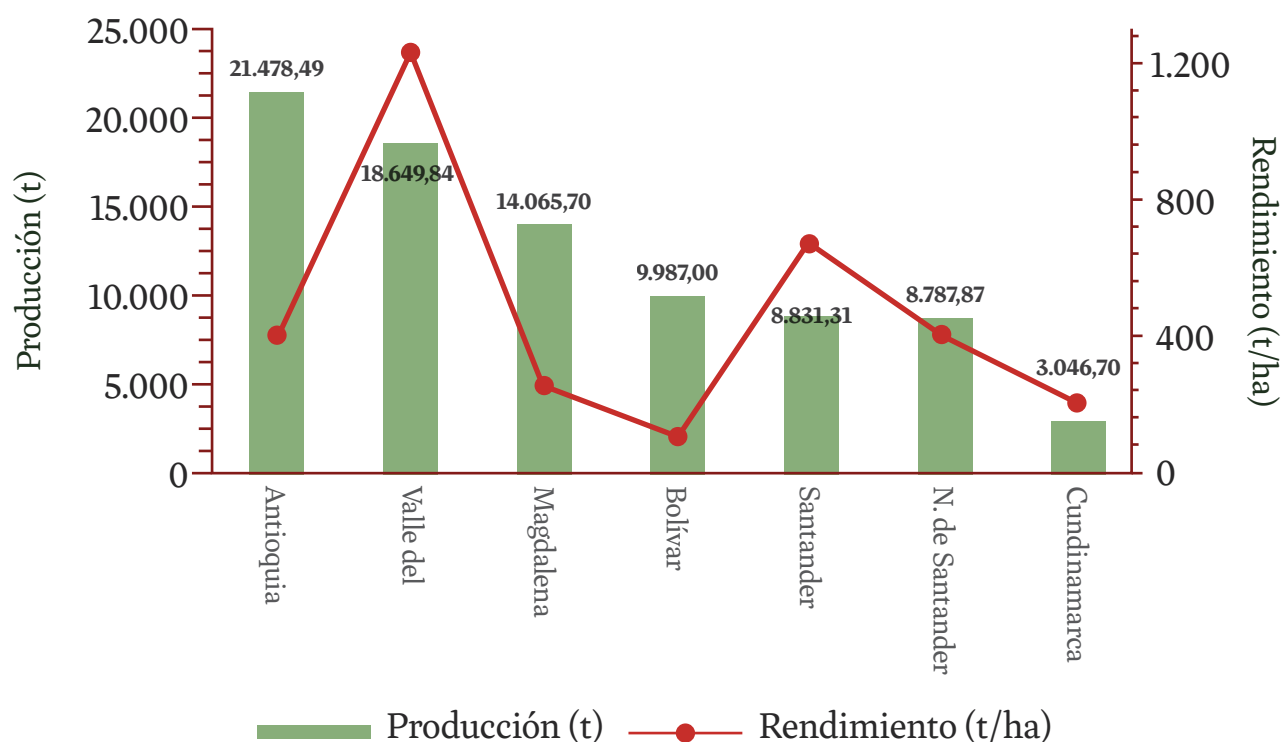


Figura 8.5. Departamentos con mayor producción y rendimiento de *Capsicum* en Colombia en 2023.

Fuente: Elaboración propia con base en Agronet (2024)

A pesar de requerir importaciones, el país ha consolidado una base sólida para la producción de ají seco gracias a los procesos de deshidratación, que preservan las propiedades del fruto y facilitan su almacenamiento, transporte y exportación (Liu et al., 2024). Esta ventaja, sumada a la diversidad genética de Colombia, permiten ofrecer ajís con características únicas que atraen a los compradores internacionales (Valero & Ordoñez, 2020). En el ámbito interno, el consumo aparente en 2021 fue de 33.243 toneladas, con un consumo per cápita de 0,6 kg y un precio de referencia de \$6.500. Este comportamiento, junto con los 350.000 empleos generados en el sector hortícola, demuestra el po-

tencial de crecimiento del mercado nacional (Ortiz Flórez, 2023). En síntesis, Colombia presenta un mercado con alto potencial para satisfacer la demanda nacional e internacional; no obstante, enfrenta desafíos asociados al cambio climático, que afecta la estabilidad productiva y genera pérdidas significativas (Baba et al., 2020). Por otra parte, la creciente presión global por alimentos y la demanda de productos con valor agregado impulsan el avance del fitomejoramiento en *Capsicum*, enfocado en perfeccionar características hortícolas y bioquímicas, así como en el desarrollo de bioproductos derivados del fruto (Tripodi et al., 2021; Srivastava & Mangal, 2019; Tripodi & Kumar, 2019).

Utilidades del fruto

El mercado de *Capsicum* se divide en cinco categorías principales (tabla 8.2): fruto fresco (verde, rojo o multicolor); fruto procesado (salsas, pastas y encurtidos); fruto seco y en polvo (como especia); extractos industriales (oleorresinas, carotenoi-

des y capsaicinoides), y variedades ornamentales (Poulos, 1994). Su dinámica comercial depende en gran medida de las preferencias regionales respecto al picante, y del desarrollo de productos con valor agregado (Srivastava & Mangal, 2019).

Tabla 8.2. Mercados del *Capsicum* y sus características de calidad del fruto

Tipo de mercado	Rasgos de calidad
Productos frescos (verde, rojo, amarillo).	Color, pungencia, forma, tamaño, sabor, espesor del exocarpio.
Procesamiento en fresco (salsa, pasta, enlatado, encurtido).	Color, pungencia, sabor, espesor del pericarpio.
Espicias secas (en polvo, fruto entero).	Color, pungencia, sabor, longitud, materia seca, bajo contenido de fibra cruda.
Oleorresina	Aceite con color o pungencia.
Ornamental de plantas y frutos.	Diversidad de colores, tamaño, porte bajo.

Fuente: Elaboración propia con base en Mohan Rao y Anilkumar (2020)

Los frutos de *Capsicum* se clasifican en ajís picantes y pimentones dulces. En los ajís se valoran el tamaño medio, alta pungencia, color rojo brillante, pocas semillas, pericarpio delgado y buena adherencia del cáliz, atributos que elevan su precio. Su clasificación depende del contenido de capsaicinoides: suaves (60-133 µg/g), medios (134-1.333), picantes (1.333-6.600) y extra picantes (> 6.600) (Jalgaonkar et al., 2024). En los pimentones, se prefieren frutos grandes, de forma cuadrada, con pericarpio grueso, colores brillantes (verde, rojo, amarillo o naranja) y alto contenido de antioxidantes y vitaminas (Srivastava & Mangal, 2019).

Para el fruto seco, se busca bajo contenido de humedad ($< 10\%$), pericarpio delgado y alto contenido de sólidos, que faciliten el secado y mantengan buena apariencia, además de un fácil desprendimiento del pedúnculo, ideal para exportación (Jalgaonkar et al., 2024; Srivastava & Mangal, 2019).

En el segmento del pimiento ornamental, su cultivo se realiza con fines decorativos o para jardines de especias y plantas aromáticas. Su valor radica en atributos estéticos y agronómicos, como el follaje contrastante; frutos de colores intensos y variados; rápido crecimiento; precocidad; tolerancia al calor y la sequía, y alto rendimiento por planta. Además, se aprecian su facilidad de propagación, tamaño compacto y diversidad de formas, factores determinantes para consumidores y comercializadores (Ramalho do Rêgo et al., 2018).

A pesar del crecimiento del mercado de *Capsicum* en sus diversas formas, incluidos los pimientos ornamentales, el sector enfrenta pérdidas del 5 al 30 % de la producción total, incluyendo subproductos y frutos descartados durante el procesamiento industrial (Baenas et al., 2019). Sin embargo, estos residuos, como cáscaras, tallos, semillas, pulpa y hasta frutos, representan una fuente valiosa para obtener productos de alto valor agregado, como oleorresinas y otros derivados con aplicaciones farmacéuticas e industriales.

Así mismo, la valorización de los subproductos de *Capsicum* abre oportunidades para reducir pérdidas y fomentar la sostenibilidad en la cadena productiva. En este sentido, Colombia ha avanzado mediante el procesamiento del fruto fresco, con el fin de generar productos de valor agregado, como salsas, encurtidos y mezclas innovadoras, elaboradas por marcas como Codi, ¡Ay, María!, El Robledal, Cocina Intuitiva y Sunny and Tasty (Guerrero, 2024). Estas iniciativas evidencian la capacidad del país para transformar el fruto en productos competitivos, para contrarrestar así las pérdidas en la cadena comercial y fortalecer su presencia en los mercados nacional e internacional.

Algunas variedades de interés en el mercado internacional sembradas en Colombia

En este apartado, se detallan las variedades de mayor impacto en la cadena productiva actual, destacando sus atributos morfológicos y su procedencia taxonómica:

» **Habanero:** perteneciente a *Capsicum chinense*, es una de las variedades más picantes del mundo (figura 8.6). Destaca por su aroma a frutas maduras y su sabor picante afrutado. Muy popular en México, Centroamérica y el Caribe, es ideal para salsas, aderezos y pasabocas intensos (Hugo Restrepo y Cía., 2021).





Figura 8.6. Aspecto del ají habanero.

Fotos: Hugo Restrepo y Cía.

» **Jalapeño:** variedad de *Capsicum annuum* con pungencia media y aroma característico (figura 8.7). Originario de Xalapa (México), es uno de los ajís



Figura 8.7. Aspecto del ají jalapeño.

Fotos: Hugo Restrepo y Cía.

» **Cayena:** también llamada pimienta de cayena, pertenece a *C. annuum* (figura 8.8). Es un arbusto de hasta un metro de altura que produce frutos alargados de unos quince



más reconocidos globalmente, por su versatilidad en la gastronomía y amplia aceptación en distintos mercados alimentarios (Hugo Restrepo y Cía., 2021).



centímetros, que se emplean deshidratados y molidos, con el fin de obtener la conocida pimienta cayena, muy valorada como especia (Hugo Restrepo y Cía., 2021).



Figura 8.8. Aspecto del ají cayena.

Fotos: Hugo Restrepo y Cía.

Algo más que salsa: formulaciones o productos comerciales

El aprovechamiento de *Capsicum* va más allá de las categorías tradicionales, impulsado por tendencias emergentes como la biotecnología y los procesos de extracción avanzada, que permiten desarrollar productos con alto valor nutracéutico, farmacológico e industrial. Empresas innovadoras están adoptando estas tecnologías para optimizar la producción y diversificar sus mercados.

La versatilidad del género se refleja en su incorporación a productos como jaleas, gomitas, chocolates, pasabocas, cervezas artesanales, aceites, vinagres aromatizados y salsas con combinaciones únicas (Ri-

beiro et al., 2019). En el sector cervecero, por ejemplo, destacan creaciones internacionales como Habanero Sculpin, Teotihuacan, Mexican Cake o Fatali Four, que incorporan chiles frescos o secos, lo que evidencia su potencial para la innovación en alimentos y bebidas (Generación M / Bloomberg, 2019).

En el ámbito farmacológico, *Capsicum* se utiliza por sus propiedades analgésicas y moduladoras de procesos biológicos (tablas 8.3 y 8.4), de manera que se consolida como una prometedora alternativa natural para el desarrollo de formulaciones terapéuticas.



