

Perspectivas multidisciplinarias para la **agricultura:**

Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas

Coordinadores:

Julio César Chacón Hernández

Mario Rocandio Rodríguez

editorial
fontamara



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

Perspectivas multidisciplinares para la agricultura

Aplicaciones para minimizar la
afectación en agroecosistemas

Perspectivas multidisciplinares para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas / Julio César Chacón Hernández, Mario Rocandio Rodríguez coordinadores .— Cd. Victoria, Tamaulipas : Universidad Autónoma de Tamaulipas ; Ciudad de México : Editorial Fontamara , 2024.

250 págs. ; 17 x 23 cm.

Ecología

LC: S589.85 P4.7 2024

DEWEY: 577 RNC

Universidad Autónoma de Tamaulipas
Matamoros SN, Zona Centro
Ciudad Victoria, Tamaulipas C.P. 87000
D. R. © 2024

Consejo de Publicaciones UAT
Centro Universitario Victoria
Centro de Gestión del Conocimiento. Segundo Piso
Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. C.P. 87149
Tel. (52) 834 3181-800 • extensión: 2905 • www.uat.edu.mx
cpublicaciones@uat.edu.mx

Libro aprobado por el Consejo de Publicaciones UAT
ISBN UAT: 978-607-8888-40-5

Editorial Fontamara, S.A. de C.V.
Av. Hidalgo No. 47-B, Colonia Del Carmen
Alcaldía de Coyoacán, 04100, CDMX, México
Tels. 555659-7117 y 555659-7978
contacto@fontamara.com.mx • coedicion@fontamara.com.mx • www.fontamara.com.mx
ISBN Fontamara: 978-607-736-893-9

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra incluido el diseño tipográfico y de portada, sea cual fuera el medio, electrónico o mecánico, sin el consentimiento del Consejo de Publicaciones UAT.
Libro digital

Esta obra y sus capítulos fueron sometidos a una revisión de pares a doble ciego, la cual fue realizada por especialistas pertenecientes al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores. Así mismo, fueron aprobados para su publicación por el Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas y el Comité Interno de la editorial Fontamara.

Perspectivas multidisciplinares para la agricultura:

Aplicaciones para minimizar la
afectación en agroecosistemas

Coordinadores:

Julio César Chacón Hernández

Mario Rocandio Rodríguez

editorial
fontamara



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD



MVZ MC Dámaso Leonardo Anaya Alvarado
PRESIDENTE

Dr. Fernando Leal Ríos
VICEPRESIDENTE

Dr. Arturo Mora Olivo
SECRETARIO TÉCNICO

Mtro. Eduardo García Fuentes
VOCAL

Dra. Rosa Issel Acosta González
VOCAL

MVZ Rogelio de Jesús Ramírez Flores
VOCAL

Comité Editorial del Consejo de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Tamaulipas

Dra. Lourdes Arizpe Slogher • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Amalio Blanco** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dra. Rosalba Casas Guerrero** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Francisco Díaz Bretones** • Universidad de Granada, España | **Dr. Rolando Díaz Lowing** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Manuel Fernández Ríos** • Universidad Autónoma de Madrid, España | **Dr. Manuel Fernández Navarro** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dra. Juana Juárez Romero** • Universidad Autónoma Metropolitana, México | **Dr. Manuel Marín Sánchez** • Universidad de Sevilla, España | **Dr. Cervando Martínez** • University of Texas at San Antonio, E.U.A. | **Dr. Darío Páez** • Universidad del País Vasco, España | **Dra. María Cristina Puga Espinosa** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. Luis Arturo Rivas Tovar** • Instituto Politécnico Nacional, México | **Dr. Aroldo Rodrigues** • University of California at Fresno, E.U.A. | **Dr. José Manuel Valenzuela Arce** • Colegio de la Frontera Norte, México | **Dra. Margarita Velázquez Gutiérrez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dr. José Manuel Sabucedo Cameselle** • Universidad de Santiago de Compostela, España | **Dr. Alessandro Soares da Silva** • Universidad de São Paulo, Brasil | **Dr. Akexandre Dorna** • Universidad de CAEN, Francia | **Dr. Ismael Vidales Delgado** • Universidad Regiomontana, México | **Dr. José Francisco Zúñiga García** • Universidad de Granada, España | **Dr. Bernardo Jiménez** • Universidad de Guadalajara, México | **Dr. Juan Enrique Marciano Medina** • Universidad de Puerto Rico-Humacao | **Dra. Ursula Oswald** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Arq. Carlos Mario Yori** • Universidad Nacional de Colombia | **Arq. Walter Debenedetti** • Universidad de Patrimonio, Colonia, Uruguay | **Dr. Andrés Piqueras** • Universitat Jaume I, Valencia, España | **Dra. Yolanda Troyano Rodríguez** • Universidad de Sevilla, España | **Dra. María Lucero Guzmán Jiménez** • Universidad Nacional Autónoma de México | **Dra. Patricia González Aldea** • Universidad Carlos III de Madrid, España | **Dr. Marcelo Urra** • Revista Latinoamericana de Psicología Social | **Dr. Rubén Ardila** • Universidad Nacional de Colombia | **Dr. Jorge Gissi** • Pontificia Universidad Católica de Chile | **Dr. Julio F. Villegas †** • Universidad Diego Portales, Chile | **Ángel Bonifaz Ezeta †** • Universidad Nacional Autónoma de México

Índice

Capítulo introductorio	13
<i>Julio César Chacón Hernández y Mario Rocandio Rodríguez</i>	
Capítulo I	
Asociaciones entre hormigas (Hymenoptera: Formicidae) y heliconias (Zingiberales: Heliconiaceae): su potencial en la horticultura ornamental	17
<i>Miguel Ángel García Martínez y Madai Rosas Mejía</i>	
Capítulo II	
Diversidad de ácaros (Acari) asociados al cultivo de la vid (<i>Vitis vinifera</i> L.) y su perspectiva para México	59
<i>José Irving Monjarás Barrera y Cristina Domínguez Castro</i>	
Capítulo III	
La agricultura en México y sus estrategias en el control biológico de plagas agrícolas	83
<i>Griselda Gaona García y Madai Rosas Mejía</i>	
Capítulo IV	
Potencial biotecnológico de las especies endémicas vegetales en la protección de cultivos	107
<i>Francisco Reyes Zepeda y Venancio Vanoje Eligio</i>	
Capítulo V	
Acaricidas botánicos: disuasores, estimuladores y repelentes	133
<i>Julio César Chacón Hernández y José Irving Monjarás Barrera</i>	
Capítulo VI	
Influencia de las toxinas de <i>Bacillus thuringiensis</i> sobre la entomofauna no blanco en cultivos genéticamente modificados	151
<i>Agustín Hernández Juárez y Miriam Sánchez Vega</i>	

Capítulo VII

Alternativas de biorremediación en aguas, lodos y suelo, para su reutilización en la agricultura	189
<i>Sandra Grisell Mora Ravelo y Amparo Mauricio Gutiérrez</i>	

Capítulo VIII

Análisis de la diversidad genética en maíces nativos: conceptos, parámetros y metodologías	211
<i>Mario Rocandio Rodríguez y Yolanda del Rocío Moreno Ramírez</i>	

Capítulo IX

El secado solar de frutos de <i>Capsicum</i> sp para la producción de chiles secos	229
<i>Yolanda del Rocío Moreno Ramírez y Ma. Teresa de Jesús Segura Martínez</i>	

Índice de tablas

• Tabla 1	
<i>Asociaciones de especies de hormigas y heliconias e información ecológica y taxonómica</i>	29
• Tabla 2	
<i>Principales familias de ácaros reportadas en <i>Vitis vinifera</i></i>	64
• Tabla 3	
<i>Especies de la familia Phytoseiidae asociadas a <i>V. vinifera</i></i>	66
• Tabla 4	
<i>Especies de la familia Ascidae asociadas a <i>V. vinifera</i></i>	67
• Tabla 5	
<i>Especies de la familia Stigmaeidae asociados a <i>V. vinifera</i></i>	68
• Tabla 6	
<i>Especies de la superfamilia Bdelloidea asociados a <i>V. vinifera</i></i>	68
• Tabla 7	
<i>Especies de la familia Tetranychidae asociadas a <i>V. vinifera</i></i>	70
• Tabla 8	
<i>Especies de la familia Tenuipalpidae asociadas a <i>V. vinifera</i></i>	71
• Tabla 9	
<i>Especies de la familia Tydeidae asociadas a <i>V. vinifera</i></i>	73
• Tabla 10	
<i>Clasificación de los métodos de control de plagas utilizados en la agricultura</i>	89

• Tabla 11	
<i>Ejemplos de especies vegetales usadas con fines de protección de cultivos</i>	109
• Tabla 12	
<i>Clasificación de los siete tipos de rareza</i>	112
• Tabla 13	
<i>Principales áreas de investigación reportadas en estudios de protección de cultivos usando especies endémicas publicadas en la base de datos del Web of Science durante el periodo de 1990 a 2022. Entre paréntesis está el número de artículos</i>	115
• Tabla 14	
<i>Especies endémicas de México reportadas en estudios de protección de cultivos publicados en la base de datos del Web of Science durante el periodo de 1990 a 2022</i>	117
• Tabla 15	
<i>Compuestos químicos encontrados en extractos del pericarpio de frutos de <i>C. radicalis</i>. Tomado de Montelongo-Ruíz et al. (2020a)</i>	121
• Tabla 16	
<i>Insecticidas botánicos que causan disuasión, estimulación alimentaria y oviposición y repelencia en varias especies de tetránquidos</i>	140
• Tabla 17	
<i>Efecto de las proteínas Cry 1Ab y Cry 2A en especies seleccionadas de insectos no objetivo (traducido de Ba et al., 2018)</i>	163
• Tabla 18	
<i>Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos de acuerdo con NOM-004-SEMARNAT-2002</i>	196
• Tabla 19	
<i>Índice de Emulsificación por bacterias endémicas</i>	203
• Tabla 20	
<i>Formas de consumo de los frutos de especies domesticadas de <i>Capsicum</i></i>	239