Tabla 8.3. Algunas formulaciones o productos comerciales a base de *Capsicum* con uso analgésico

Nombre	Ingrediente	Usos	Administración	Referencia
Parche de calor CVS	Ají (<i>C. annuum</i>).	Alivio temporal de dolores musculares y de las articulaciones: distensiones, artritis, dolor de espalda leve, hematomas y esguinces.	Parche de uso tópico, se aplica en el área afectada de 3 a 4 veces al día sin exceder las 8 h de uso.	CVS.com (s. f.), Yuca (2022).
Qutenza 179 mg (parche cutáneo).	Capsaicina.	Indicado para el tratamiento del dolor neuropático periférico en adultos, solo o en combinación con otros medicamentos para el tratamiento del dolor.	Uso cutáneo; aplicar en piel intacta, no irritada y seca, en zonas más dolorosas (utilizando un máximo de 4 parches) entre 30 y 60 min (prescripción médica) con repetición cada 90 días si el dolor persiste.	Pérez de la Fuente y Cárcamo Hermoso (2021).
Hysan Deguo Porous <i>Capsicum</i> (yeso).	Ají (<i>C. annuum</i>).	Se utiliza para aliviar temporalmente dolores menores de músculos y articulaciones relacionados con esguinces, artritis, hematomas, dolores de espalda simples y distensiones.	Uso de forma tópica.	FDA.report (s. f.), Yuca, 2022).
SinolM (aerosol nasal).	Ají (<i>C. annuum</i>).	Proporciona un alivio rápido del dolor de cabeza y migraña, así como de dolor tensional, premenstrual, menstrual y sinusal.	Se debe agitar el frasco antes de cada uso. Se rocía una o dos veces en cada fosa nasal y se inhala profundamente hasta la cavidad nasal. Si el dolor de cabeza es intenso, se puede utilizar dos o tres veces según las indicaciones.	Walmart (s. f.-b), Yuca (2022).
Producto en desarrollo: CNTX-4975 (inyección intraarticular).	Capsaicina.	Indicado para el tratamiento de osteoartritis (OA) crónica, de moderada a grave; dolor de rodilla asociado, y dolor asociado con el neuroma de Morton.	Inyección de 0,5 mg o 1,0 mg; estudiado como una inyección única o administrado cada 6 meses.	Campbell et al. (2021), Zhang et al. (2021).
Extra Strength Balm (ungüento).	Extracto de ají.	Alivio específico, duradero y estimulante para dolores y molestias, desde dolor de cuello hasta artritis, esguinces y hematomas.	Aplicar sobre la zona dolorosa y masajear hasta absorción.	Saje Natural Wellness (s. f.).
Pastillas sin azúcar Fisherman’s Friend.	Pimiento (<i>C. annuum</i>).	Alivio a corto plazo de la congestión nasal, el dolor de garganta y la tos.	Una pastilla cada 2 horas según sea necesario.	Walmart (s. f.-a).

Fuente: Elaboración propia con base en DrugBank (s. f.).

Tabla 8.4. Actividades biológicas de *Capsicum*

Actividades	Modelos	Compuesto bioactivo
Efecto antimicrobiano.	<i>Micrococcus</i> sp. (20 mm), <i>Bacillus</i> (10 mm), <i>Escherichia coli</i> (17 mm), <i>Pseudomonas</i> sp. (16 mm) y <i>Citrobacter</i> sp. (15 mm).	Capsaicina.
	<i>Salmonella typhimurium</i> y <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .	Capsaicina.
	<i>Staphylococcus aureus</i> UFPEDA02, <i>Enterococcus faecalis</i> ATCC6057, <i>Bacillus subtilis</i> UFPEDA 86 y bacterias Gram negativas (<i>E. coli</i> ATCC25922, <i>Klebsiella pneumoniae</i> ATCC29665, <i>P. aeruginosa</i> UFPEDA416) y una cepa de levadura (<i>Candida albicans</i> UFPEDA 1007).	CAY-1 saponina.
	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , <i>Candida albicans</i> , <i>Candida parapsilosis</i> , <i>Candida tropicalis</i> , <i>Pichia membranifaciens</i> , <i>Kluyveromyces marxianus</i> , <i>Candida guilliermondii</i> , <i>Aspergillus flavus</i> y <i>Aspergillus niger</i> .	Péptido obtenido de semillas <i>Capsicum frutescens</i> .
Efecto antivírico.	Virus de herpes cutáneo en conejillo de indias.	Capsaicina.
Efectos insecticidas, antihelmínticos y larvicidas.	Mosquitos <i>Aedes aegypti</i> .	Extracto de <i>C. frutescens</i> .
	Cercaria de <i>Schistosoma mansoni</i> .	Extractos de hojas de <i>C. annum</i> .
Propiedades antiinflamatorias.	Inflamación de la pata trasera de rata inducida por inyecciones subplantares de albúmina de huevo fresca (0,5 ml/kg).	Extracto de acetato de etilo de <i>C. frutescens</i> .
Efectos cardiovasculares	Perros anestesiados con inyecciones intravenosas.	Capsaicina.
Propiedades antitrombóticas y vasodilatadoras	Conejos con una dieta rica en colesterol (1 %) y ají (1 %).	Ají.

Fuente: Elaboración propia con base en Batiha et al. (2020)

Además de su uso en alimentos y formulaciones farmacéuticas, el aprovechamiento de *Capsicum* se extiende a la obtención de subproductos de alto valor, entre los que destaca la oleorresina. Este extracto se obtiene mediante procesos con solventes orgánicos o tecnologías avanzadas, como ultrasonido, microondas y fluidos supercríticos, que mejoran la concentración de compuestos bioactivos (Bae et al., 2012). Sin

embargo, su implementación en países como Colombia enfrenta desafíos por los altos costos y los requerimientos tecnológicos (Melgar-Lallanne et al., 2017). A pesar de ello, la oleorresina mantiene una alta demanda internacional, especialmente en la industria, en la que se emplea como colorante, saborizante y en diversos productos procesados, incluso gases antidisturbios (Feiner, 2006; Pejchal, 2020).

Una historia del picante en el Valle del Cauca y Colombia: Hugo Restrepo y Cía., más de 45 años apostando por el agro colombiano

Hugo Restrepo y Cía. es una empresa familiar del Valle del Cauca, fundada en 1976 y con sede principal en Yumbo, que ha expandido sus operaciones hasta Perú. Se especializa en la producción y comercialización de pastas y productos deshidratados de ají, orientados principalmente a la industria alimentaria nacional e internacional. Sus mercados más importantes incluyen Estados Unidos, Europa, Medio Oriente y Colombia, con un 98 % de su producción destinada a la exportación. Entre las variedades procesadas destacan jalapeño, cayena, habanero y tabasco, las cuales son formuladas en distintas presentaciones, según los requerimientos del cliente (Hugo Restrepo y Cía., 2021).

La empresa mantiene un firme compromiso con la investigación, el desarrollo y la sostenibilidad, con miras a mejorar la eficiencia productiva, fomentar la innovación mediante productos no tradicionales y diversi-

ficar su portafolio con materias primas derivadas del ají, para generar además un impacto social positivo en las zonas de cultivo. Estas acciones se integran en una estrategia orientada a la protección ambiental y la mitigación del cambio climático (Hugo Restrepo y Cía., 2021). En este marco, la compañía se ha consolidado como un aliado clave en la articulación academia-empresa, participando en iniciativas del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación en favor del fortalecimiento de la bioeconomía del país. Por esta razón, ha sido un aliado estratégico en el estudio del Banco de Germoplasma Vegetal para la Alimentación y la Agricultura de la Nación Colombiana.

Modelo de negocio

El modelo de negocio de la compañía Hugo Restrepo y Cía. se fundamenta en la firma de contratos agrícolas con pequeñas asociaciones o agricultores tanto



en Colombia como en Perú. Mediante estos acuerdos, se establece una relación estrecha con los agricultores, en la cual se fija un precio por kilogramo para la totalidad de las cosechas. Además, la compañía proporciona las semillas y ofrece un acompañamiento técnico detallado, todo con el fin de satisfacer las necesidades específicas de cada plantación y asegurar que se cumplan las exigencias de calidad y las demandas del mercado (Hugo Restrepo y Cía., 2021).

En dicho escenario, para 2024 la compañía contaba con 99 agricultores contratados y 250 hectáreas sembradas en 6 regiones de Colombia, lo que impacta económicamente a unas 300 familias y a cerca de 1.200 personas (Hugo Restrepo y Cía., 2021).

Origen y consolidación empresarial de Hugo Restrepo y Cía.

La empresa Hugo Restrepo y Cía. fue fundada por Hugo Restrepo Ramírez, economista egresado de la Universidad Nacional de Colombia y especializado en Finanzas en la Universidad de Stanford (Estados Unidos). Su trayectoria académica y profesional incluyó cargos como rector de la Universidad del Valle 1971, vicepresidente financiero de la Corporación Financiera del Valle y miembro de la junta directiva de Andesat, empresa promotora del sistema satelital andino (Hugo Restrepo y Cía., 2021).

A partir de su experiencia en el sector agrícola y financiero, identificó el potencial productivo del cultivo de ají en Colombia, lo que condujo a la crea-

ción de Hugo Restrepo y Cía. y Capsicum Andino (Hugo Restrepo y Cía., 2021). En más de cuatro décadas, la compañía evolucionó de un proyecto de evaluación agrícola desarrollado en el Valle del Cauca, en colaboración con McIlhenny Co., hacia un modelo empresarial orientado a la sostenibilidad, basado en la optimización de prácticas agrícolas, el fortalecimiento del conocimiento técnico de los productores y la integración del cultivo de *Capsicum* en estrategias de desarrollo rural sostenible.

Estrategias empresariales y adaptación al mercado de *Capsicum*

El éxito empresarial de Hugo Restrepo y Cía. se fundamenta en cinco ejes estratégicos: i) la selección de variedades adaptadas al mercado y a las condiciones agroclimáticas locales; ii) la implementación de prácticas agrícolas sostenibles y tecnológicamente avanzadas, como la agricultura de precisión; iii) la diversificación de canales de comercialización y exportación hacia mercados de alta demanda; iv) el establecimiento de alianzas estratégicas con instituciones académicas, gubernamentales y productivas para fortalecer la innovación y el acceso a nuevos mercados, y v) la actualización continua frente a tendencias de consumo y regulaciones internacionales, con énfasis en la producción sostenible y el cumplimiento de estándares de calidad.

En conjunto, estas estrategias han permitido a la empresa consolidar un modelo de negocio sostenible, competitivo y alineado con las dinámicas globales del sector agroindustrial del *Capsicum*.



Reflexión

Las oportunidades de transformación de la materia prima del *Capsicum* son bastante amplias, de acuerdo con lo expuesto hasta este punto. Los casos de éxito cobran una especial relevancia al servir de ejemplo para la agroindustria, en la cual se pueden difuminar las estrategias de negocio que carecen de un factor diferenciador. Por lo anterior, es vital unir los diferentes eslabones de la cadena de producción primaria, pasando por la transformación y culminando con la comercialización.

Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Referencias

- Agronet. (2024). *Base agrícola EVA de 2019 a 2023 [archivo Excel]. Reporte: evaluaciones agropecuarias - EVA y Anuario Estadístico del Sector Agropecuario*. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=59>
- Baba, V. Y., Powell, A. F., Ivamoto-Suzuki, S. T., Pereira, L. F. P., Vanzela, A. L. L., Giacomini, R. M., Strickler, S. R., Mueller, L. A., Rodrigues, R., & Gonçalves, L. S. A. (2020). Capsidiol-related genes are highly expressed in response to *Colletotrichum scovillei* during *Capsicum annuum* fruit development stages. *Scientific Reports*, 10(1), 12048. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68949-5>
- Bae, H., Jayaprakasha, G. K., Jifon, J., & Patil, B. S. (2012). Variation of antioxidant activity and the levels of bioactive compounds in lipophilic and hydrophilic extracts from hot pepper (*Capsicum* spp.) cultivars. *Food Chemistry*, 134(4), 1912-1918. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2012.03.108>
- Baenas, N., Belović, M., Ilic, N., Moreno, D. A., & García-Viguera, C. (2019). Industrial use of pepper (*Capsicum annuum* L.) derived products: technological benefits and biological advantages. *Food Chemistry*, 274, 872-885. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2018.09.047>
- Batiha, G. E. S., Alqahtani, A., Ojo, O. A., Shaheen, H. M., Wasef, L., Elzeiny, M., Ismail, M., Shalaby, M., Murata, T., Zaragoza-Bastida, A., Rivero-Pérez, N., Beshbishy, A. M., Kasozi, K. I., Jeandet, P., & Hetta, H. F. (2020). Biological properties, bioactive constituents, and pharmacokinetics of some *Capsicum* spp. and capsaicinoids. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(15), 5179. <https://doi.org/10.3390/IJMS21155179>
- Campbell, J. N., Stevens, R., Hanson, P., Connolly, J., Meske, D. S., Chung, M. K., & Lascelles, B. D. X. (2021). Injectable Capsaicin for the management of pain due to osteoarthritis. *Molecules*, 26(4), 778. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES26040778>
- Dailymed. (s. f.). *CVS Health Capsicum Treatment Medicated Heat Patch, Large*. <https://dailymed.nlm.nih.gov/dailymed/fda/fdaDrugXsl.cfm?setid=74758792-aa41-4e89-97c9-8a801ab2dd9a>
- DrugBank. (s. f.). *Capsicum*. DrugBank. <https://go.drugbank.com/drugs/DB10897>
- El Mostrador. (2019, mayo 2). *La nueva tendencia mundial en cervezas artesanales: elaboradas con ají*. <https://www.elmostrador.cl/generacion-m/2019/05/02/la-nueva-tendencia-mundial-en-cervezas-artesanales-elaboradas-con-aji/>
- FDA.report. (s. f.). *Hysan Deguo Porous Capsicum-capsicum plaster*. <https://fda.report/DailyMed/e8eda611-1b22-4d1b-81e5-12afe3607777>
- Feiner, G. (2006). *Meat products handbook: practical science and technology*. Woodhead. https://ibf.iuh.edu.vn/wp-content/uploads/2020/04/G.-Feiner-Meat-Products-Handbook_-Practical-Science-and-Technology-Woodhead-Publishing-in-Food-Science-Technology-and-Nutrition-2006.pdf
- Govindarajan, V. S., & Sathyanarayana, M. N. (1991). *Capsicum* - production, technology, chemistry, and quality. Part V. Impact on physiology, pharmacology, nutrition, and metabolism; structure, pungency, pain, and desensitization sequences. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 29(6), 435-474. <https://doi.org/10.1080/10408399109527536>

- Guerrero, D. (2024, enero 26). *Ajíes colombianos, la industria del dulce picor*. 7 Canibales. <https://www.7canibales.com/despensa/ajies-colombianos-la-industria-del-dulce-picor/>
- Hugo Restrepo y Cía. (2021). *Hugo Restrepo: ají en pasta como ingrediente para la industria alimentaria*. <https://hugorestrepo.com/>
- International Trade Centre. (2025). *Lista de los países importadores para el producto seleccionado en 2023: Producto 0904 - Pimienta del género “Piper”; frutos de los géneros “Capsicum” o “Pimenta”, secos, triturados o pulverizados*. https://www.trademap.org/Country_SelProduct.aspx?nvpm=3%7c%7c%7c%7c%7c0904%7c%7c%-7c4%7c1%7c1%7c1%7c1%7c1%7c2%7c3%7c1%7c1
- Jaiswal, V., Rawoof, A., Gahlaut, V., Ahmad, I., Chhakekar, S. S., Dubey, M., & Ramchiary, N. (2022). Integrated analysis of DNA methylation, transcriptome, and global metabolites in interspecific heterotic *Capsicum* F1 hybrid. *IScience*, 25(11), 105318. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2022.105318>
- Jalgaonkar, K., Mahawar, M. K., Girijal, S., & Hp, G. (2024). Post-harvest profile, processing and value addition of dried red chillies (*Capsicum annum* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 61(2), 201-219. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38196718/>
- Liu, M., Hu, L., Deng, N., Cai, Y., Li, H., Zhang, B., & Wang, J. (2024). Effects of different hot-air drying methods on the dynamic changes in color, nutrient and aroma quality of three chili pepper (*Capsicum annum* L.) varieties. *Food Chemistry*, 10(22), 101262. <https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2024.101262>
- Melgar-Lalanne, G., Hernández-Álvarez, A. J., Jiménez-Fernández, M., & Azuara, E. (2017). Oleoresins from *Capsicum* spp.: extraction methods and bioactivity. *Food and Bioprocess Technology*, 10(1), 51-76. <https://doi.org/10.1007/S11947-016-1793-Z>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2021). *El gobierno nacional logró que Colombia exporte pimentones y ají a Estados Unidos*. <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/El-Gobierno-Nacional-logr%C3%B3-que-Colombia-exporte-pimentones-y-aj%C3%AD-a-Estados-Unidos%E2%80%8B.aspx>
- Mohan Rao, A., & Anilkumar, C. (2020). Conventional and contemporary approaches to enhance efficiency in breeding chilli/hot pepper. *Accelerated Plant Breeding*, 2, 223-269. <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/1D0E5vZl/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2024a). *Faostat: Datos de comercio de cultivos y productos de ganadería*. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/TCL>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2024b). *Faostat: Datos de producción de cultivos y productos de ganadería*. <https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Ortiz Florez, S. A. (2023, enero). *Contexto de cadena: hortalizas - Ají*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). <https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/ad18855a-d8df-47dd-9781-02422ae91343/content>
- Pejchal, J. (2020). Riot control agents. En R. C. Gupta (Ed.), *Handbook of toxicology of chemical warfare agents* (pp. 171-196). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819090-6.00012-X>
- Pérez de la Fuente, T., & Cárcamo Hermoso, C. (2021). El parche de capsaicina: una nueva herramienta para el tratamiento del dolor neuropático tras cirugía mamaria. *Revista de Senología y Patología Mamaria*, 34(4), 244-246. <https://doi.org/10.1016/J.SENOL.2020.05.009>

- Poulos, J. (1994). Pepper breeding (*Capsicum spp.*): achievements, challenges and possibilities. *Plant Breed*, 64, 143-155. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19941603579>
- Ramvalho do Rêgo, E., Monteiro do Rêgo, M., & Do Rêgo, E. R. (2018). *Ornamental pepper*. En Van Huylenbroeck, J. (Eds.), *Ornamental Crops. Handbook of Plant Breeding* (Vol. 11, pp. 529-565). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90698-0_22
- Ribeiro, C., Reifschneider, F., Carvalho, S., Bianchetti, L., & Buso, G. (2019). Embrapa's *Capsicum* breeding program - Looking back... into the Future. *Crop Breeding, Genetics and Genomics*, 2(1), e200001. <https://doi.org/10.20900/CBGG20200001>
- Saje Natural Wellness. (s. f.). *Extra strength balm warming. Pain relief ointment*. <https://www.saje.com/en-io/products/extra-strength-warming-balm>
- Srivastava, A., & Mangal, M. (2019). *Capsicum breeding: history and development*. En N. Ramchiary, & C. Kole (Eds.), *The capsicum genome: compendium of plant genomes* (pp. 25-55). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97217-6_3
- Tripodi, P., & Kumar, S. (2019). *The Capsicum crop: an introduction*. En N. Ramchiary, & C. Kole (Eds.), *The Capsicum genome: compendium of plant genomes* (pp. 1-8). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97217-6_1
- Tripodi, P., Rabanus-Wallace, M. T., Barchi, L., Kale, S., Esposito, S., Acquadro, A., Schafleitner, R., Van Zonneveld, M., Prohens, J., Diez, M. J., Börner, A., Salinier, J., Caromel, B., Bovy, A., Boyaci, F., Pasev, G., Brandt, R., Himmelbach, A., Portis, E., ... Stein, N. (2021). Global range expansion history of pepper (*Capsicum spp.*) revealed by over 10,000 genebank accessions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(34), e2104315118. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34400501/>
- Valero, E., & Ordóñez, J. G. (2020). *Diagnóstico de la competitividad del mercado del ají en Colombia* [Tesis de pregrado, Colegio de Estudios Superiores de Administración]. Repositorio CESA. <https://repository.cesa.edu.co/server/api/core/bitstreams/29e610cc-8f5e-4b6e-b257-c011a2d7d905/content>
- Walmart. (s. f.-a). *Fisherman's Friend sugar free cherry menthol cough suppressant lozenges, 40 count*. <https://www.walmart.com/ip/Fisherman-s-Friend-Sugar-Free-Cherry-Menthol-Cough-Suppressant-Lozenges-40-Count/101907157>
- Walmart. (s. f.-b). *Sinol - Sinol-M All-Natural Allergy/Sinus Nasal Spray with MucoAd - 15 ml*. <https://www.walmart.com/ip/Sinol-Sinol-M-All-Natural-Allergy-Sinus-Nasal-Spray-with-MucoAd-15-ml/27230130>
- Xavier, A. A. O., & Pérez-Gálvez, A. (2016). Peppers and Chilies. En B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of food and health* (pp. 301-306). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00533-X>
- Yuca, H. (2022). *Capsicum annuum L.* En M. İlhan, T. Belwal, G. Dereli, & F. Tuğçe (Eds.), *Novel drug targets with traditional herbal medicines: scientific and clinical evidence* (pp. 95-108). Springer. https://teaharora.victoria.ac.nz/discovery/fulldisplay?docid=alma99181136569702386&context=L&vid=64VUW_INST:VUWNUI&lang=en&adaptor=Local%20Search%20Engine
- Zhang, R., Muzzio, K., & Dragici Luciani, L. (2021). Analgesics of the future: novel capsaicin formulation CNTX-4975. *Practical Management of Pain*, 21(4). <https://www.medcentral.com/meds/novel-capsaicin-formulation-cntx-4975>





Título de la obra

Costos de producción

Técnica

Ilustración digital con tableta, pincel en
textura de carboncillo

Autora

Laura Stefanny López Cortés (Sstefcore)



@sstefcore



Stefanny López

- Capítulo IX -

Costos de producción para *Capsicum* spp. en Colombia

Carolina Zuluaga Mejía y Ana Lía Restrepo

El capítulo presenta el análisis de costos de producción para tres parcelas de *Capsicum* spp. ubicadas en Antioquia, Valle del Cauca y Cauca, con distintos niveles de tecnificación y propósitos productivos. Solo la parcela del Cauca tuvo fines comerciales, lo que permitió realizar un flujo de caja. Se diferencian costos fijos, variables y de depreciación de activos. Los costos fueron clasificados por mano de obra, insumos, materiales, herramientas, análisis y administración. En el caso del Valle del Cauca, con cultivo a campo abierto y riego por goteo, el flujo de caja proyectado a cinco años mostró una TIR del 40 %, VPN

positivo (\$49,8 millones) y una relación beneficio-costo de 1,2, reflejando alta rentabilidad con una tasa de descuento del 20 %. Los costos por kilogramo fueron de \$1.092 en Valle, \$4.230 en Rionegro y \$4.093 en Cauca, evidenciando que la tecnificación, el tamaño del cultivo y el tipo de riego influyen directamente en la rentabilidad. El estudio concluye que el cultivo de ají puede ser rentable bajo condiciones adecuadas de manejo, escala y tecnología, y que la inversión en sistemas de riego y estructuras protegidas, aunque elevada inicialmente, mejora el desempeño económico a mediano plazo.





Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Introducción

Los costos representan la valoración económica de los recursos utilizados en un proceso productivo. Desde una perspectiva práctica, su principal objetivo es facilitar la toma de decisiones a corto plazo. Existen diversos métodos y enfoques para calcular los costos de productos, servicios, procesos, actividades, divisiones o áreas administrativas (Álvarez & Sánchez, 2011). En este capítulo se presentan los costos de producción correspondientes a tres parcelas ubicadas en diferentes zonas de Colombia: Antioquia, Valle del Cauca y Cauca. Es importante destacar que solo la parcela del Cauca tiene una finalidad comercial, ya que se dedica a la venta de ají. Por lo tanto, en este caso se incluye el flujo de caja. En contraste, los costos de las otras parcelas se presentan únicamente como resultado de la investigación, ya que corresponden a más de 280 accesiones que no fueron comercializadas.

Según el comportamiento de los recursos respecto a la variación de los niveles de producción del producto analizado en el corto plazo económico, los costos de producción se clasifican en (Álvarez & Sánchez, 2011):

- » **Costos fijos:** son aquellos recursos que en un corto plazo económico permanecen invariables a pesar de los cambios en el nivel de producción.
- » **Costos variables:** son aquellos que varían en función del nivel o volumen de producción.

Las inversiones realizadas, como equipos, vehículos, herramientas o maquinaria, son llevadas a los costos como depreciación, que es la pérdida de valor de un activo por razones de edad, uso y obsolescencia durante la vida útil. La depreciación permite tener un ahorro en el pago de impuestos, pues estos gastos en activos son recobrados en las deducciones (Tapia-Segarra et al., 2022).

Para el cálculo de los costos de producción es importante tener en cuenta el uso que se le dará a la información, ya que los costos para tomar decisiones relacionadas con políticas públicas —como subsidios o precio mínimo de venta en plaza de mercado— pueden calcularse de manera muy diferente a los costos para tomar decisiones individuales de estrategia empresarial (Crawford, 2016). En el caso de los costos para la toma de decisiones individuales, es fundamental llevar los registros de estos, ya que permiten planificar y evaluar la producción, proyectar la toma de decisiones, determinar la rentabilidad de cada cultivo, conocer el historial de los lotes de la finca, establecer el costo de cada área de la empresa (recurso humano, insumos, materiales, equipos, lotes de producción, etc.) y estimar el valor de la unidad de la materia prima producida, con lo cual se determina la rentabilidad del sistema productivo (Álvarez & Sánchez, 2011). Dependiendo de la zona, el tamaño del cultivo, el tipo de explotación, el nivel tecnológico y la mano de obra, los costos pueden variar, con lo cual influyen sobre la rentabilidad.

Se identificaron los costos de producción para tres parcelas ubicadas en diferentes departamentos del país: Cauca, Valle del Cauca y Antioquia. Estas parcelas tenían características y grados de tecnificación diferentes (tabla 9.1) que se pueden apreciar en la estructura de costos de producción. Dicha estructura está constituida por los elementos generadores de costo, como la mano de obra, los insumos, los materiales, las herramientas y los equipos, entre otros —como análisis de laboratorio, uso del suelo y administración—.



Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Tabla 9.1. Características de las parcelas evaluadas

Ubicación	Área m ²	Distancia de siembra	Características	Variedad
Antioquia	1.700	1,5 m x 0,4 m	Bajo invernadero, riego por goteo	284 accesiones diferentes
Valle del Cauca	10.000	1,6 m x 0,45 m	A campo abierto, riego por goteo	Ají habanero, (<i>Capsicum chinense</i>)
Cauca	1.000	1,5 m x 0,4 m	A campo abierto, riego manual	30 accesiones diferentes

Fuente: Elaboración propia

Las consideraciones que se tuvieron en cuenta para el análisis financiero son las siguientes:

- » Los recursos que se invierten son propios de cada uno de los agricultores, pues estos presentan inconvenientes para acceder al crédito, que no es una práctica común entre ellos.
- » Las etapas del cultivo son: de los cero a los dos meses se lleva a cabo el establecimiento del semillero; de los tres a los seis meses se desarrolla del cultivo; y desde los siete meses hasta los doce o catorce, se da la producción.
- » La parcela ubicada en Rionegro (Antioquia) se estableció bajo invernadero, con el fin de propiciar un ambiente ideal para el desarrollo de las accesiones (las condiciones climáticas de la región no son las apropiadas para el desarrollo óptimo del cultivo).
- » El costo de la hectárea para la siembra de ají no se tuvo en cuenta, ya que normalmente se tra-

ta de terrenos heredados o poseídos por los agricultores desde hace mucho tiempo, de manera que su valor en términos monetarios puede ser difícil de determinar.

» Para el flujo de caja se tuvo en cuenta una inflación promedio anual del 8 %, tomada de los datos del Banco de la República a febrero de 2024 (Banco de la República de Colombia, 2024).

» En los costos de inversión que aparecen en el año cero del flujo de caja se tienen en cuenta las herramientas, los equipos y los materiales necesarios, así como mano de obra, insumos y otros costos para el establecimiento inicial del cultivo. En el caso de las herramientas, en los años siguientes se tiene en cuenta la depreciación, calculada por el método de la línea recta, con una

vida útil de cinco años para herramientas y de diez años para infraestructura (Hirache, 2015).

» Para la evaluación financiera se tomó una tasa de descuento del 20 %. Esta normalmente se calcula teniendo en cuenta una ponderación entre el capital propio y el costo de la deuda (Baca, 2010).

» Las parcelas ubicadas en Cauca y en Antioquia poseen finalidades de investigación. Allí se evalúan 30 y 284 accesiones de *Capsicum*, respectivamente. La parcela ubicada en Valle del Cauca se destina a producción comercial y la variedad sembrada es *C. chinense*. Esta parcela es la única que fue objeto de evaluación financiera, ya que el cultivo tiene una finalidad comercial que presenta flujos de caja positivos.

» El precio de venta para la parcela del Valle del Cauca se tomó del promedio de precios pagados al productor en plaza de mercado —suministrado por productores—, que es de \$2.500 por kilogramo.

» Para el cálculo de los ingresos de la parcela del Valle del Cauca se tomó el rendimiento reportado por los productores de la zona, que es de 50 t/ha año, y se contrastó con los rendimientos reportados para diferentes especies de *Capsicum* en las evaluaciones agropecuarias municipales (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR], 2022).

En la figura 9.1 se presentan los costos asociados a la mano de obra en las tres parcelas. Es importante tener en cuenta que el costo del jornal es diferente en las tres localidades, y que las áreas y condiciones climáticas influyen marcadamente en el rendimiento obtenido en las labores de campo.

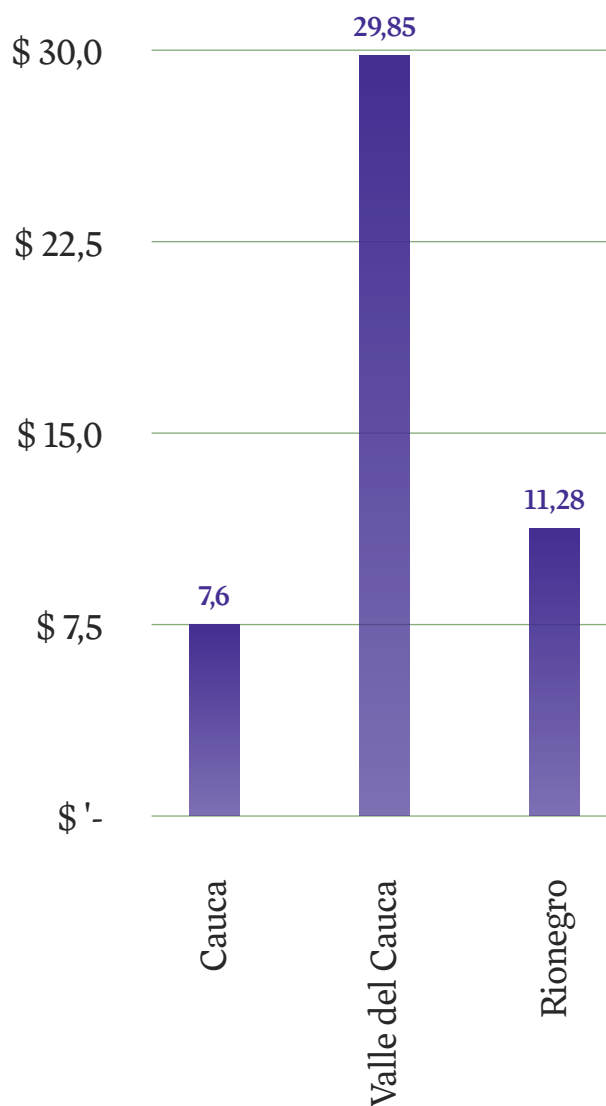


Figura 9.1. Costos asociados a la mano de obra en las tres parcelas (millones de pesos).

Fuente: Elaboración propia (para conocer a profundidad los ítems de cada parcela, ver anexo A)

En la figura 9.2 se presentan los costos asociados a los insumos. Este ítem se calcula teniendo en cuenta la cantidad de productos necesaria anualmente para cada una de las parcelas, considerando que estas tienen áreas diferentes.

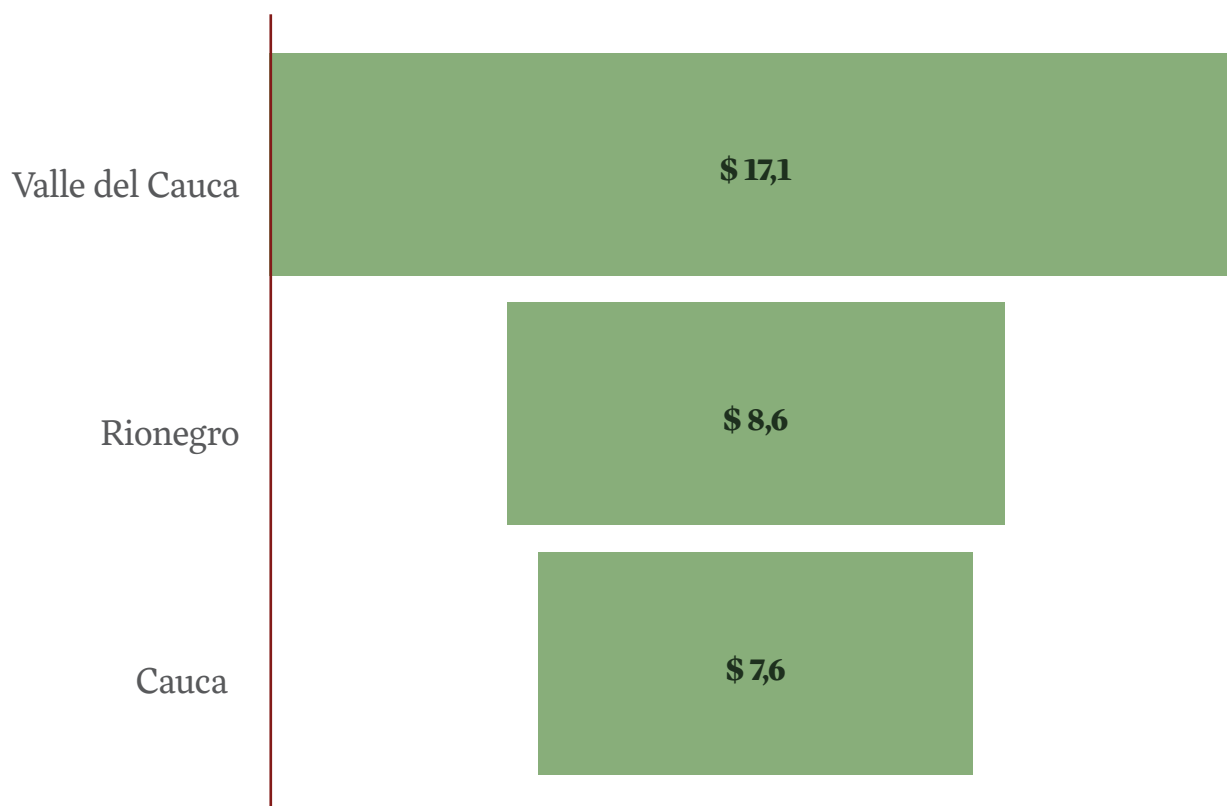


Figura 8.2. Costos de insumos por parcela (millones de pesos).

Fuente: Elaboración propia (para conocer a profundidad los ítems de cada parcela, ver anexo B)

En la tabla 9.2 se presentan los costos asociados a infraestructura, materiales, equipos y herramientas. En este ítem se debe tener en cuenta que estos hacen parte de la inversión inicial, y que las herramientas y equipos son considerados activos depreciables, por lo que la depreciación se calcula con el

método de la línea recta (Álvarez & Sánchez, 2011). Este método consiste en dividir el costo total del activo entre el número de años que tiene de vida útil (para el caso de herramientas, se consideraron cinco años y para equipos o infraestructura se consideraron 10 años).