Índice de figuras

• Figura 1	
<i>Publicaciones de estudios antimicrobianos con especies endémicas publicados en la base de datos del Web of Science durante el periodo de 1995 a 2022</i>	114
• Figura 2	
<i>Publicaciones de estudios de protección de cultivos usando extractos de especies endémicas publicados en la base de datos del Web of Science durante el periodo de 1990 a 2022</i>	114
• Figura 3	
<i>Bacillus thuringiensis vista al microscopio electrónico de transmisión, espora en proceso y cristal proteico con forma romboide que produce toxinas Cry</i>	154

• Figura 4	
<i>Modo de acción de la proteína Cry de Bacillus thuringiensis. 1. Solubilización, 2. Rompimiento de la protoxina, 3. Unión al receptor cadherina, 4. Formación de Pre-poro, 5. Unión receptor aminopeptidasa, 6. Inserción toxina</i>	157
• Figura 5	
<i>Modo de acción de la δ-endotoxina de Bacillus thuringiensis</i>	158
• Figura 6	
<i>Mapa global de países y mega-países con cultivos biotecnológicos en 2019</i>	160
• Figura 7	
<i>Cinética de crecimiento en los cinco tratamientos. Donde: a) T1 = control, b) T2 = AR + Cv (100%), c) T3 = AR + Cv (75%), d) T4 = AR + Cv (50%), y e) T5 = AR + Cv (25%); AR= agua residual; Cv= C. vulgaris Beyerinck CLV2</i>	193
• Figura 8	
<i>Remoción de As, Mn y Pb por C. vulgaris Beyerinck CLV2. Donde: T1 = control, T2 = AR + Cv (100%), T3 = AR + Cv (75%), T4 = AR + Cv (50%), y T5 = AR + Cv (25%); AR = agua residual; Cv = C. vulgaris Beyerinck CLV2. (P < 0.001), (n = 20)</i>	194
• Figura 9	
<i>Porcentaje de remoción de As, Cu y Fe por P. australis en lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Cd. Victoria, Tamaulipas</i>	198
• Figura 10	
<i>Contenido inicial y final de As (a), Cu (b) y Fe (c) presentes en lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Cd. Victoria, Tamaulipas</i>	199
• Figura 11	
<i>Diésel residual a diferentes concentraciones (a) Bacillus pumilus MIHC1b y (b) Paenibacillus lautus MIHC27</i>	204
• Figura 12	
<i>Clasificación del picor de frutos de Capsicum con base en relación las Unidades de Picor Scoville (SHU)</i>	237

Prefacio

El presente libro *Perspectivas multidisciplinares para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas*, aporta conocimientos técnicos-científicos sobre los agroecosistemas, la biodiversidad, agrobiodiversidad y el control biológico desde una perspectiva multidisciplinaria. Este trabajo se compone de diez capítulos en los cuales los autores analizan desde diferentes perspectivas a la agricultura y los agroecosistemas naturales proponiendo alternativas que permitan entender y minimizar las diferentes afectaciones que estos sistemas pudieran presentar.

El Capítulo II evidencia la diversidad de hormigas que cohabitan en los cultivos de heliconias; se obtiene información relevante para la toma de decisiones en el manejo integrado de plagas en dicho cultivo. El Capítulo III presenta una revisión analítica sobre investigaciones de ácaros de importancia agrícola que afectan el cultivo de la vid en México. El Capítulo IV enfatiza la información sobre estrategias bio-ecológicas para controlar los insectos plagas en los cultivos, las cuales son una alternativa en la reducción de mismos. El Capítulo V se analiza especies de plantas endémicas respecto a su adaptación a los diferentes microambientes donde crecen y pueden mostrar potencial biotecnológico para elaborar compuestos químicos aplicables al combate de plagas y enfermedades.

En los Capítulos VI, VII, VIII y IX se presentan revisiones de literatura amplias sobre: investigaciones y usos de extractos de diferentes plantas sobre el control de especies de ácaros de la familia Tetranychidae; los riesgos de las poblaciones de artrópodos y sus afectaciones en las relaciones tróficas dentro de los sistemas agrícolas; se presenta también una revisión que resalta la importancia de la aplicación de los procesos de biorremediación para preservar recursos biológicos, y un análisis de conceptos y metodologías utilizadas para medir la diversidad genética sobre todo en el cultivo de maíz; finalmente, el Capítulo X trata sobre el secado de frutos de *Capsicum* sp. para la producción de chiles secos como un proceso de conservación de dicho recurso.

Esta obra resalta por sus aportaciones novedosas en cada tema. Se aborda y analiza la agricultura, sus productos, sus formas de análisis y sus relaciones con los diferentes ecosistemas en los que se produce, que son temáticas de gran interés para el público general e investigadores que podrán visualizar los temas abordados.

*Mario Rocandio Rodríguez
Julio César Chacón Hernández*

Capítulo

Introducctorio¹

Julio César Chacón Hernández²

Mario Rocandio Rodríguez³

Los agroecosistemas son un tipo específico de ecosistemas organizados en la producción de plantas útiles para los seres humanos. El estudio y análisis de estos agroecosistemas naturales son un desafío para los investigadores, ya que dentro de su ámbito de trabajo se han dado a la tarea de estudiar los diferentes niveles de organización de las comunidades bióticas y sus interacciones con los factores abióticos, surge la necesidad de crear programas de investigación que aborden simultáneamente diferentes niveles de heterogeneidad, tales como los fisiológicos, genéticos y los relacionados con la estructura de edad de los sistemas en los que muchas especies interactúan entre sí (Levins, 2004; Lewontin, 2004; Jardón-Barbolla, 2018). Los agroecosistemas involucran varios niveles de organización: individuos, poblaciones (grupos de organismos similares), comunidades (grupos de diferentes organismos) y ecosistemas, que vincula los factores abióticos del ambiente, de comunidades de poblaciones que ocurren en áreas específicas (Flora, 2001).

Los agroecosistemas se pueden distinguir del resto de los ecosistemas en la naturaleza debido al trabajo humano, el cual es importante en la estructura, ya que determina los flujos de energía y materia dentro de ellos, y pueden tener dos vías: 1) los que tienen fines o *telos* en la reproducción de la vida material de los seres humanos, y 2) los medidos por el trabajo como sistemas socio-naturales. Además, la producción está orientada por el consumo humano que está condicionado por la producción, por lo que los agroecosistemas son sistemas complejos en las que las ciencias biológicas, físicas, sociales, económicas y culturales, entre otras, forman una red, y su entendimiento exige un abordaje interdisciplinario (Jardón-Barbolla, 2018).

¹ Citar este capítulo, como: Chacón-Hernández, J. C. y Rocandio-Rodríguez, M. (coords) (2024). Introducción. En: *Perspectivas multidisciplinarias para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas*. UAT, México, pp. 13-16.

² Autor para correspondencia: jchacon@docentes.uat.edu.mx

³ Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Ciudad Victoria 87120, Tamaulipas, México.

García (2006, p. 137) menciona que la “complejidad” no está determinada aquí solo por la heterogeneidad de las partes constituyentes, sino, sobre todo, por la interdefinibilidad y mutua dependencia de las funciones que desempeñan dentro de una totalidad. Un complejo agrario rara vez cuenta con límites geográficos precisos y con un número de componentes bien definido. Las características de sus elementos, además, apenas pueden registrarse y clasificarse de forma inequívoca. Lo que caracteriza a un complejo es un comportamiento particular, es decir, un número determinado de actividades que, juntas, conforman el funcionamiento de la “totalidad”. Las actividades del complejo (la producción de cultivos particulares, la importación de elementos para la producción, el consumo de agua y nutrientes del suelo, el trabajo de los campesinos, migraciones, entradas económicas -créditos-comercio, etcétera) se interrelacionan y funcionan como una totalidad organizada.

La diversidad de recursos biológicos (biodiversidad) evolucionó para llenar los innumerables nichos ambientales de la Tierra. Los seres humanos han aprovechado esta diversidad para sobrevivir durante miles de años. La biodiversidad ha sido fundamental e integral en la evolución de la agricultura. La agrobiodiversidad es parte de la amplia gama de diversidad, donde los humanos producen y obtienen, además de alimentos, fibras, plantas, animales y microorganismos, los cuales se han modificado durante el proceso de domesticación para que puedan adaptarse y subsistir en entornos distintos o iguales a los de sus progenitores (Collins y Qualset, 1999).

Al igual que los agroecosistemas, las comunidades de lugar y de interés tienen cualidades emergentes que son la suma de las partes. Las interacciones entre poblaciones y comunidades de interés y de lugar pueden mejorar o restar valor a la sostenibilidad del sistema. La sustentabilidad es una cualidad emergente de las interacciones entre las comunidades de interés y del lugar que incluye un ecosistema saludable, economías vitales y equidad social (Flora, 2001). Las comunidades de seres vivos (por ejemplo, humanos, plantas o artrópodos) están compuestas por un grupo de individuos similares o relacionados, interaccionan entre individuos y poblaciones para el apoyo mutuo y coaliciones de comunidades que trabajan juntas o se oponen entre sí sobre la base de intereses o valores.

La agricultura implica una reducción de la biodiversidad de plantas y artrópodos, principalmente. El resultado final es la producción de un ecosistema artificial que requiere una intervención humana constante. El uso excesivo de agroquímicos aumenta temporalmente los rendimientos, pero, genera una serie de costos ambientales y sociales indeseables. Esto causa que los principios ecológicos sean continuamente ignorados o anulados. En consecuencia, los agroecosistemas presentes en la agricultura son inestables, manifestándose en un incremento en la

resistencia e incremento de la población de las plagas, además de la erosión del suelo, contaminación de los sistemas de agua, etcétera. Las pérdidas de cosechas debido a las plagas se mantienen en un 30 %, igual que hace más de treinta años. Estas son señales claras de que el enfoque basado en pesticidas para el control de plagas ha llegado a sus límites. Se necesita un enfoque alternativo, uno basado en principios ecológicos para aprovechar al máximo los beneficios de la biodiversidad en la agricultura (Altieri y Nicholls, 1999; Altieri y Nicholls, 2004).