Tabla 9.2. Costos asociados a herramientas, equipos e infraestructura

Herramientas, materiales y equipos	Unidad	Total unidades	Valor unidad	Total
Fumigadora de espalda químicos	Unidad	2	\$450.000	\$900.000
Fumigadora de espalda biológicos	Unidad	1	\$450.000	\$450.000
Guantes	Caja	4	\$30.000	\$120.000
Boquillas (fumigadoras)	Unidad	6	\$12.000	\$72.000
Empaques (fumigadoras)	Caja	1	\$30.000	\$30.000
Machetes	Unidad	2	\$25.000	\$50.000
Asadón	Unidad	2	\$35.000	\$70.000
Sistema de riego por goteo	Unidad	1	\$8.000.000	\$16.000.000
Limas	Unidad	2	\$20.000	\$40.000
Invernadero de 1.700 m ²	m ²	1.700	\$50.000	\$85.000.000
Sistema de riego por goteo	m ²	General		\$2.000.000
Guadaña	Unidad	1	\$490.000	\$490.000

Fuente: Elaboración propia

Estos costos se cargan en el flujo de caja como se presenta más adelante (Tabla 9.4). Es importante tener en cuenta que, en la parcela de Rionegro, la producción se llevó a cabo bajo invernadero, por lo que este costo es bastante diferenciador respecto a las demás parcelas. Así, se presentan los costos asociados a herramientas y equipos para la parcela de Rionegro, ya que la única diferencia con las demás es el costo del invernadero (figura 9.3).



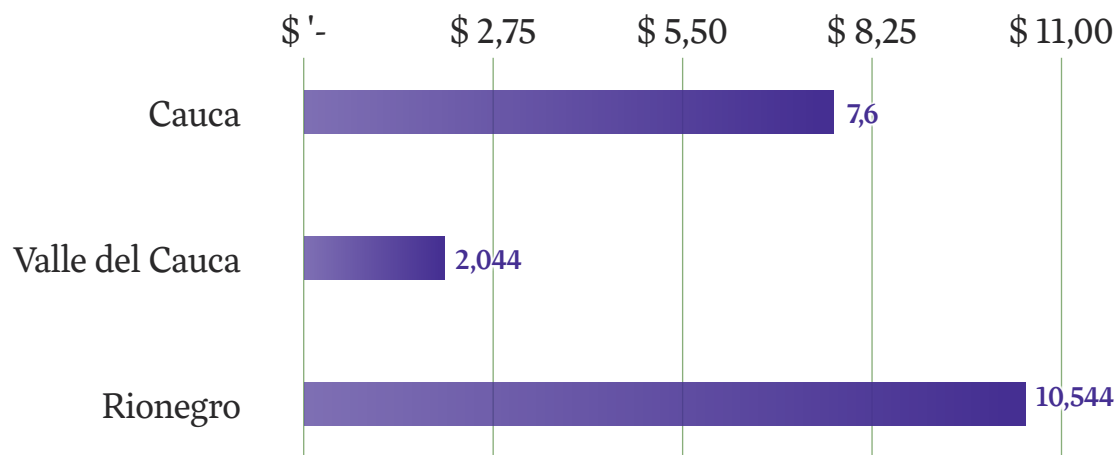


Figura 9.3. Costos total de materiales, herramientas y equipos (millones de pesos).

Fuente: Elaboración propia (para conocer a profundidad los ítems de cada parcela, ver anexo C)

Finalmente, en la tabla 9.3 se presentan otros costos y gastos administrativos relacionados con la asistencia técnica, el análisis de suelos, la administración del cultivo, entre otros. Es importante aclarar que estos gastos no son proporcionales al área sembrada, por lo que son iguales para las tres parcelas.

Tabla 9.3. Otros costos asociados a la producción de ají

Otros costos	Unidad	Total unidades	Valor unidad	Total
Análisis de suelo (fertilidad)	Unidad	1	\$150.000	\$150.000
Análisis de suelo- Curva de Retención de Humedad (CRH)	Unidad	1	\$150.000	\$150.000
Análisis de tejido vegetal	Unidad	1	\$150.000	\$150.000
Análisis de agua	Unidad	1	\$100.000	\$100.000
Administración	Año	1	\$2.520.000	\$2.520.000
Asistencia técnica	Jornal	1	\$2.000.000	\$2.000.000
Otros				\$500.000

Fuente: Elaboración propia

Flujo de caja

El flujo de caja es un esquema que muestra los egresos y los ingresos que se presentan en el proyecto, así como el tiempo en el que ocurren (Mendieta-Arrieta, 2005). Cada uno de estos elementos debe ser caracterizado según su monto o valor, y según el momento en el que se recibe o se desembolsa. Para el caso del ají, se calculó el flujo de caja para un periodo de cinco años, teniendo en cuenta el año cero como el de la inversión, y de ese punto en adelante considerando los años de establecimiento y producción (tabla 9.4). Es importante tener en cuenta que este ejercicio se hace para tratar de evaluar financieramente el sistema productivo, pero en la práctica los productores no vuelven a sembrar ají inmediatamente termina el ciclo, ya que rotan con otro cultivo.

Tabla 9.4. Flujo de caja para *C. chinense*

Año	0	1	2	3	4	5
=	Total ingresos	\$-	\$115.000.000	\$124.200.000	\$134.136.000	\$144.866.880
-	Costos mano de obra	\$-	\$29.850.000	\$32.238.000	\$34.817.040	\$37.602.403
-	Costos insumos	\$-	\$17.137.800	\$18.508.824	\$19.989.530	\$21.588.692
-	Herramientas	\$18.222.000	\$2.044.400	\$2.207.952	\$2.384.588	\$2.575.355
-	Otros costos	\$-	\$5.570.000	\$5.848.500	\$6.140.925	\$6.447.971
=	Costos y gastos totales	\$18.222.000	\$54.602.200	\$58.803.276	\$63.332.083	\$68.214.422
=	Utilidad bruta	-\$18.222.000	\$60.397.800	\$65.396.724	\$70.803.917	\$76.652.458
-	Depreciaciones	\$-	\$2.044.400	\$2.146.620	\$2.253.951	\$2.366.649
=	Utilidad Antes de Impuestos (UAI)	-\$18.222.000	\$58.353.400	\$63.250.104	\$68.549.965,92	\$74.285.809,47
-	Impuestos	-	-\$604.448	\$66.629,12	\$2.250.590,46	\$3.856.626,65
=	Utilidad neta	-\$18.222.000	\$58.353.400	\$63.250.104	\$68.549.966	\$74.285.809
	Depreciaciones	-	\$2.044.400	\$2.146.620	\$2.253.951	\$2.366.648,55
	Flujo de caja meto	-\$18.222.000	\$61.002.248	\$64.630.094,88	\$68.553.326,46	\$72.795.831,37

Fuente: Elaboración propia

Evaluación financiera

La evaluación financiera permite determinar cuán rentable es un proyecto, es decir, cuánta riqueza o valor puede generar para el inversionista. La evaluación financiera se realiza mediante el análisis de varios indicadores (Baca, 2010), algunos de los cuales se relacionan a continuación:

» **Valor presente neto:** es la diferencia entre el valor presente de las entradas de un flujo de caja y el valor presente de las salidas. Este indicador financiero permite determinar la viabilidad de una inversión: un resultado positivo indica que el proyecto genera una rentabilidad superior a la tasa de descuento aplicada, añadiendo valor monetario excedente a la inversión inicial.

» **Tasa interna de retorno:** es la tasa de descuento que hace que el valor presente neto sea igual a cero. Se debe aclarar que cuando un valor presente es igual a cero significa que la inversión se libra y arroja la rentabilidad esperada.

» **Tasa del inversionista:** es la tasa de retorno mínima que el inversionista acepta, y se emplea para calcular el valor presente.

» **Relación beneficio-costos:** es el cociente entre la sumatoria del valor presente de los ingresos y la sumatoria del valor presente de los egresos del flujo de caja de la inversión. Que su valor sea mayor a 1 es un indicador positivo.

La evaluación financiera realizada se concentra exclusivamente en el cultivo establecido en el Valle del Cauca, debido a su capacidad para generar flujos po-

sitivos a lo largo del tiempo. Esta situación es comprensible, dado que los costos fijos, junto con otros gastos y la mano de obra, son considerablemente elevados. En parcelas de tamaño reducido, los agricultores suelen optar por no contratar mano de obra externa, ya que prefieren asumir ellos mismos esta tarea. Sin embargo, en áreas tan pequeñas y con un bajo nivel de tecnificación, el cultivo puede no ser muy rentable. Otra alternativa viable para aumentar la rentabilidad en áreas tan pequeñas es aprovechar las condiciones protegidas, lo cual, no obstante, puede resultar en un costo de inversión mayor.

Tabla 9.5. Indicadores de la evaluación financiera

Indicador	Valor
Valor Presente Neto (VPN)	\$149.824.197
Tasa Interna de Retorno (TIR)	40 %
Relación Beneficio-Costo (RBC)	1,89

Fuente: Elaboración propia

Según estos indicadores, cuyo cálculo se realizó con una tasa del inversionista del 20 %, se puede decir que, bajo las condiciones en que se evaluó el flujo de caja de los costos del cultivo, este muestra un comportamiento favorable, y que con un manejo como el recomendado en esta obra, la TIR es mayor que la tasa del inversionista, el VPN es positivo y la relación beneficio-costos es mayor que 1.

Análisis de los costos obtenidos por parcela

Respecto a las tres parcelas, se aprecia como principal factor diferenciador las condiciones de tecnificación. Así, por ejemplo, en el caso de la parcela de Rionegro, el costo de inversión inicial es mucho más alto por tratarse de un cultivo bajo invernadero. Otro factor diferenciador para los casos analizados en este capítulo es la finalidad de la producción, ya que las parcelas del Cauca y de Rionegro tienen como finalidad generar resultados de investigación. Por esta razón, algunos tratamientos en los lotes son diferentes a los que normalmente realiza el agricultor y, por lo tanto, el costo de insumos y mano de obra por unidad de área es mayor. Las parcelas de Rionegro y Cauca presentan un costo de producción más elevado, como se puede observar en la tabla 9.6.

Tabla 9.6. Costos de producción por kilogramo en cada localidad

Localidad	Costo \$/kg
Valle del Cauca	\$1.092,04
Rionegro	\$4.230,98
Cauca	\$4.093,90

Fuente: Elaboración propia

El sistema de riego es otro factor que representa un mayor costo inicial de inversión. No obstante, en el largo plazo, al tener en cuenta el número de jornales

invertidos en la labor manual, resulta mucho mayor el costo que se carga a la producción con este último método. Esto, sumado a la baja eficiencia que representa el riego manual y a la imposibilidad de tener cosechas durante todo el año, arroja como mejor alternativa invertir desde el principio en un sistema de riego fijo.

Martínez (2015) encontró, en investigaciones hechas para pimiento morrón (*Capsicum annuum*) bajo ambientes protegidos, que esta resulta ser una agricultura rentable, aunque su inversión es relativamente alta. Al comprar los materiales de los que están hechos los invernaderos, determinó que se recupera más rápido la inversión (a los tres años) con un invernadero hecho de madera que con uno hecho de metal (a los 8 años).

El área también es un factor fundamental en la producción bajo invernadero, ya que en superficies mucho más pequeñas se pueden obtener ingresos considerables, como en los casos estudiados por Martínez (2015) con producción de ají morrón (*Capsicum annuum*) en invernaderos de madera de 2.800 m², ya que la inversión se recupera en los dos primeros años. Los costos variables, el manejo del cultivo y el uso adecuado de la tecnología son los factores que mejoran la rentabilidad. Otras variables que suman a la rentabilidad son el aumento del precio, el volumen de producción y la economía de escala, de manera que se obtienen TIR de hasta el 64 %.

Reflexión

Conocer la estructura de costos de un sistema productivo es crucial para la toma de decisiones con miras a la rentabilidad de un negocio. Sin embargo, diferenciar los tipos de costos y conocer las distintas metodologías para analizarlos permite la optimización operativa y consolida la sostenibilidad del cultivo y de la agroindustria asociada. Aunque en este capítulo no se hace una descripción pormenorizada, el lector puede identificar que la gama de posibilidades para la administración del negocio de *Capsicum* es amplia y que, por ende, deben tenerse en cuenta múltiples aspectos, como el lugar de producción, el personal, la variedad vegetal a emplear y las características productivas de esta.