Todos los capítulos de *Perspectivas multidisciplinarias para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas* abordan estos componentes (agroecosistemas, biodiversidad, agrobiodiversidad, control biológico) de la sostenibilidad, y lo hacen desde una perspectiva multidisciplinaria. En el segundo capítulo se estudió la diversidad de hormigas que cohabitan en los cultivos de heliconias, categorizándolas como benéficas o perjudiciales de acuerdo con el tipo de interacción con la planta, obteniendo información relevante para el manejo integrado de plagas. En el tercer capítulo se presenta una revisión del panorama en México sobre el conocimiento de los ácaros en el cultivo de la vid en comparación a otros países productores de uva. En el siguiente capítulo, los autores promueven el desarrollo sostenible presentando algunas estrategias bioecológicas para controlar los insectos plagas de cultivos o como una alternativa en la reducción de estos; esta información permitirá tener un conocimiento actualizado de los principales problemas fitosanitarios e incidencias de plagas en los cultivos de importancia agrícola.

En el quinto capítulo se analiza a las especies de plantas endémicas que, debido a su historia evolutiva y adaptación a los diferentes microambientes donde se desarrollan, tienen el potencial biotecnológico de ser consideradas como materia prima para elaborar nuevos compuestos químicos que permitan la elaboración de productos relacionados con el combate de plagas, enfermedades y protección de cultivos. En el siguiente capítulo, se realiza una revisión del conocimiento y uso de los extractos de las plantas, así como los efectos de repelencia, estimulador y disuasor, los cuales afectan a la biología de las especies de ácaros de la familia Tetranychidae. En el séptimo capítulo, se revisan y explican los probables riesgos sobre las poblaciones de artrópodos, la afectación en las relaciones tróficas y sobre la diversidad de especies dentro de los sistemas agrícolas modificados con *B. thuringiensis*, a través del tiempo. En el octavo capítulo se realizó una revisión de la aplicación de los procesos de biorremediación para preservar recursos biológicos, ya que aportan una gran cantidad de servicios ambientales, sirven para la producción de alimentos y biomasa en general, y hábitat para muchas especies. Después se presenta un análisis de los conceptos, parámetros y metodologías para medir la diversidad genética en maíces

nativos. Este análisis sobre las plantas de interés alimenticio (como el maíz) tiene la capacidad de incidir en el mejoramiento, aprovechamiento y conservación de recursos alimenticios de importancia sociocultural, con atributos específicos y cuyo uso sustenta la producción y bienestar humano. El décimo capítulo versa sobre el secado bajo el sol de *Capsicum* sp. para la producción de chiles secos, proceso de gran importancia ya que es una forma de conservación de chile, actividad que inicia exponiendo los frutos a la luz del sol para reducir el contenido de agua y obtener productos sólidos, y con ello prevenir su deterioro; además de contribuir al impulso en el desarrollo del sector primario, ya que generan ingresos económicos a distintos niveles: regional, nacional y mundial.

Referencias

- Altieri, M. A. y Nicholls C. I. (1999). Biodiversity, ecosystem function, and insect pest management in agricultural systems. En: Collins W.W., Qualset C.O. (eds.). *Biodiversity in agroecosystems*. CRC Press. Boca Raton, Florida.
- Altieri, M. A. y Nicholls C. I. (2004). *Biodiversity and pest management in agroecosystems*. 2nd ed. Food Products Press. Binghamton, NY.
- Collins, W. W. y Qualset, C. O. (1999). *Biodiversity in agroecosystems*. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Flora, C. (2001). Introduction. En: *Interactions Between Agroecosystems and Rural Communities*. Flora C. (ed.). CRC Press, Boca Ratón. Florida. USA.
- García, R. (2006). *Sistemas complejos: Conceptos, métodos y fundamentación epistemología de la investigación interdisciplinaria*. Barcelona, España.
- Jardón-Barbolla, L. (2018). Agroecology as necessary knowledge to transform the mutual determination nature/society. *Interdisciplina*, 6(14), 29-49. <http://dx.doi.org/10.22201/ceiich.24485705e.2018.14.63379>
- Levins, R. (2004). Toward a population biology, still. En Singh, R. S., Uyenoyama, M. K. *The evolution of population biology*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lewontin, R. (2004). Building a science of population biology. En Singh, R. S., Uyenoyama, M. K. *The evolution of population biology*. Cambridge University Press, Cambridge.

Capítulo I

Asociaciones entre hormigas (*Hymenoptera: Formicidae*) y heliconias (*Zingiberales: Heliconiaceae*): su potencial en la horticultura ornamental¹

Miguel Ángel García Martínez²

Madai Rosas Mejía³

Resumen

La horticultura ornamental es una de las labores con mayor rendimiento en el sector agrícola a nivel global, este éxito se debe a las características estéticas de las plantas de ornato, ya sea en estado natural o preservado. Su uso tanto en el interior como en el exterior de zonas urbanas aumenta su importancia en concordancia con el crecimiento económico de la sociedad. Dentro de las flores tropicales ampliamente cultivadas, las del género *Heliconia* son las más comercializadas debido a la exuberancia de sus inflorescencias y su gran durabilidad postcosecha. Las interacciones antagonistas y mutualistas entre algunas especies de heliconias e insectos se han descrito ampliamente en condiciones naturales y en menor grado en agroecosistemas ornamentales, por su importancia ecológica y económica. Entre la entomofauna asociada en estos agroecosistemas, los formícidos son de los grupos más diversos y abundantes que influyen significativamente sobre la estructura trófica de las comunidades de artrópodos actuando como depredadores, consumidores primarios o secundarios o como base alimentaria. El estudio de las interacciones

¹ Citar este capítulo como: García-Martínez, M.A. y M. Rosas-Mejía (2022). Asociaciones entre hormigas (*Hymenoptera: Formicidae*) y heliconias (*Zingiberales: Heliconiaceae*): su potencial en la horticultura ornamental. En: *Perspectivas multidisciplinares para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas*. UAT, México, pp. 17-58.

² Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias Región Orizaba-Córdoba, Amatlán de los Reyes, Veracruz, México, miguelgarcia05@uv.mx

³ Instituto de Ecología Aplicada, Universidad Autónoma de Tamaulipas. División del Golfo 356, Col. Libertad, 87019, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. marosas@docentes.uat.edu.mx

entre diversos grupos tróficos de insectos y las heliconias ornamentales representa un enfoque importante para proponer estrategias de manejo agroecológico en dichos cultivos hortícolas. El objetivo del presente estudio fue documentar según la literatura citada la diversidad de hormigas que cohabitan en los cultivos de heliconias, categorizándolas como benéficas o perjudiciales tomando en cuenta el tipo de interacción que presenta con la planta, obteniendo información relevante para la toma de decisiones en el manejo integrado de plagas.

Introducción

La horticultura es una ciencia que comenzó desde el momento en que el ser humano inició un estilo de vida sedentario y pasó de ser cazador-recolector a cultivador de plantas para uso alimentario, ornamental o medicinal. Esta ciencia es una disciplina milenaria y una actividad humana expresada en diferentes facetas de la producción agrícola, el medio ambiente y la sociedad (Dixon y Aldous, 2014). En particular, la horticultura ornamentales una de las labores con mayor rendimiento en el sector agrario a nivel global (Dehnen et al., 2007). Esto se refiere a la práctica del aprovechamiento comercial de especies vegetales que inalteradas o preservadas agradan visualmente las expectativas de los consumidores (Leyva-Ovalle et al., 2011). Su importancia ha aumentado con el desarrollo económico de la sociedad y su posterior uso en el interior y exterior de las áreas urbanas (Ramírez-Rojas et al., 2011).

México tiene una reconocida capacidad para producir estas plantas gracias a su diversidad climática. Se ha registrado que se cultivan aproximadamente 349 especies de flor de corte, plantas para maceta y hojas para follajes (Ramírez-Rojas et al., 2011). En los últimos años han aumentado los sembradíos enfocados en la horticultura ornamental, específicamente de especies de regiones tropicales debido a una importante demanda de dicho producto (De Souza Born et al., 2009). Dentro de las flores tropicales ampliamente cultivadas, se distinguen las del género *Heliconia* (Heliconiaceae: Zingiberales), que son muy comercializadas debido a la exuberancia de sus inflorescencias y su gran durabilidad postcosecha (Assis et al., 2002).

El género *Heliconia* cuenta con aproximadamente 220 especies y es exclusivo dentro de la familia Heliconiaceae del orden de los Zingiberales, aunque están distribuidas en mayor medida en áreas neotropicales, es posible encontrarlas desde el norte de México hasta el sur de Brasil (Dahlgren et al., 1985; Kress, 1990). Un reducido grupo paleotropical, ocho especies, se encuentra en islas del Pacífico Sur (Kress, 1985). Existen unas 40 especies de heliconias brasileñas, con dos áreas principales de distribución: la cuenca del Amazonas y el bosque costero del Atlántico (Kress, 1990); para México se han registrado 16 especies con origen y diversidad genética en el país (Gutiérrez-Báez et al., 2000; Jerez, 2007). Estas

plantas herbáceas son monocotiledóneas perennes y rizomatosas con distinto patrón de colonización vegetativa y número de vástagos dependientes del tipo de especie. Presentan gran potencial ornamental como flor de corte, porque sus inflorescencias terminales péndulas o erectas con tonalidades vistosas y sus brácteas posibilitan su empaquetado (Assis et al., 2002). También poseen nectarios florales y extra florales que en conjunto con su follaje ofrecen recursos y condiciones a diversos organismos (Aristizábal et al., 2013). Este grupo es ecológicamente importante debido a que son especies pioneras en la sucesión secundaria de los bosques tropicales (Santos et al., 2009), con un papel fundamental en la coevolución con los artrópodos, vertebrados y otras plantas (Ballah y Starr, 2010).

Las plantas del género *Heliconia* no solo proporcionan alimento y hábitat para varios invertebrados y patógenos terrestres y acuáticos (Assis et al., 2002), también conforman pequeños y complejos sistemas ecológicos organizados en diferentes niveles tróficos. Se han reportado interacciones negativas con virus, bacterias y hongos que actúan como patógenos infectando sus raíces, brotes, hojas, inflorescencias, frutos y semillas (Assis, 2002). Las interacciones con diversos insectos (Arthropoda: Insecta) han sido positivas, negativas y neutras principalmente con coleópteros, lepidópteros y formícidos que se alimentan o viven dentro de sus brácteas. La asociación de insectos y plantas tropicales es una de las más estudiadas (no cultivadas). Sin embargo, hay muchos organismos que son visitantes incidentales de *Heliconia*. También hay herbívoros especializados que incluyen escarabajos hispinos (Chrysomelidae) y orugas (Nymphalidae). Los organismos anteriores junto con las hormigas son los principales consumidores de follaje de *Heliconia* (Seifert, 1982). Casi todas las especies de escarabajos Hispinae son parásitos obligados de plantas del orden de Zingiberales (Strong, 1977). Los estudios de las comunidades de insectos asociados a este género vegetal se han centrado en organismos que se alimentan de hojas jóvenes enrolladas y en los insectos que viven dentro de las brácteas florales llenas de agua, con escasa información sobre la biología de otros herbívoros invertebrados (por ejemplo, caracoles, babosas, ácaros y pulgones) (Aristizábal et al., 2013; Benítez-Malvido et al., 2014).

Se tiene escaso conocimiento sobre el papel que desempeñan los artrópodos asociados a las especies de heliconias (De Souza Born et al., 2009; Aristizábal et al., 2013; Gutiérrez-Martínez, 2013). Los pocos estudios realizados en este tema han sido sobre la biodiversidad de insectos asociados (Henao y Ospina, 2008; De Souza Born et al., 2009, Landero-Torres et al., 2014a). De hecho, se ha sugerido que los insectos actúan de forma benéfica protegiendo a las heliconias contra plagas potenciales (Aristizábal et al., 2013). El estudio de las interacciones entre los distintos grupos tróficos de insectos y las heliconias ornamentales representan un

enfoque importante para proponer estrategias de manejo agroecológico en dichos cultivos hortícolas.

Se conoce poco sobre el rol de los insectos asociados a los cultivos de heliconias y los escasos estudios realizados se dirigen a las especies como plagas potenciales (De Souza Born et al., 2009). Entre la entomofauna asociada a este tipo de agroecosistemas, las hormigas son uno de los grupos más diversos y abundantes (Henaó y Ospina, 2008; Aristizábal et al., 2013). Debido a sus características biológicas y ecológicas, las hormigas juegan un rol importante en la mayoría de los ecosistemas terrestres (Diamé et al., 2018). Además, influyen significativamente sobre la estructura trófica de las comunidades de artrópodos actuando como consumidoras primarias o secundarias o como base alimentaria para otros consumidores (Hölldobler y Wilson, 1990; De Souza Born et al., 2009).

Algunas de las interacciones entre hormigas y heliconias han sido consideradas perjudiciales mientras que son benéficas (De Souza Born et al., 2009). Dichas interacciones podrían considerarse como mutualistas debido a que ciertas estructuras morfológicas de las heliconias proveen refugio y/o alimento a las hormigas (Ballah y Starr, 2010). También se ha sugerido que las hormigas visitantes podrían beneficiar a la planta hospedera al defenderla contra sus enemigos naturales, al dispersar sus semillas y polinizándolas ocasionalmente (Ramírez et al., 2001; De Souza Born et al., 2009; Gutiérrez-Martínez, 2013).

Este estudio documentó la diversidad de hormigas que cohabitan en los cultivos de heliconias según la literatura publicada hasta 2023, categorizándolas como benéficas o perjudiciales. Se espera que esta recopilación sea útil para desarrollar este tema escasamente abordado.

Materiales y métodos

Se realizó una búsqueda intensiva de estudios publicados sobre las interacciones ecológicas entre hormigas y heliconias con la finalidad de conocer la influencia que tienen estos insectos en dichos cultivos. La búsqueda incluyó todos los artículos a pesar de los diferentes enfoques o líneas de investigación de cada uno. Después se analizaron los temas de cada línea de investigación y se recopiló la información de los estudios más relevantes.

Búsqueda de la información

Se buscaron publicaciones en diferentes bases de datos académicas, como: Redalyc, EBSCO host (Academic Search Complete), SciELO y Google Scholar (Google Académico). En las búsquedas se utilizaron las palabras clave: *interacciones*, *insectos*, *hormigas* y *heliconias*, para obtener todos los artículos publicados en esta área.

Esta búsqueda no fue limitada a determinado rango de tiempo para conocer todos los trabajos que hablen de las relaciones existentes entre las hormigas y las *heliconias*, se consideraron todas las publicaciones escritas en inglés, español, portugués.

Organización de la información

Las publicaciones totales fueron clasificadas por: ubicación del sitio de estudio, año de publicación y tipo de interacción. Las publicaciones se clasificaron en los siguientes temas generales: patrones ecológicos; relaciones de hormigas con cultivos de heliconias y variables ambientales; factores económicos; importancia económica y como afectan las interacciones biológicas el rendimiento y las utilidades. También se enlistó el tipo de interacción que presenta cada especie de insecto, obteniendo en cada caso la cita, el año, especie de heliconia, especie de hormiga, hábitos de anidación de la especie de hormiga y gremios tróficos.

Finalmente, la información se agrupó en 6 temas específicos: 1. Asociaciones, 2. Biodiversidad, 3. Comportamiento, 4. Conservación, 5. Manejo agrícola y 6. Producción. Lo anterior, de acuerdo con el contenido de los artículos.

Resultados

En el estudio realizado se encontraron 22 artículos que estudian de forma simultánea a las hormigas y las heliconias, los cuales fueron publicados en un periodo que va de 1967 a 2017 en un total de nueve países (Tabla 1). El tema de “Asociaciones” estuvo representado por nueve publicaciones, seguido por “Biodiversidad” (siete) y “Comportamiento” abordado en tres, los temas de “Conservación”, “Manejo agrícola” y “Producción” se documentaron exclusivamente en una publicación en cada caso. El país con mayor representatividad fue México (con seis publicaciones), seguido por Perú (con cuatro), Colombia y Costa Rica (cada uno con tres) y Brasil con dos publicaciones. Ecuador, Malasia, Panamá y Trinidad y Tobago estuvieron representados únicamente por una publicación cada uno.

Horticultura ornamental

La horticultura ornamental es el aprovechamiento comercial de especies vegetales que inalteradas o preservadas logran la satisfacción estética que busca el consumidor (Landro-Torres et al., 2014a). Su importancia ha aumentado con el crecimiento económico de la sociedad y su uso en espacios interiores y exteriores de áreas urbanas (Leyva-Ovalle et al., 2011). En los últimos años se han aumentado los cultivos preparados para la horticultura ornamental, especialmente de especies de regiones tropicales, debido a una importante demanda por parte de los consumidores (De Souza Born et al., 2009).

La horticultura posee un papel destacado en la introducción actual de plantas, y el valor monetario de las importaciones de especies vivas en diferentes partes del mundo aumenta constantemente. Históricamente, los jardines botánicos, componentes importantes de la horticultura, desempeñaron un rol fundamental en la exhibición, el cultivo y la distribución de nuevos descubrimientos de plantas (Van Kleunen et al., 2018).

La industria multimillonaria de la horticultura ornamental en Estados Unidos (la industria verde) aporta a la economía de todos los estados. Los productos para invernaderos y viveros se encuentran entre los 10 principales productos básicos producidos en 42 estados. El valor estimado de las ventas y los servicios directamente relacionados con la industria verde de Iowa en 2004 fue de \$ 311.5 millones de dólares (Haynes et al., 2007). En América Latina, Asia y África, el consumo de flores y plantas ornamentales presenta las principales condiciones típicas de los países en desarrollo, que comparte con otras naciones.

México posee una amplia capacidad para producir especies ornamentales debido a su amplia diversidad climática, teniendo más de 349 especies de flores de corte, plantas para macetas y hojas para follajes (Ramírez-Rojas et al., 2011). Por esta razón, la horticultura ornamental ha tomado importancia debido a la demanda en el país y en el extranjero de estos productos (Landerro-Torres et al., 2015). La utilización de plantas nativas en el mercado interno de flores es limitada, exceptuando casos como la nochebuena, que su valor puede calcularse a casi 200 millones de pesos, aunque las variedades cultivadas de dicha especie provienen de otros países. México presenta diversas características para competir en el mercado y es probable que aumente su presencia en la comercialización de ornamentales con cultivos (Martínez, 2003).

Generalidades de las heliconias

La familia Heliconiaceae (Zingiberales) está representada únicamente por monocotiledóneas herbáceas perennes del género *Heliconia* (Santos et al., 2009). Su rizoma es ramificado en racimos, puesto que emite brotes o vástagos, los cuales dan origen a un pseudotallo aéreo y erecto que está formado por un eje recubierto por la base de hojas alternas que se solapan (posición dística) (Jerez, 2007). El género *Heliconia* está formado por plantas que pueden alcanzar los 10 m de alto, con hojas de nervadura pinnada cuyos nervios se prolongan paralelos hacia los bordes del limbo. La ausencia de un tejido de refuerzo en los márgenes hace que los nervios se desgarren en forma típica de lacinias (Jerez, 2007).

Su verdadero tallo está formado por un rizoma provisto de yemas vegetativas y abundantes con largas y fuertes raíces fibrosas. El hábito de crecimiento, de

acuerdo con la forma y disposición de las hojas, puede presentarse musoide (hojas orientadas verticalmente con pecíolos largos), zingiberoide (hojas en la mayoría de los casos sésiles y dispuestas en posición horizontal con pecíolos cortos) (Jerez, 2007). La inflorescencia es prominente, alcanzan medidas de 35 a 50 cm de longitud (Jerez, 2007). Está formada por un pedúnculo y estructuras modificadas llamadas brácteas cincinales que se distribuyen a lo largo de un raquis rígido o flexible en forma dística o espiral con un ángulo de inserción variable (Jerez, 2007).

Se conocen 180 especies de heliconias distribuidas desde el centro de México hasta Sudamérica (Jerez, 2007). Su centro de diversificación es Colombia, dado que cuenta con la mayor riqueza de especies silvestres (100) y endémicas (48). En el caso de México, se han registrado 16 especies con origen y diversidad genética en el país (Gutiérrez-Báez, 2000; Jerez, 2007).