Referencias

- Alvarez, A., & Sanchez, B. (2011). *Costos y métodos de costeo, aplicación y análisis para el sector agropecuario*. Universidad Nacional de Colombia.
- Baca, G. (2010). *Evaluación de proyectos*. McGraw-Hill.
- Banco de la República de Colombia. (2024, February). *Inflación total y meta*. https://suameca.banrep.gov.co/estadisticas-economicas/informacionSerie/100001/inflacion_y_meta
- Crawford, T. (2016). Metodologías y problemas para la estimación y la comparación internacional de costos de producción agrícola. *Estudios de Economía*, 18(2), 189-213. <https://estudiosdeeconomia.uchile.cl/index.php/EDE/article/view/40651>
- Hirache, L. (2015). *Estados financieros conforme a NIIF*. Instituto Pacífico.
- Martínez, C. (2015). *Análisis económico de la producción de ají o pimiento morrón en invernadero*. Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales.
- Mendieta-Arrieta, B. G. (2005). *Formulación y evaluación de proyectos de inversión agropecuaria*. Universidad Nacional Agraria. <https://repositorio.una.edu.ni/2437/1/ne14m537.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural [MADR]. (2022). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales EVA*. Datos abiertos-Gobierno de Colombia. <https://www.datos.gov.co/agricultura-y-desarrollo-rural/evaluaciones-agropecuarias-municipales-eva/2pnw-mmge>
- Tapia-Segarra, I. E., Vteri-Núñez, E. F., & Mayorga-Pérez, D. F. (2022). Análisis comparativo de depreciación de activos fijos con fines tributarios aplicados a la industria. *Dominio de las Ciencias*, 8(1), 530-543.



Anexos

Anexo A

Tabla A.1. Costos de producción por parcela

Costos asociados a la mano de obra, parcela Rionegro			
Labor	Jornales	Costo unitario	Total
Semilleros	3	\$60.000	\$180.000
Preparación del suelo y drenajes	3	\$60.000	\$180.000
Instalación de Agromulch	5	\$60.000	\$300.000
Siembra y resiembra	5	\$60.000	\$300.000
Instalación del tutorado	12	\$60.000	\$720.000
Control de malezas (manual)	3	\$60.000	\$180.000
Control de malezas (químico)	12	\$60.000	\$720.000
Fertilización edáfica	8	\$60.000	\$480.000
Fertirriego	12	\$60.000	\$720.000
Control fitosanitario	10	\$60.000	\$600.000
Riego	12	\$60.000	\$720.000
Cosecha	60	\$60.000	\$3.600.000
Erradicación	3	\$60.000	\$180.000
Total			\$8.880.000

Continúa en la siguiente página ▼



Costos asociados a la mano de obra, parcela Valle del Cauca			
Labor	Jornales	Costo unitario	Total
Semilleros	20	\$50.000	\$1.000.000
Preparación del suelo y drenajes	14	\$50.000	\$700.000
Instalación de Agromulch	14	\$50.000	\$700.000
Siembra y resiembra	22	\$50.000	\$1.100.000
Instalación de tutorado	34	\$50.000	\$1.700.000
Nutrición edáfica	26	\$50.000	\$1.300.000
Nutrición foliar	26	\$50.000	\$1.300.000
Control de malezas (manual)	65	\$50.000	\$3.250.000
Control de malezas (químico)	12	\$50.000	\$600.000
Aplicaciones fitosanitarias	31	\$50.000	\$1.550.000
Riego	35	\$50.000	\$1.750.000
Cosecha	274	\$50.000	\$13.700.000
Erradicación	24	\$50.000	\$1.200.000
Total			\$29.850.000

Continúa en la siguiente página ▼





Costos asociados a la mano de obra, parcela Cauca			
Labor	Jornales	Costo unitario	Total
Semilleros	3	\$50.000	\$150.000
Preparación del suelo y drenajes	3	\$50.000	\$150.000
Siembra y resiembra	3	\$50.000	\$150.000
Instalación de tutorado	10	\$50.000	\$500.000
Fertilización edáfica	9	\$50.000	\$450.000
Nutrición foliar	9	\$50.000	\$450.000
Control de malezas (manual)	5	\$50.000	\$250.000
Control de malezas (químico)	1	\$50.000	\$50.000
Control de insectos	12	\$50.000	\$600.000
Aplicaciones fitosanitarias	5	\$50.000	\$250.000
Riego manual	36	\$50.000	\$1.800.000
Cosecha	120	\$50.000	\$6.000.000
Erradicación	6	\$50.000	\$300.000
Total			\$11.100.000

Fuente: Elaboración propia

Anexo B

Tabla B.1. Costos asociados a insumos por parcela

Insumos Rionegro	Total
Semilla	\$600.000
Fertilizantes	\$1.220.100
Plástico	\$1.111.320
Cal dolomita o Calfos	\$36.000
Control fitosanitario	\$664.860
Guadua	\$840.000
Herbicidas	\$207.900
Costales	\$104.400
Canastillas	\$135.000
Cabuya	\$221.760
Total	\$5.141.340
Insumos Valle del Cauca	Total
Semilla	\$2.000.000
Fertilizantes	\$4.067.000
Plástico	\$3.704.400
Cal dolomita o Calfos	\$120.000

Continúa en la siguiente página ▼





Control fitosanitario	\$2.216.200
Guadua	\$2.800.000
Herbicidas	\$693.000
Costales	\$348.000
Canastillas	\$450.000
Cabuya	\$739.200
Total	\$17.137.800
Insumos Cauca	Total
Semilla	\$800.000
Fertilizantes	\$1.626.800
Plástico	\$1.481.760
Cal dolomita o Calfos	\$48.000
Control fitosanitario	\$886.480
Guadua	\$1.120.000
Herbicidas	\$277.200
Costales	\$139.200
Canastillas	\$180.000
Cabuya	\$295.680
Total	\$6.855.120

Fuente: Elaboración propia

Anexo C

Tabla C.1. Costos de herramientas, materiales y equipos, parcela Rionegro, cuyo diferencial es el invernadero

Herramientas, materiales y equipos	Unidad	Total unidades	Valor unidad	Total
Fumigadora de espalda químicos	Unidad	2	\$450.000	\$900.000
Fumigadora de espalda biológicos	Unidad	1	\$450.000	\$450.000
Guantes	Caja	4	\$30.000	\$120.000
Boquillas (fumigadoras)	Unidad	6	\$12.000	\$72.000
Empaques (fumigadoras)	Caja	1	\$30.000	\$30.000
Machetes	Unidad	2	\$25.000	\$50.000
Azadón	Unidad	2	\$35.000	\$70.000
Sistema de riego por goteo	Unidad	1	\$8.000.000	\$16.000.000
Limas	Unidad	2	\$20.000	\$40.000
Invernadero de 1.700 m ²	m ²	1.700	\$50.000	\$85.000.000
Sistema de riego por goteo	m ²	General		\$2.000.000
Guadaña	Unidad	1	\$490.000	\$490.000
Total				\$105.222.000

Fuente: Elaboración propia





Conclusiones y reflexiones finales

Este libro, resultado del esfuerzo colectivo de investigadores, técnicos, aliados empresariales y actores del sistema agroalimentario, demuestra que la agrobiodiversidad del género *Capsicum* en Colombia constituye por sí misma un patrimonio biológico invaluable, así como una fuente concreta de oportunidades para el desarrollo agroindustrial, la innovación y la sostenibilidad. A lo largo de sus nueve capítulos, en esta obra se ha analizado el ají colombiano desde múltiples dimensiones: genética, agronómica, sanitaria, funcional, cultural y económica, con lo que se evidencia que el conocimiento científico cobra verdadero sentido cuando se articula con las necesidades reales del territorio, el mercado y la sociedad.

Una de las principales conclusiones que se desprende de este libro es la necesidad urgente de fortalecer la conservación de los recursos fitogenéticos, no solo como un fin en sí misma, sino como base estratégica para el mejoramiento genético, la

adaptación al cambio climático y la construcción de sistemas productivos resilientes para Colombia. La gestión responsable y dinámica de los bancos de germoplasma requiere inversión, actualización permanente y un puente sólido con los programas de uso y aprovechamiento de estos recursos.

Así mismo, el análisis de la diversidad genética, las rutas de domesticación y las herramientas biotecnológicas emergentes muestra que es posible desarrollar materiales de ají con alta calidad funcional, nutricional y comercial, siempre que estos procesos se basen en enfoques integradores que respeten el origen de la diversidad y fomenten la complementariedad entre saberes tradicionales y avances científicos. En términos de selección de materiales, los estudios morfológicos, sanitarios y fisicoquímicos realizados sobre las accesiones del Banco de Germoplasma Vegetal permitieron identificar materiales promisorios, con atributos diferenciales para la industria y el consumo. Esta ca-





Foto: Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

racterización multidisciplinar pone en evidencia la potencialidad de este enfoque como vía efectiva para la toma de decisiones en procesos de selección, desarrollo de productos y generación de modelos bioeconómicos de valor agregado.

Igualmente, los capítulos dedicados a las oportunidades de transformación, los costos de producción y el manejo agronómico ofrecen herramientas valiosas para quienes buscan avanzar en la tecnificación y sostenibilidad del cultivo de ají en distintas condiciones agroecológicas. Estas herramientas contribuyen a mejorar la productividad y la rentabilidad, al tiempo que fortalecen los vínculos entre ciencia, territorio, empresa y mercado.

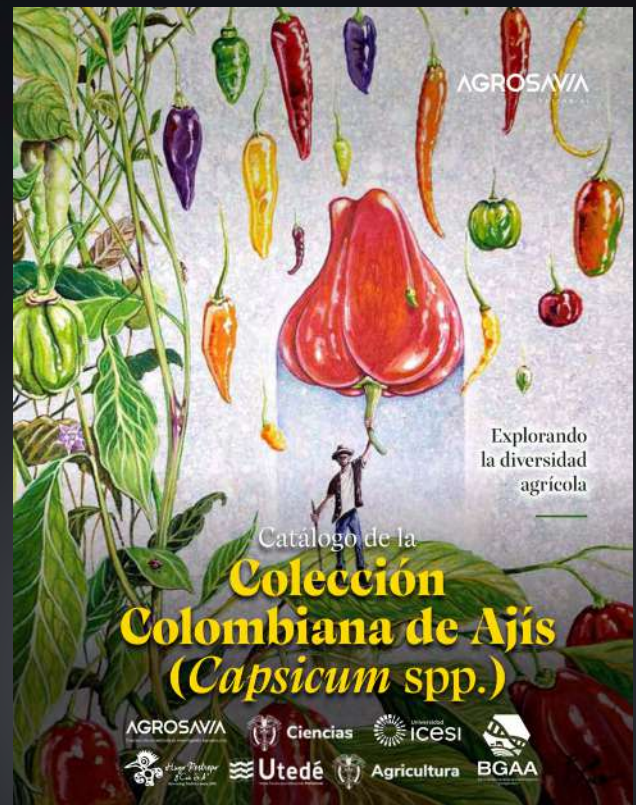
En conjunto, este libro constituye una hoja de ruta para futuras iniciativas de investigación, desarrollo e innovación en torno a *Capsicum* spp. y, por extensión, para otras especies y cadenas pro-

ductivas del país. La experiencia aquí documentada confirma que es posible construir consensos interdisciplinarios y modelos colaborativos que integren ciencia básica, desarrollo tecnológico y conocimiento empírico. Este enfoque no solo enriquece la calidad de los resultados, sino que fortalece el tejido institucional, académico y productivo necesario para enfrentar los desafíos actuales de la agricultura colombiana.

A las nuevas generaciones de investigadores, este libro les deja un mensaje claro: es posible trabajar en equipo, dialogar entre disciplinas y generar materiales de alta calidad a partir de la riqueza natural y cultural que posee Colombia. Que este ejercicio inspire la creación de más plataformas colaborativas y proyectos integradores que reconozcan en la agrobiodiversidad no solo un recurso, sino una oportunidad para transformar el presente y sembrar un futuro más justo, productivo y sostenible para todos.