Este grupo presenta una alta capacidad ornamental como flor de corte por los colores de sus inflorescencias y sus brácteas que posibilitan su embalaje (Assis et al., 2002). Usualmente, se propagan de manera natural a través del desarrollo de las yemas vegetativas presentes en su tallo rizomatoso (Leyva-Ovalle et al., 2011). Debido a sus características vegetativas, en la producción ornamental generalmente son producidas mediante multiplicación artificial (Leyva-Ovalle et al., 2011). Su producción elevada y su floración inicia a principios de primavera y termina a mediados de otoño (Costa et al., 2011).

Importancia ecológica de los cultivos de heliconias

Las heliconias presentan nectarios florales y extra florales que en conjunto con su follaje ofrecen recursos y refugio a diversos organismos (Aristizábal et al., 2013). Se ha documentado que los cultivos de heliconias son importantes ecológicamente por los servicios que ofrecen al ambiente y a la biodiversidad regional. Por ejemplo, su crecimiento rizomatoso evita la erosión del suelo en laderas de barrancos con pendientes pronunciadas (Sosa-Rodríguez, 2013). Además, se han reportado interacciones positivas con diversas aves (Chordata: Aves) que consumen sus frutos y dispersan sus semillas, particularmente los colibríes (Apodiformes: Trochilidae), y con murciélagos (Mammalia: Chiroptera) que actúan como visitantes florales y polinizadores. Por ejemplo, el género de colibrí *Phaethornis* es un conocido especialista en *Heliconia* (Snow y Teixeira, 1982).

Las plantas del género *Heliconia* no solo proporcionan alimento y hábitat para varios invertebrados y patógenos terrestres y acuáticos (Assis et al., 2002), también conforman pequeños y complejos sistemas ecológicos organizados en diferentes niveles tróficos. Se han reportado interacciones negativas con virus, bacterias y hongos que actúan como patógenos infectando sus raíces, brotes, hojas,

inflorescencias, frutos y semillas (Assis et al., 2002). Las interacciones con diversos insectos (Arthropoda: Insecta) han sido positivas, negativas y neutras principalmente con coleópteros, lepidópteros y formícidos que se alimentan o viven dentro de sus brácteas. La asociación de insectos y plantas tropicales es una de las más estudiadas (no cultivadas). Sin embargo, hay muchos organismos que son visitantes incidentales de *Heliconia*. También hay herbívoros especializados que incluyen escarabajos hispinos (Chrysomelidae) y orugas (Nymphalidae). Los organismos anteriores junto con las hormigas son los principales consumidores de follaje de *Heliconia* (Seifert, 1982). Casi todas las especies de escarabajos Hispinae son parásitos obligados de plantas del orden de Zingiberales (Strong Jr., 1977). Los estudios de las comunidades de insectos asociados a este género vegetal se han centrado en organismos que se alimentan de hojas jóvenes enrolladas y en los insectos que viven dentro de las brácteas florales llenas de agua, con escasa información sobre la biología de otros herbívoros invertebrados (por ejemplo, caracoles, babosas, ácaros y pulgones) (Aristizábal et al., 2013; Benítez-Malvido et al., 2014).

Los artrópodos y otros invertebrados que viven en estas plantas pueden alimentarse y reproducirse de heliconias y también pueden utilizarlas como refugio, convirtiéndose en un microhábitat importante para varios grupos funcionales. Las propiedades de la red de heliconia-invertebrados parecen mantenerse en hábitats perturbados por humanos y en condiciones forestales, a pesar de las diferencias en la riqueza y composición de especies. Las especies de *Heliconia* contienen una amplia gama de órdenes de artrópodos y otros invertebrados y contribuyen a sustentar la diversidad de artrópodos en hábitats tropicales perturbados naturales y humanos. Debido a que proporcionan alimento y hábitat para la fauna asociada y varios microhábitats para la colonización. Las heliconias podrían usarse como elementos de hábitat para la conservación de invertebrados en paisajes impactados por humanos (Benítez-Málvido et al., 2014). Tales interacciones biológicas demuestran el valor ecológico de las heliconias para el ser humano, el ambiente y la biodiversidad.

Importancia de las hormigas (Hymenoptera: Formicidae)

Las hormigas se distribuyen en la mayoría de las regiones geográficas a nivel mundial. Son altamente abundantes en las regiones tropicales y subtropicales donde su biomasa representa del 10 al 15 % del total de la biomasa animal (Hölldobler y Wilson, 1990). Se pueden encontrar desde el subsuelo hasta la copa de los árboles y tienen funciones como depredadoras, herbívoras o detritívoras, y son importantes en los procesos fisicoquímicos del suelo como la descomposición y reciclaje de nutrientes (Rojas, 2001). Los atributos de los ensambles de hormigas (diversidad alfa, beta y gamma) pueden ser aprovechados para evaluar el impacto del cambio

de uso de suelo y resolver la incógnita sobre qué actividades antrópicas mantienen la biodiversidad nativa (Andersen et al., 2002).

Existe evidencia de que las hormigas nectarívoras establecen interacciones con plantas de las cuales obtienen su alimento (Gutiérrez-Martínez, 2013; Ballah y Starr, 2010). Muchas veces constituyen una defensa contra posibles amenazas y estas relaciones involucran desde sistemas obligados hasta aquellos con relaciones difusas (Farji-Brener et al., 1992). Las hormigas afectan a las plantas cuidando / defendiendo o depredando / desplazando a los herbívoros, pero también depredando / desplazando a los depredadores y polinizadores, esparciendo propágulos de patógenos de plantas (Wielgoss et al., 2014), polinizando flores, depredando / dispersando semillas y cambiando las condiciones del suelo (Mestre et al., 2014). Su predominio ecológico en los sistemas agroforestales tropicales probablemente afecta a los árboles de múltiples formas, por ejemplo, crecimiento de plantas, desarrollo de hojas y frutos.

Estos organismos son muy importantes en los ecosistemas tropicales y subtropicales, ya que son consumidores e ingenieros de ecosistemas. Las hormigas influyen en la diversidad microbiana de invertebrados, plantas y suelos y alteran la productividad de la vegetación. Como invertebrados comunes y numéricamente dominantes, las hormigas también pueden servir como especies indicadoras para monitorear las prácticas de conservación y manejo (Wills y Landis, 2018).

Mirmecofauna asociada a heliconias: estudios realizados

Actualmente, se tiene escaso conocimiento del papel de los cultivos ornamentales como reservorios de biodiversidad y las investigaciones realizadas se enfocan a especies plaga (Landeró-Torres et al., 2014a). Por ejemplo, Ramírez et al. (2001) estudiaron las interacciones entre plantas, homópteros y hormigas en el sotobosque de relictos de bosque seco en Colombia. Registraron un total de 352 interacciones entre hormiga-planta y homópteros-planta y hormiga donde 32 % son distribuidas en 91 especies vegetales, 67 especies de hormigas y nueve familias de homóptera. El 47 % de las asociaciones reportadas implicó el uso por parte de los formícidos de diferentes estructuras de las plantas como refugios temporales o sitios de anidamiento. El restante 53 % está relacionado con la recolección de miel de hemípteros y de sustancias azucaradas en nectarios extraflorales. Especies como *Wasmannia auropunctata* (Roger, 1863) (17 %), *Dolichoderus bispinosus* (Olivier, 1792) (11 %) y *Brachymyrmex heeri* Forel, 1874 (7 %) fueron reportadas con más frecuencia. Las plantas más usadas fueron *Heliconia stricta* (Huber, 1906) (8 %), *Philodendron* sp. nov. (7 %) y *Passiflora coriacea* Schltld. 1856 (5 %). Entre las relaciones registradas, predominan las generales porque las hormigas explotan recursos aparentemente

de forma oportunista y las plantas pueden encontrarse en óptimo estado aun sin hormigas.

Henao y Ospina (2008) estudiaron los insectos asociados a heliconias en el eje cafetalero colombiano. Colectaron 288 insectos pertenecientes a 10 órdenes, 43 familias, 58 géneros y 101 especies. Los órdenes más relevantes fueron: Diptera, Coleoptera, Hemiptera, Neuroptera e Hymenoptera. En este trabajo, dentro del orden Hymenoptera, se colectaron 23 especies y 32 ejemplares, correspondientes a 12 familias y 13 géneros. Se destacan las familias Ichneumonidae, Vespidae y Formicidae, por su gran abundancia.

Aristizábal et al. (2013) realizaron un muestreo de la entomofauna y las prácticas de manejo agrícola en plantaciones productoras de Zingiberales como Heliconiaceae, Zingiberaceae, Strelitziaceae y Marantaceae en Colombia. Los órdenes con mayor abundancia fueron Hemiptera (23 familias), Coleoptera (13 familias), Diptera (24 familias), Hymenoptera (15 familias) y Lepidoptera (7 familias). Las especies fitófagas más comunes fueron cucarrones (Chrysomelidae), escamas (Coccidae: *Ceroplastes* sp., *Saissetia* sp.), chicharritas (Cicadellidae), chinches apestosas (Pentatomidae), chinches (Coreides) y hormigas cortadoras de hojas (*Atta* spp. y *Acromyrmex* spp.). Otros insectos como coleópteros de la familia Curculionidae como *Methamasius* y *Pandeleiteius* fueron localizados en rizomas o en pseudotallos. Los insectos benéficos colectados se presentaron en varias familias de predadores (Coccinellidae, Chrysopidae y Reduviidae), pero un bajo número de parasitoides (Ichneumonidae, Braconidae, Chalcididae y Stephanidae). Dicho estudio reporta nuevos insectos hospederos asociados con *Heliconia*. Sin embargo, se han observado hormigas defoliadoras como *Atta cephalotes* (Linnaeus, 1758) y *Acromyrmex* spp. (Mayr) que en ocasiones dañan a este tipo de sembradíos (Aristizábal et al., 2013).

Gutiérrez-Martínez (2013) estudió la relación y la actividad de una colonia de *Linepithema dispertitum* (Forel, 1885) en la base de los pseudotallos de *Heliconia rostrata* Ruiz y Pav. (1802) en diferentes momentos del día y su preferencia ante cinco estados de inflorescencia en Costa Rica. La abundancia de *L. dispertitum* cambió significativamente entre en los estados de inflorescencia que visita, siendo menos abundante en las inflorescencias cerradas y las que tienen brácteas marchitas y con mayor abundancia en las inflorescencias abiertas y sin brácteas marchitas. Este autor sugiere que la abundancia de esta especie responde a disponibilidad de alimento que obtiene de *H. rostrata*. También observó que a pesar de alimentarse del néctar de *H. rostrata* la colonia de hormigas no mostró una actividad defensiva hacia ésta, ni se comportó de forma agresiva en presencia de intrusos. Esta especie se asocia con insectos de la familia Pseudococcidae sólo en inflorescencias con brácteas marchitas. En estudios similares realizados en Colombia se han documentado que

las colonias de *L. dispertitum* se asocian con plantas *H. stricta* y *Heliconia platystachys* (Baker, 1893; Ramírez et al., 2001). Se ha reportado que, a pesar de que diversas especies de hormigas se alimentan de las secreciones producidas por heliconias, dichos insectos no siempre defienden a las plantas, puesto que en ocasiones pueden alimentarse tanto del néctar de la planta como de sustancias dulces producidas por insectos (Rico-Gray y Morais, 2006).

Landero-Torres et al. (2014a) evaluaron por vez primera el papel de un cultivo de heliconias ornamentales en México como hábitat para conservar la biodiversidad de insectos utilizando a los ensambles de hormigas como bioindicadores. En total capturaron 9 022 individuos de la casta obrera, pertenecientes a siete subfamilias, 14 tribus, 27 géneros y 55 especies. La transformación de vegetación nativa a cultivo ornamental tropical impacta más a la riqueza, diversidad y dominancia, que a la composición del ensamble. Resaltan la importancia de la composición de especies como parámetro predictor de los cambios funcionales del paisaje. Reportan al género *Camponotus* como uno de los más diversos en estos cultivos y sugieren que algunas de sus especies depredadoras que viven en los árboles pueden ser utilizadas como agentes de control biológico (Cuezzo, 1998).

Landero-Torres et al. (2014b) compararon la diversidad alfa y beta de la mirmecofauna asociada a cultivos ornamentales de zingiberáceas, heliconias y palmas con diferente manejo agrícola y un remanente de selva mediana en Ixtaczoquitlán, Veracruz, México. En total colectaron 965 hormigas obreras pertenecientes a 37 especies, 25 géneros, 16 tribus, y siete subfamilias. La riqueza, la diversidad y la equidad de especies disminuyeron significativamente conforme aumentó el grado de manejo e intensificación agrícola. La mirmecofauna de la selva fue significativamente distinta de las que habitan los tres cultivos ornamentales. Estos autores sugieren que el impacto de la horticultura ornamental sobre la biodiversidad se puede deber principalmente al manejo agrícola y al uso excesivo de agroquímicos, los cuales generan pérdida local de la diversidad de especies. Los sembradíos ornamentales con una baja intensificación de manejo agrícola podrían representar un hábitat que ofrece recursos y condiciones a diferentes gremios de hormigas y otros invertebrados.

Landero-Torres et al. (2015) analizaron la composición, riqueza y el papel de las hormigas asociadas a cultivos de heliconias ornamentales en el centro de Veracruz, México. En total identificaron 48 especies de hormigas. Se registró una riqueza más alta en *Heliconia psittacorum* L.f. (1782) respecto a *H. stricta*. A pesar de que la estructura morfológica de las heliconias presenta recursos y condiciones para distintas especies, el comportamiento territorial de estas podría estar generando un mosaico para forrajear o anidar.

La presencia de hormigas se ha asociado con problemas fitosanitarios, como es el caso del manchado de la flor causada por fumagina y presencia de hormigas, que provoca problemas en el manejo y cosecha, en el cultivo de *H. rostrata*, ocasionando reducción en la superficie del sembradío (Ortíz et al., 2015).

En un estudio realizado en Brasil por Bénitez-Malvido y Dáttilo (2015), se registró que la mayoría de los herbívoros que atacaron a las especies, híbridos y cultivares de heliconias eran herbívoros generalistas. El herbívoro más generalista fue una hormiga cortadora de hojas (género *Atta*). Esta especie de hormiga atacó a todas las especies de *Heliconia* estudiadas. Aun cuando está bien documentado que las hormigas cortadoras de hojas tienen un nivel de selectividad para algunas especies de plantas, este grupo de hormigas se consideran la principal plaga agrícola en América del Sur (Della Lucia, 2011). Dicho estudio enmarcó la importancia de que este tipo de hormigas atacan diferentes variedades y especies cultivadas de *Heliconia* en el estado de Pernambuco, Brasil.

Conclusiones

De acuerdo con la información obtenida, se observa una importante producción de heliconias e investigaciones en el continente americano, mientras que, para el Sudeste asiático, se presenta un solo estudio, lo que muestra una oportunidad para el análisis de estos agroecosistemas en otras partes del mundo con adecuados factores para su correcto desarrollo. En lo que se refiere a las especies de hormigas registradas en estos cultivos, las especies cultivadoras de hongos son comunes, así como las especies arborícolas y depredadoras especializadas, mismas que tienen acceso a diversas fuentes de alimento. Estos sistemas artificiales, dependiendo de su manejo, pueden funcionar como reservorios de la diversidad de la familia Formicidae, lo que incide directamente en un funcionamiento equilibrado de estos sistemas.

En cuanto a las asociaciones reportadas, se observa que las hormigas utilizan diferentes partes de las plantas como sitios de anidamiento. También se encontró dicha asociación con la recolección de miel de hemípteros y de sustancias azucaradas en nectarios extraflorales. Sin embargo, lo más común que se presenta son asociaciones del tipo generalista por el comportamiento oportunista de las hormigas.

Tabla 1*Asociaciones de especies de hormigas y heliconias e información ecológica y taxonómica*

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Habitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Aristizábal et al. (2013)	2013	Colombia	Caldas, Quindío y Risaralda	Producción	Policultivo	<i>Heliconia tagueriana</i> Petersen in Mart.	<i>Acromyrmex</i> sp.	Nidos subterráneos	Atinas con nidos grandes, forrajeras, oportunistas	Cortadoras
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Ata cephalotes</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Prospera en áreas perturbadas, se considera plaga en cultivos	Cortadoras
Peter L. Kazan (1967)	1967	Ecuador	Napo	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Ata cephalotes</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Prospera en áreas perturbadas, se considera plaga en cultivos	Cortadoras
Santos y Benítez-Malvido (2012)	2012	México	Chiapas	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia latipatha</i> Benth	<i>Ata cephalotes</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Prospera en áreas perturbadas, se considera plaga en cultivos	Cortadoras
Santos y Benítez-Malvido (2012)	2012	México	Chiapas	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	<i>Ata cephalotes</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Prospera en áreas perturbadas, se considera plaga en cultivos	Cortadoras
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Ata mexicana</i> (Smith, E, 1858)	Nidos subterráneos	Atinas con nidos grandes, considerada como plaga en cultivos y áreas urbanas	Cortadoras
De De Souza Born Born (2009)	2009	Brasil	Alagoas	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.	<i>Ata opaciceps</i> Bongmeier, 1939	Nidos subterráneos	Prospera en áreas perturbadas	Cortadoras

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Hábitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
De Souza Born (2009)	2009	Brasil	Alagoas	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia radi-niana</i> Barreiros	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia angusta</i> Vell. cv. Yellow Christmas	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia bihai</i> (L.) L.	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia bihai</i> (L.) L. x <i>H. marginata</i> (Griggs) Pittier	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia caribaea</i> Lam.	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia caribaea</i> Lam. cv. Gold	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia chataeae</i> Lane ex Barreiros cv. Sexy Pink	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Habitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Benitez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benitez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia caribaea</i> Lam. cv. <i>Purpurea</i>	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benitez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia episcopalis</i> Vell.	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benitez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia marginata</i> (Griggs) Pittie ex H. Paltacorum L.f.	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benitez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia orthotricha</i> L. Andresson cv. <i>She</i>	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benitez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia orthotricha</i> L. Andresson cv. <i>Edge of Nite</i>	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benitez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f. x <i>H. spathocinctata</i> Aristeg. cv. <i>Golden Torch</i> Adrian	<i>Ata sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Habitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de andadación	Comportamiento	Grenio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L. f. cv. Strawberries and Cream	<i>Atta sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f. cv. Red Opal	<i>Atta sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f. x <i>H. spathocerata</i> Aristeg. cv. Golden torch	<i>Atta sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Atta sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f. cv. Lady Di	<i>Atta sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f. x <i>H. spathocerata</i> Aristeg. cv. Red torch	<i>Atta sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f. cv. Sassy	<i>Atta sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Hábitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia rostrata</i> Ruiz y Pav.	<i>Atta sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber cv. Dwarf Jamaican	<i>Atta sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Atta sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Benítez-Malvido y Dáttilo (2015)	2015	Brasil	Pernambuco	Hospederos	Policultivo	<i>Heliconia wagneriana</i> Petersen in Mart.	<i>Atta sexdens</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Ariszabal et al. (2013)	2013	Colombia	Caldas, Quindío y Risaralda	Producción	Policultivo	<i>Heliconia rostrata</i> Ruiz y Pav.	<i>Atta ephialdes</i> (Linnaeus, 1758)	Nidos subterráneos	Coloniza fácilmente hábitats alterados por los humanos	Cortadoras
Ramirez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Azteca</i> sp.	Anidan en ramas huecas y tallos vivos	Protegen plantas de herbívoros a cambio de alojamiento	Árboreas pequeñas de reclutamiento masivo
Ballah y Starr (2010)	2010	Trinidad y Tobago	Trinidad	Comportamiento	Monocultivo	<i>Heliconia hirsuta</i> L. f.	<i>Azteca</i> sp.	Anidan en ramas huecas y tallos vivos	Protegen plantas de herbívoros a cambio de alojamiento	Árboreas pequeñas de reclutamiento masivo