Revise el Catálogo de la
Colección Colombiana de Ajís
(*Capsicum* spp.)



Revise el Recetario
Picante pero Sabroso

Autoría

Oscar Alfonso Loaiza-Loaiza

Correo electrónico: oloaiza@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4788-8129>

Ingeniero agropecuario de la Universidad de Antioquia y magíster en Recursos Genéticos Vegetales por la Universidad Federal de Santa Catarina (Brasil). Se desempeña como investigador en AGROSAVIA adscrito a la Red de Cultivos Permanentes. Tiene más de quince años de trayectoria en conservación, evaluación y caracterización de germoplasma vegetal. Adicionalmente, posee experiencia en fisiología de semillas para conservación *ex situ* con interés en especies promisorias de las regiones Altoandina tropical y el Pacífico colombiano.

Nancy Yohana Grisales-Vásquez

Correo electrónico: ngrisales@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1367-9158>

Investigadora adscrita a la Red de Hortalizas de AGROSAVIA. Ingeniera agrónoma y magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Fitopatología de la Universidad Nacional de Colombia. Cuenta con experiencia en diagnóstico de enfermedades de las plantas en cultivos como mora, uchuva, aguacate, fique, maíz, fríjol, *Capsicum*, papa y arracacha. Ha participado en proyectos de investigación en la búsqueda de resistencia genética a enfermedades y en caracterización y uso de colecciones de germoplasma.

Juan Camilo Henao-Rojas

Correo electrónico: jhenao@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0007-6809>

Investigador máster sénior del C. I. La Selva de AGROSAVIA. Ingeniero de alimentos, magíster en Ingeniería de Alimentos con énfasis en Biotecnología de la Universidad de Caldas y candidato a doctor en Ciencias Farmacéuticas y Alimentarias de la Universidad de Antioquia. Tiene experiencia en ingeniería bioquímica, biotecnología, análisis de datos, cosecha, poscosecha y generación de valor agregado a partir de biodiversidad, bioprospección, productos naturales y sustancias bioactivas. Ha sido investigador y consultor en empresas públicas y privadas en ciencia, tecnología, innovación, bioeconomía y aplicaciones multiómicas.

Laura Beatriz Espitia-Negrete

Correo electrónico: lespitia@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0324-8752>

Ingeniera agrónoma de la Universidad de Córdoba, magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Genética y Fitomejoramiento de Plantas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Investigadora máster en AGROSAVIA adscrita a la Red Raíces y Tubérculos. Ha desarrollado actividades en el área de genética y fitomejoramiento de plantas y es obtentora de las variedades de batata para en la región Caribe de Colombia. Cuenta también con experiencia en la caracterización y selección de cultivos de arracacha, fique, papa y ají.

Luz Fanny Orozco-Orozco

Correo electrónico: lorozco@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8805-944X>

Ingeniera agrónoma e investigadora en genética y fitomejoramiento, egresada de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, en pregrado y maestría. Ha trabajado en la caracterización y uso de colecciones de ají, arracha, brócoli, fique, lechuga, papa, pimentón y uchuva, buscando cultivares con atributos diferenciales para el mercado, resistencia a limitantes fitosanitarias y adaptación a condiciones agroclimáticas locales. Actualmente es investigadora máster adscrita a la Red de Raíces y Tubérculos de AGROSAVIA.

Laura María Restrepo Martínez

Correo electrónico: lrestrepo@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-9007-4196>

Ingeniera agropecuaria de la Universidad de Antioquia, con experiencia en la producción de semillas y cultivos transitorios. Ha trabajado en la implementación y desarrollo de estrategias para el mejoramiento de la producción agrícola. Actualmente, se desempeña como profesional de apoyo a la investigación en el C. I. Motilonia de AGROSAVIA, adscrita a la Red de Cultivos Transitorios, donde se enfoca en la producción, conservación y multiplicación de semillas.

Maria Yuli González González

Correo electrónico: gonzalezmariayuli@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5635-8018>

Ingeniera agrónoma con maestría y doctorado en Ciencias Agrarias, con amplia experiencia laboral en centros de investigación nacionales e internacionales. Publicaciones destacadas en revistas científicas de alto impacto internacional como *Nature Genetics*, *Theoretical and Applied Genetics* y *Scientific Data*, abordando genómica, diversidad genética y mejoramiento de cultivos. Experta en predicción genómica, estudios de asociación del genoma completo (GWAS), modelos lineales mixtos generalizados e implementación de los principios FAIR (findable, accessible, interoperable, reusable).

Luis Felipe López Hernández

Correo electrónico: llopez@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4967-6955>

Ingeniero biológico de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín y magíster en Biociencias con énfasis en Biología Computacional de la Universidad EAFIT. Experto en bioinformática, genética molecular y biología computacional. Es investigador máster adscrito a la Red de Innovación de Hortalizas y Plantas Aromáticas de AGROSAVIA. Ha publicado más de 22 artículos Q1 en genética, genómica y transcriptómica, sobre mejoramiento de especies hortícolas y forestales. Lidera proyectos en inteligencia artificial y bioinformática, con experiencia internacional en investigación genómica en Reino Unido y Estados Unidos.



Miguel Angel Useche

Correo electrónico: museche@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0026-2695>

Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Ha trabajado en proyectos de investigación enfocados en el manejo fitosanitario de cultivos de plátano, yuca, maíz y tomate, y en la caracterización de sistemas productivos de café, aguacate, cacao y granadilla. Se ha desempeñado como instructor Sena, asistente técnico de la Federación Nacional de Cafeteros y coordinador de proyectos de Sistemas Agroforestales (SAF). Actualmente es profesional de apoyo a la investigación en AGROSAVIA, adscrito a la Red de Cultivos Permanentes en el C. I. la Libertad.

Andrés Javier Cortés Vera

Correo electrónico: ancortesv@unal.edu.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4178-0675>

Profesor asociado de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Genetista vegetal (PhD) de la Universidad de Uppsala (Suecia) y Biólogo (BSc Honores, MSc) de la Universidad de los Andes (Colombia). Ha sido investigador en el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CGIAR-CIAT), la Universidad de Friburgo (Suiza), el Instituto Federal Suizo de Investigación Forestal, Nieve y Paisaje (WSL-SLF), la Universidad Sueca de Ciencias Agrícolas (SLU) y AGROSAVIA. Ha investigado el potencial de adaptación genética en plantas y árboles de interés agroecológico usando herramientas genómicas y ecológicas. Ha explorado la

tolerancia al estrés abiótico y diversidad genética en fríjol, herencia mediada por portainjertos en aguacate y cacao, adaptación genética frente al cambio climático en sauces, mejoramiento genético en pinos tropicales y diversificación adaptativa en distintos linajes vegetales del páramo.

Jaime Horacio López-Hoyos

Correo electrónico: jlopezh@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0661-1622>

Ingeniero agrónomo y magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Fisiología Vegetal de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Tiene experiencia en el manejo integrado de cultivos tropicales de aguacate Hass, mora, caña panelera, ají, papa y arracacha. Su enfoque de trabajo holístico incluye la planificación del cultivo, la agronomía, el manejo y la conservación del suelo y el agua, la cosecha y el manejo poscosecha; además, cuenta con experiencia en la formulación, seguimiento y evaluación de proyectos sociales, transferencia de tecnología y extensión. Actualmente, es investigador máster en el C. I. La Selva de AGROSAVIA.

José Antonio Rubiano Rodríguez

Correo electrónico: jrubiano@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2145-4162>

Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, magíster en Ciencias en Protección de Cultivos de la Universidad de Puerto Rico (Recinto de Mayagüez) y doctor en Ciencias

Agrarias de la Universidad de Talca (Chile). Ha sido docente en la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Utuado, y en la Universidad del Pacífico, en Buenaventura. Es investigador PhD del C. I. La Selva de AGROSAVIA. Tiene experiencia en manejo integrado de plagas agrícolas, con énfasis en control biológico.

Carlos Enrique Velásquez Arroyo

Correo electrónico: cvelasquez@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0032-602X>

Ingeniero agrónomo y magíster en Ciencias Agrarias con énfasis en Salud Pública Vegetal de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Ha trabajado en manejo y control de plagas y enfermedades en diversos cultivos y en colecciones de los Bancos de Germoplasma, en la identificación de microorganismos e insectos mediante técnicas moleculares y taxonómicas, y en la aplicación de estrategias sostenibles de control biológico clásico, aumentativo y por conservación. Actualmente, se desempeña como profesional de apoyo a la investigación adscrito a la Red de Frutales de AGROSAVIA y es integrante del grupo Mejoramiento Genético Vegetal, Uso y Aprovechamiento de la Agrobiodiversidad (MGVA).

Carolina Ortiz Muñoz

Correo electrónico: cortizm@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5239-6137>

Ingeniera agrónoma y estudiante de la Maestría en Ciencias - Entomología de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Ha trabajado en manejo

técnico y extensionismo de cultivos perennes y transitorios como ají, cacao, café y palma de aceite. Actualmente, apoya la investigación en AGROSAVIA, colaborando con los Bancos de Germoplasma para la Alimentación y la Agricultura de Colombia y manejo integrado de plagas (MIP). Está adscrita a la Red de Innovación de Hortalizas y Plantas Aromáticas y al grupo de investigación Sistemas Agrícolas del Trópico.

Yenifer Campos-Patiño

Correo electrónico: ycampos@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5209-8340>

Ingeniera agrónoma de la Universidad del Tolima. Realizó pasantía y tesis en el Grupo de Investigación en Mosca de la Fruta (Gimfrut) de la Universidad del Tolima. Es profesional de apoyo a la investigación en el C. I. Palmira de AGROSAVIA. Ha apoyado proyectos relacionados con frutales tropicales en temas como control biológico, manejo integrado de plagas (MIP) y estudios sobre la entomofauna de diferentes cultivos, incluyendo el ají. Perteneció al Grupo de Investigación en Frutas del Trópico. Ha publicado varios artículos científicos en revistas indexadas sobre los temas mencionados.

Takumasa Kondo

Correo electrónico: tkondo@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3192-329X>

Ingeniero agrónomo y magíster en Ciencias de la Universidad de Agricultura de Tokio, con doctorado en Auburn University, Alabama, EE. UU., y posdoctorado en la Universidad de California, Davis,



EE. UU. Trabaja en el área de manejo integrado de plagas de frutales tropicales y es especialista en la taxonomía de los insectos escama. Editor en jefe de la *Revista Colombiana de Entomología* (2021-presente). Líder del grupo Investigación en Frutas del Trópico de Minciencias, categoría A1. Ha escrito más de 200 artículos científicos en revistas indexadas, libros, capítulos de libro y otras publicaciones. Actualmente, es investigador PhD sénior en el C. I. Palmira de AGROSAVIA.

Gleyder Yeraldín Bedoya-Vélez

Correo electrónico: gbedoya@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-0484-3964>

Ingeniera agrónoma de la Universidad Nacional de Colombia. Cuenta con más de ocho años de experiencia en manejo integrado de enfermedades en diferentes cultivos y más de tres años de experiencia en el área de poscosecha y valor agregado de materias primas, con énfasis en productos naturales y economía circular. Actualmente, se desempeña como profesional de apoyo a la investigación en AGROSAVIA, adscrita a la Red de Innovación de Hortalizas y Plantas Aromáticas; también forma parte del grupo de investigación Sistemas Agrícolas del Trópico (SAT).

Carolina Zuluaga Mejía

Correo electrónico: czuluaga@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3890-0701>

Ingeniera agrícola con especialización y maestría en Gerencia de Proyectos. Cuenta con más

de ocho años de experiencia en el diseño y formulación de proyectos orientados al desarrollo rural sostenible. Ha participado en iniciativas de diseño de distritos de riego para pequeños productores, así como en la identificación de cadenas de valor y oportunidades de mercado para productos agropecuarios, promoviendo el fortalecimiento empresarial y la competitividad en territorios rurales. Se desempeña como profesional de apoyo a la investigación en AGROSAVIA.