Ciudad	Año	País	Estado	Tema general	Habitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Saporito et al. (2004)	2004	Panamá	Bocas del Toro	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Brachymyrmex cf. depilis</i>	Anidan en el suelo y hojarasca	Busca alimento en la hojarasca o en la superficie	Oportunistas del suelo y vegetación
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Brachymyrmex depilis</i> Emery, 1893	Anidan en el suelo y hojarasca	Busca alimento en la hojarasca o en la superficie	Oportunistas del suelo y vegetación
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia platystachya</i> Baker	<i>Brachymyrmex heeri</i> Forel, 1874.	Anidan debajo de las piedras y hojarasca	Se han encontrado en abundancia en orquídeas	Oportunistas del suelo y vegetación
Landero-Torres et al. (2014b)	2014	México	Veracruz	Manejo agrícola	Policultivo	<i>Heliconia bilhai</i> (L.) L.	<i>Brachymyrmex heeri</i> Forel, 1874.	Anidan debajo de las piedras y hojarasca	Se han encontrado en abundancia en orquídeas	Oportunistas del suelo y vegetación
Saporito et al. (2004)	2004	Panamá	Bocas del Toro	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Brachymyrmex longicornis</i> Forel, 1907	Anidan en el suelo y hojarasca	Busca alimento en la hojarasca o en la superficie	Oportunistas del suelo y vegetación
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Brachymyrmex musculus</i> Forel, 1899	Anidan debajo de las piedras y hojarasca	comúnmente encontrada en jardines	Oportunistas del suelo y vegetación
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Brachymyrmex</i> sp. 1	Anidan en el suelo, debajo de las piedras y hojarasca	Pueden asociarse a homópteros, anidan en sitios diversificados	Oportunistas del suelo y vegetación
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Brachymyrmex</i> sp. 2	Anidan en el suelo, debajo de las piedras y hojarasca	Pueden asociarse a homópteros, anidan en sitios diversificados	Oportunistas del suelo y vegetación
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Brachymyrmex</i> sp. 3	Anidan en el suelo, debajo de las piedras y hojarasca	Pueden asociarse a homópteros, anidan en sitios diversificados	Oportunistas del suelo y vegetación

Ciña	Año	País	Estado	Tema general	Hábitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
De Souza Born (2009)	2009	Brasil	Alagoas	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia bilhai</i> (L.) L.	<i>Camponotus (Myrmaglaenus)</i> sp. 1	Anidan en la vegetación baja y troncos podridos	Habita áreas abiertas y perturbadas	Camponotinas patulleras
De Souza Born (2009)	2009	Brasil	Alagoas	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Camponotus (Myrmaglaenus)</i> sp. 2	Anidan en la vegetación baja y troncos podridos	Habita áreas abiertas y perturbadas	Camponotinas patulleras
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L. f.	<i>Camponotus atriceps</i> (Smith, F., 1858)	Anidan generalmente en la hojarasca y tallos muertos	Muestran preferencia por suelos húmedos	Oportunistas del suelo y vegetación
De Souza Born (2009)	2009	Brasil	Alagoas	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia rostrata</i> Ruiz y Pav.	<i>Camponotus blandus</i> (Smith, 1858)	Anidan en la vegetación baja	Habita áreas abiertas y perturbadas	Oportunistas del suelo y vegetación
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Camponotus claviscapus</i> Forel, 1899	Anidan en troncos podridos	Muestran preferencia por suelos húmedos	Camponotinas patulleras
De Souza Born (2009)	2009	Brasil	Alagoas	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia wagneriana</i> Petersen in Mart.	<i>Camponotus crassus</i> Mayr, 1861	Anidan en arbustos y ramas secas	Frecuentemente encontrada en hábitats con vegetación leñosa	Oportunistas del suelo y vegetación
De Souza Born (2009)	2009	Brasil	Alagoas	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Camponotus leydigi</i> Forel, 1886	Anidan en arbustos y ramas secas	Muestran preferencia por suelos húmedos	Oportunistas del suelo y vegetación
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Camponotus lindigi</i> Mayr, 1870	Anidan en el suelo y vegetación baja	Muestran preferencia por suelos y ramas secas	Oportunistas del suelo y vegetación
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Novogranadensis</i> Mayr, 1870	Anidan en arbustos y ramas secas	Se encuentran fácilmente en tocones	Oportunistas del suelo y vegetación

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Habitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghesbr: ex Lem.	<i>Camponotus novogranadensis</i> Mayr, 1870	Anidan en arbustos y ramas secas	Se encuentran fácilmente en tocones	Oportunistas del suelo y vegetación
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghesbr: ex Lem.	<i>Camponotus planatus</i> Roger, 1863	Anidan en la hojarasca	Muestran preferencia por suelos húmedos	Camponotinas patrulleras
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghesbr: ex Lem.	<i>Camponotus raphaelis</i> Forel, 1899	Anidan en la hojarasca	Muestran preferencia por suelos húmedos	Camponotinas patrulleras
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghesbr: ex Lem.	<i>Camponotus sanctae-fidei</i> Dalla Torre, 1892	Anidan en la hojarasca	Muestran preferencia por suelos húmedos	Camponotinas patrulleras
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghesbr: ex Lem.	<i>Camponotus sericeiventris</i> (Guérin-Méneville, 1838)	Anidan en la hojarasca	Evitan interacciones agresivas	Oportunistas del suelo y vegetación
Peter L. Kazan (1967)	1967	Ecuador	Napo	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia sp.</i>	<i>Camponotus sp.</i>	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados y evitan interacciones agresivas	Camponotinas patrulleras
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Camponotus sp. 1</i>	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados y evitan interacciones agresivas	Camponotinas patrulleras

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Habitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Camponotus</i> sp. 2	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados y evitan interacciones agresivas	Camponotinas patrulleras
Landero-Torres et al. (2014b)	2014	México	Veracruz	Manejo agrícola	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Camponotus</i> sp. 2	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados y evitan interacciones agresivas	Camponotinas patrulleras
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Camponotus</i> sp. 3	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados y evitan interacciones agresivas	Camponotinas patrulleras
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Camponotus</i> sp. 4	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados y evitan interacciones agresivas	Camponotinas patrulleras
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Camponotus</i> sp. 5	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados y evitan interacciones agresivas	Camponotinas patrulleras

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Hábitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veraacruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Camponotus</i> sp. 6	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados y evitan interacciones agresivas	Camponotinas patrulleras
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veraacruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Camponotus</i> sp. 7	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados y evitan interacciones agresivas	Camponotinas patrulleras
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veraacruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Camponotus</i> sp. 8	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados y evitan interacciones agresivas	Camponotinas patrulleras
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghiesbr. ex Lem.	<i>Camponotus</i> sp. 1	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados y evitan interacciones agresivas	Camponotinas patrulleras
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghiesbr. ex Lem.	<i>Cephalotes minutus</i> (Fabricius, 1804)	Anida en cavidades vegetales	Colectoras de polen y néctar	Cefalotinas
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghiesbr. ex Lem.	<i>Cephalotes multispinosus</i> (Norton, 1868)	Anida en cavidades vegetales	Colectoras de polen y néctar	Cefalotinas
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veraacruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Cephalotes</i> sp. 1	Anida en cavidades vegetales	Colectoras de polen y néctar; algunas con omnívoras	Cefalotinas

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Hábitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Grenio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Landerro-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Cephalotes</i> sp. 2	Anida en cavidades vegetales	Colectoras de polen y néctar, algunas con omnívoras	Cefalotinas
Landerro-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Cephalotes</i> sp. 3	Anida en cavidades vegetales	Colectoras de polen y néctar, algunas con omnívoras	Cefalotinas
De Souza Born (2009)	2009	Brasil	Alagoas	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia bilhai</i> (L.) L.	<i>Crematogaster (Orthocremata)</i> sp. 1	Anidan en matorrales	Dominantes en la fuente de alimento	Árbores pequeñas de reclutamiento masivo
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Crematogaster carinata</i> Mayr, 1862	Anida en ramitas muertas	Puede compartir nido con otra especie	Árbores pequeñas de reclutamiento masivo
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia plathytachys</i> Baker	<i>Crematogaster curvispinosa</i> Mayr, 1862	Anidan en matorrales	Dominantes en la fuente de alimento	Árbores pequeñas de reclutamiento masivo
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Crematogaster limata</i> Smith, F., 1858	Anidan en la vegetación	Dominantes en la fuente de alimento	Árbores pequeñas de reclutamiento masivo
Landerro-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Crematogaster</i> sp. 1	Anidan en la vegetación	Dominantes en la fuente de alimento	Árbores pequeñas de reclutamiento masivo
Landerro-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Crematogaster</i> sp. 2	Anidan en la vegetación	Dominantes en la fuente de alimento	Árbores pequeñas de reclutamiento masivo
Landerro-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Crematogaster</i> sp. 3	Anidan en la vegetación	Dominantes en la fuente de alimento	Árbores pequeñas de reclutamiento masivo

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Hábitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Ballah y Starr (2010)	2010	Trinidad y Tobago	Trinidad	Comportamiento	Monocultivo	<i>Heliconia lirsuta</i> L. f.	<i>Crematogaster</i> sp. A	Anidan en la vegetación	Dominantes en la fuente de alimento	Árboreas pequeñas de reclutamiento masivo
Ballah y Starr (2010)	2010	Trinidad y Tobago	Trinidad	Comportamiento	Monocultivo	<i>Heliconia lirsuta</i> L. f.	<i>Crematogaster</i> sp. B	Anidan en la vegetación	Dominantes en la fuente de alimento	Árboreas pequeñas de reclutamiento masivo
Landero-Torres et al. (2014b)	2014	México	Veracruz	Manejo agrícola	Policultivo	<i>Heliconia rostrata</i> Ruiz y Pav.	<i>Crematogaster sumichrasti</i> Mayr, 1870	Anidan en la vegetación	Dominantes en la fuente de alimento	Árboreas pequeñas de reclutamiento masivo
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Camponotus trailii</i> Mayr, 1878	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados y evitan interacciones agresivas	Oportunistas del suelo y vegetación
Ballah y Starr (2010)	2010	Trinidad y Tobago	Trinidad	Comportamiento	Monocultivo	<i>Heliconia lirsuta</i> L. f.	<i>Dolichoderus bispinosus</i> (Olivier, 1792)	Anidan en árboles	Muy activas principalmente en bosques	Dolicoederinas arbóreas grandes, colectoras de exudados
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghiesbr. ex Lem.	<i>Dolichoderus bispinosus</i> (Olivier, 1792)	Anidan en árboles	Muy activas principalmente en bosques	Dolicoederinas arbóreas grandes, colectoras de exudados
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia platys-lathyis</i> Baker	<i>Dolichoderus bispinosus</i> (Olivier, 1792)	Anidan en árboles	Muy activas principalmente en bosques	Dolicoederinas arbóreas grandes, colectoras de exudados
Ballah y Starr (2010)	2010	Trinidad y Tobago	Trinidad	Comportamiento	Monocultivo	<i>Heliconia lirsuta</i> L. f.	<i>Dolichoderus decollatus</i> Smith, F., 1838	Anidan en árboles	Muy activas principalmente en bosques	Dolicoederinas arbóreas grandes, colectoras de exudados