Cristian Dominguez Pulgarin

Correo electrónico: cdominguez@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-4782-1032>

Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia. Con trayectoria en el manejo agronómico de sistemas productivos de hortalizas y frutales, con énfasis en fitopatología, así como en la planificación y ejecución de ensayos de campo. Actualmente, se desempeña como profesional de apoyo a la investigación en AGROSAVIA, donde está adscrito a la Red de Hortalizas y Plantas Aromáticas y desarrolla sus actividades en el C. I. La Selva.

Jaison Martínez Saldarriaga

Correo electrónico: jmartinezs@agrosavia.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4314-4384>

Ingeniero biológico con una línea de profundización en Alimentos y magíster en Ciencia y Tecnología de Alimentos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Se desempeña como profesional de

apoyo a la investigación en AGROSAVIA, desde la transformación de matrices agroalimentarias, generación de prototipos, aprovechamiento de residuos y agregación de valor, con un enfoque en la generación de soluciones basadas en la naturaleza y bajo los principios de la bioeconomía y la economía circular. Actualmente, pertenece a la Red de Innovación de Hortalizas para el C. I. La Selva.

Jilberth Ferney Alzate Castaño

Correo electrónico: jilberth8@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-4541-1279>

Ingeniero agropecuario de la Universidad de Antioquia, con estudios en Ingeniería de Sistemas. Tiene experiencia en producción de semillas, cultivos transitorios y trabajo con bacterias de interés agropecuario. Se ha desempeñado como consultor de maquinaria agrícola, protección de cultivos y nutrición vegetal. Actualmente se dedica al seguimiento de proyectos.

Clara Inés Medina Cano

Correo electrónico: clara.medina@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3252-7005>

Licenciada en Educación Agropecuaria de la Universidad de Antioquia, especialista en Biotecnología Vegetal de la Universidad Católica de Oriente, magíster y doctora en Ciencias Agrarias con énfasis en Fisiología Vegetal de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Fue investigadora de AGROSAVIA adscrita a la Red de Hortalizas, donde formuló y lideró múltiples

proyectos relacionados con conservación y caracterización de recursos genéticos vegetales, fisiología vegetal, preselección y premejoramiento de frutales andinos como lulo, tomate de árbol, mortiño, uchuva, pasifloras, entre otros.

Sebastián Parra Londoño

Correo electrónico: separra@utede.edu.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1185-5189>

Biólogo, magíster en Horticultura y doctor en Agricultura. Es investigador en ciencias agrícolas, analista de datos y profesor en la Unidad Técnica para el Desarrollo Profesional (Utedé) de Buga. Ha trabajado en investigaciones relacionadas con nutrición, fisiología y genética vegetal. Cuenta con experiencia en minería de datos y metodologías para el análisis de datos biológicos y agronómicos, y se especializa en temas relacionados con genética de plantas, biología molecular y análisis de datos.

Manuela Robledo Gómez

Correo electrónico: mrobledognf@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2634-3197>

Ingeniera agrónoma de la Universidad de Caldas y magíster en Ciencias Genómicas y Biotecnología de la Universidad Católica de Brasilia. Cuenta con experiencia en investigación aplicada al área vegetal, especialmente en biotecnología agrícola. Ha participado en proyectos de cultivo de tejidos vegetales bajo condiciones *in vitro*. Ha trabajado en procesos de transformación genéti-



ca de plantas de algodón orientados al control de lepidópteros. Su perfil integra conocimientos en mejoramiento vegetal, biotecnología y manejo de sistemas productivos con enfoque científico.

Gustavo Adolfo Ossa Ossa

Correo electrónico: gossaossa@utede.edu.co

Orcid: <http://orcid.org/0000-0003-4205-0340>

Licenciado en Biología y Química, magíster en Ciencias Biológicas con énfasis en Biología Molecular de la Universidad de Caldas. Fue investigador asociado en el Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé) durante seis años en bioquímica de insectos y proteómica de la broca del café. Se ha desempeñado como catedrático en la Universidad de Caldas y actualmente es profesor asistente en el área agrícola en la Unidad Técnica para el Desarrollo Profesional (Utedé).

Federico Roda Fornaguera

Correo electrónico: froda@unal.edu.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7923-9713>

Genetista evolutivo con formación de pregrado en la Universidad Nacional de Colombia, doctorado en la Universidad de Queensland y estudios posdoctorales en Harvard University. Cuenta con experiencia en la integración de datos genómicos, transcriptómicos y metabolómicos para entender cómo las plantas diversifican su metabolismo en respuesta a presiones ecológicas, evolutivas y culturales. Su investigación se ha enfocado en la familia Solanaceae, donde ha estudiado la evolu-

ción de compuestos medicinales y rasgos metabólicos complejos mediante enfoques multiómicos, filogenéticos y etnobotánicos. Actualmente, dirige el grupo de Genómica Evolutiva del Metabolismo Especializado (GEME) en la Universidad Nacional de Colombia, en el marco de una alianza Tandem con la Sociedad Max Planck.

Jaime Andrés Tigreros

Correo electrónico: ja.tigreros@utede.edu.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-6883-7064>

Tecnólogo en Alimentos de la Universidad del Valle sede Palmira, ingeniero de alimentos de la Universidad de Caldas, magíster en Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira y candidato a doctor en Ingeniería de la Universidad de Caldas. Tiene experiencia en química analítica instrumental, cromatografía (HPLC, LC-MS/MS, GC-MS), metabolómica y tecnologías de microencapsulación por secado por aspersión. Su investigación se centra en compuestos bioactivos de frutos colombianos, bioaccesibilidad, diseño experimental de procesos y valorización de biodiversidad mediante enfoques ómicos.

Esteban Castaño Llanos

Correo electrónico: esteban.castano@u.icesi.edu.co

Orcid: <https://orcid.org/0009-0003-5821-7261>

Investigador con enfoque en bioprospección vegetal y desarrollo de bioproductos. Ingeniero bioquímico y magíster en Ciencias-Biotecnología de la Universidad Icesi. Cuenta con experiencia en in-

vestigación aplicada en sectores estratégicos como bioeconomía, salud y agroindustria. Su trabajo se centra en la exploración de la diversidad vegetal y en el diseño de soluciones basadas en compuestos naturales con potencial biofuncional y agroindustrial. Es un investigador comprometido con la generación de conocimiento científico, la innovación tecnológica y el desarrollo sostenible en Colombia.

Maira Alejandra Vega Muñoz

Correo electrónico: maira.vega@u.icesi.edu.co

Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-8126-190X>

Investigadora con interés en la genética vegetal, la bioprospección y el desarrollo de bioproductos para fortalecer la bioeconomía y promover la innovación agroindustrial. Química y magíster en Biotecnología de la Universidad Icesi. Cuenta con experiencia en investigación aplicada en productos naturales para el aprovechamiento sostenible de la biodiversidad vegetal y el desarrollo de bioproductos de alto valor. Su trabajo busca conectar la investigación científica con la innovación tecnológica para apoyar el desarrollo sostenible y promover la valorización de la biodiversidad colombiana.

Guillermo León Montoya Peláez

Correo electrónico: glmontoya@icesi.edu.co

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-3963-9007>

Químico farmacéutico y doctor en Ciencias Químicas de la Universidad Icesi. Profesor asociado e investigador líder en la Universidad Icesi, con experiencia en fitoquímica, análisis de mezclas

complejas y valorización de biomasa desde la bioeconomía. Su trabajo se enfoca en el estudio de metabolitos de plantas mediante espectrometría de masas, cromatografía avanzada y herramientas ómicas para el descubrimiento de ingredientes bioactivos. Cuenta con más de quince años de experiencia en investigación aplicada, formación de talento humano, transferencia tecnológica y articulación academia-industria.

Rafael Chamorro

Correo electrónico: rafaelchamorro8.2@gmail.com

Ingeniero bioquímico de la Universidad Icesi, con formación y experiencia en investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), análisis de datos y gestión de proyectos. Ha participado en el diseño, ejecución y seguimiento de iniciativas orientadas al fortalecimiento de capacidades institucionales en ciencia, tecnología e innovación. Actualmente, se desempeña como Gestor del Centro INNLAB de la Universidad Icesi, donde acompaña procesos de posicionamiento del centro, articulación con el ecosistema regional y gestión de proyectos de innovación. Cuenta con experiencia en el desarrollo y optimización de procesos bioquímicos orientados al desarrollo de fitoproductos.

Ana Lía Restrepo Mejía

Correo electrónico: analia.restrepo@hugorestrepo.com

Diseñadora de Producto con más veinte años de experiencia en el desarrollo de marcas y la implementación de procesos organizacionales en em-



presas con altos niveles de innovación en sus productos. Desde su incorporación a la empresa Hugo Restrepo y Cía. en 2015, ha dirigido el área de Proyectos, especialmente en procesos de innovación en mejoras de procesos de producción, nuevos productos, trazabilidad agrícola y la implementación de una nueva gestión interna.

Jorge Eliécer Jaramillo Noreña

Correo electrónico: jjaramillo.jorge@gmail.com

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2515-5706>

Ingeniero agrónomo y magíster en Entomología de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. Fue investigador en AGROSAVIA, donde lideró proyectos de investigación y transferencia de tecnología en alianza con otras instituciones, que permitieron validar y socializar investigación aplicada y participativa sobre producción artesanal de semillas de hortalizas, buenas prácticas agrícolas (BPA) y producción limpia de hortalizas. Experto en evaluación de materiales hortícolas importados y construcción de modelos tecnológicos compuestos por recomendaciones técnicas y agronómicas para el cultivo competitivo y sostenible de hortalizas bajo condiciones protegidas y a campo abierto.





Foto: Esteban Castaño Llanos



AGROSAVIA

Corporación colombiana de investigación agropecuaria

A lo largo de nueve capítulos, podrá encontrar los resultados de investigación de la primera fase del proyecto “Selección de materiales de *Capsicum* spp. con atributos diferenciales y ventajas competitivas agronómicas y agroindustriales”. El libro inicia con los recursos genéticos del género *Capsicum*, posteriormente explora las perspectivas de mejoramiento, la caracterización fenotípica, presenta el contexto agronómico de las evaluaciones, los insectos asociados a los ajís, las enfermedades, la evaluación fisicoquímica, las oportunidades de transformación del ají en Colombia y finaliza con un capítulo de acercamiento a los costos de producción del cultivo.

La obra aporta al conocimiento del género *Capsicum* y los cultivos de ají en Colombia desde una visión interdisciplinaria, ya que entre su grupo de autores se encuentran especialistas en diferentes ramas del conocimiento como agronomía, fisiología vegetal, fitopatología, entomología, fitomejoramiento, genética, ciencias de los alimentos, química, bioquímica, mercadeo, costos de producción, bioeconomía, semillas, estadística, entre otras. Desde su experiencia y formación académica y científica, estos investigadores presentan los principales resultados de caracterización integral (morfológica, genética y fisicoquímica) realizada a 284 accesiones del banco de germoplasma de ají de la Nación colombiana.

Esta publicación es producto de un esfuerzo articulado entre instituciones que representan el modelo de innovación de triple hélice para potencializar los resultados e impactos sobre la cadena de valor del ají. Los autores provienen de la academia (Universidades Icesi, Utedé, UNAL), la industria (Hugo Restrepo & Cía.) y el Gobierno (AGROSAVIA y MinCiencias, que financió el proyecto).

Adicionalmente, este libro presenta el concepto arte-ciencia como estrategia de difusión del conocimiento, a través de las obras de la artista Laura Stefanny López Cortés, cocreadas con los autores de los capítulos desde las emociones y sensaciones inspiradas por la experiencia de trabajo con cada temática.



BIBLIOTECA AGROPECUARIA DE COLOMBIA

Correo: bac@agrosavia.co

Teléfono: (+57 601) 4227300 ext. 1257 o 1274

Skype: biblioteca.agropecuaria

www.agrosavia.co

Distribución gratuita
Prohibida su venta