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Habitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghiesbr. ex Lem.	<i>Dolichoderus lutosus</i> (Smith, F., 1858)	Anidan en árboles	Muy activas principalmente en bosques	Dolicoederinas arbóreas grandes, colectoras de exudados
Peter L. Kazan (1967)	1967	Ecuador	Napo	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Dolichoderus</i> sp.	Anidan en árboles	Muy activas principalmente en bosques	Dolicoederinas arbóreas grandes, colectoras de exudados
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Dorymyrmex bicolor</i> Wheeler; W.M., 1906	Anidan en el suelo	Especie dominante	Oportunistas del suelo y vegetación
Peter L. Kazan (1967)	1967	Ecuador	Napo	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Eciton burchellii</i> (Westwood, 1842)	Anidan en el suelo o en nidos de otras hormigas, colémbolos y abejas	Extremadamente agresivas	Nómadas
Peter L. Kazan (1967)	1967	Ecuador	Napo	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Eciton hamatum</i> (Fabricius, 1782)	Anidan en el suelo o en nidos de otras hormigas, colémbolos y abejas	Extremadamente agresivas	Nómadas
Peter L. Kazan (1967)	1967	Ecuador	Napo	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Eciton rapax</i> Smith, F., 1855	Anidan en el suelo o en nidos de otras hormigas, colémbolos y abejas	Extremadamente agresivas	Nómadas
Aristizabal et al. (2013)	2013	Colombia	Caldas, Quindío y Risaralda	Producción	Policultivo	<i>Heliconia bihai</i> (L.) L.	<i>Ectatomma</i> sp.	Nidos subterráneos y en troncos caídos	Su presencia se correlaciona con la presencia de otros invertebrados	Depredadoras grandes epigeas
De Souza Born (2009)	2009	Brasil	Alagoas	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia vogeliana</i> Petersen in Mart.	<i>Ectatomma muticum</i> Mayr; 1870	Nidos subterráneos y en troncos caídos	Su presencia se correlaciona con la presencia de otros invertebrados	Depredadoras grandes epigeas

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Habitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Ballah y Starr (2010)	2010	Trinidad y Tobago	Trinidad	Comportamiento	Monocultivo	<i>Heliconia lizata</i> L. f.	<i>Ecitonium tuberculatum</i> (Olivier, 1792)	Nidos subterráneos y en troncos caídos	Su presencia se correlaciona con la presencia de otros invertebrados	Depredadoras grandes epigeas
De Souza Born (2009)	2009	Brasil	Alagoas	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Ecitonium tuberculatum</i> (Olivier, 1792)	Nidos subterráneos y en troncos caídos	Su presencia se correlaciona con la presencia de otros invertebrados	Depredadoras grandes epigeas
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia lais-palsha</i> Benth	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia lais-palsha</i> Benth	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia lais-palsha</i> Benth	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia lais-palsha</i> Benth	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Hábitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia lailis-palua</i> Benth	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia lailis-palua</i> Benth	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia lailis-palua</i> Benth	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia lailis-palua</i> Benth	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Habitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Benítez-Malvido et al. (2014)	2014	México	Chiapas	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	Indeterminado	Anidan en sitios diversificados	Forman colonias perennes altamente sociales	
Jalinski et al. 2014	2014	Perú	Madre de Dios	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	Indeterminado	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados	Camponotinas patrulleras / oportunistas del suelo y vegetación
Jalinski et al. 2015	2015	Perú	Madre de Dios	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	Indeterminado	Anidan en arbustos, vegetación baja y ramas secas	Construyen nidos en sitios diversificados	Camponotinas patrulleras / oportunistas del suelo y vegetación
Peter L. Kazan (1967)	1967	Ecuador	Napo	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Gigantiops</i> sp.	Anidan en la vegetación	Buscan alimento solitariamente	Scudomyrmecinas ágiles
Landero-Torres et al. (2014b)	2014	México	Veracruz	Menejo agrícola	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i>	<i>Gnathopogonys strigata</i> (Norton, 1868)	Anidan en la hojarasca	Predadoras	Ponerinas crípticas depredadoras especializadas
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Labidus praedator</i> (Smith, F., 1858)	Se sitúan en troncos y nidos de otras especies	Hormigas legionarias	Nómadas
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Labidus</i> sp.	Se sitúan en troncos y nidos de otras especies	Hormigas legionarias	Nómadas
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Labidus</i> sp. 1	Se sitúan en troncos y nidos de otras especies	Hormigas legionarias	Nómadas

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Habitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Labidus</i> sp. 2	Se sitúan en troncos y nidos de otras especies	Hormigas legionarias	Nomadas
Landero-Torres et al. (2014b)	2014	México	Veracruz	Menejo agrícola	Policultivo	<i>Heliconia latipathia</i> Benth	<i>Leptothorax</i> sp.	Anidan en el suelo y la hojarasca	Dominantes en la fuente de alimento	Árbóreas pequeñas de reclutamiento masivo
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Leptothorax</i> sp.	Anidan en el suelo y la hojarasca	Dominantes en la fuente de alimento	Árbóreas pequeñas de reclutamiento masivo
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Linepithema dispertitum</i> (Forel, 1885)	Anidan en el suelo y en la madera	Territoriales y dominantes en la fuente de alimento	
Gutiérrez-Marínez (2013)	2013	Costa Rica	Alajuela	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia rostrata</i> Ruiz y Pav.	<i>Linepithema dispertitum</i> (Forel, 1885)	Anidan en el suelo y en la madera	Territoriales y dominantes en la fuente de alimento	Árbóreas pequeñas de reclutamiento masivo
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Monomorium ebrium</i> Forel, 1891	Anidan exclusivamente en la vegetación	Buenas indicadoras de áreas en recuperación	Especialistas minímas de vegetación
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Myrmelachista</i> sp. 1	Anidan exclusivamente en la vegetación	Buenas indicadoras de áreas en recuperación	Especialistas minímas de vegetación
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Myrmelachista</i> sp. 2	Anidan en sitios diversificados	Indicadoras negativas de otras especies de hormigas	Oportunistas del suelo y vegetación
Jalinski et al. 2014	2016	Perú	Madre de Dios	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	Indeterminado	Anidan en los entrenudos	Depredadoras y necrófagas	Depredadoras grandes epigeas
Peter L. Kazan (1967)	1967	Ecuador	Napo	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Neopomera</i> sp.	Anidan en los entrenudos	Depredadoras y necrófagas	Depredadoras grandes epigeas

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Hábitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Hábito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Landeron-Torres et al. (2014b)	2014	México	Veracruz	Menejo agrícola	Policultivo	<i>Heliconia bilhai</i> (L.) L.	<i>Nylanderia</i> sp. 1	Anidan en el suelo y la hojarasca	Evitan interacciones agresivas	Oportunistas del suelo y vegetación
Landeron-Torres et al. (2014b)	2014	México	Veracruz	Menejo agrícola	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Nylanderia</i> sp. 3	Anidan en el suelo y la hojarasca	Evitan interacciones agresivas	Oportunistas del suelo y vegetación
Landeron-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Nylanderia</i> sp. 1	Anidan en el suelo y la hojarasca	Evitan interacciones agresivas	Oportunistas del suelo y vegetación
Landeron-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Nylanderia</i> sp. 2	Anidan en el suelo y la hojarasca	Evitan interacciones agresivas	Oportunistas del suelo y vegetación
De Souza Born (2009)	2009	Brasil	Alagoas	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia rostrata</i> Ruiz y Pav.	<i>Odontomachus hauroi</i> (Emery, 1892)	Anidan bajo epifitas y en troncos podridos	Tolerante a sequías	Depredadoras grandes epigeas
De Souza Born (2009)	2009	Brasil	Alagoas	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia rutiliana</i> Barreiros, 1758	<i>Odontomachus haematodes</i> (Linnaeus, 1758)	Anidan en troncos caídos	Depredadoras y necrófagas	Depredadoras grandes epigeas
Landeron-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Odontomachus laticeps</i> Roger, 1861	Nidos subterráneos y en troncos caídos	Patrulleras solitarias	Depredadoras grandes epigeas
Peter L. Kazan (1967)	1967	Ecuador	Napo	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Odontomachus</i> sp.	Anidan bajo epifitas y en troncos podridos	Depredadoras y necrófagas	Depredadoras grandes epigeas
Peter L. Kazan (1967)	1967	Ecuador	Napo	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Pachythodyla</i> sp.	Anidan en el suelo, hojarasca y madera podrida sobre el suelo	Depredadoras no dominantes	Depredadoras grandes epigeas
Benitez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghesbr. ex Lem.	<i>Nesoponera unidentata</i> Mayr, 1862	Anidan en la hojarasca	Depredadoras y necrófagas	Depredadoras grandes epigeas

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Hábitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Landero-Torres et al. (2014) a	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Nepomera opicalis</i> (Latreille, 1802)	Anidan en madera muerta	Cazadoras solitarias	Depredadoras grandes epigeas
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia platystachys</i> Baker	<i>Pachycondyla carinulata</i> (Roger, 1861)	Anidan bajo epifitas y en troncos podridos	Oportunistas en anidación	Depredadoras grandes epigeas
Ballah y Starr (2010)	2010	Trinidad y Tobago	Trinidad	Comportamiento	Monocultivo	<i>Heliconia lirsuta</i> L. f.	<i>Pachycondyla crassirostrata</i> (Latreille, 1802)	Nidos subterráneos	Cazadoras solitarias	Depredadoras grandes epigeas
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Pachycondyla harpax</i> (Fabricius, 1804)	Anidan en troncos y debajo de piedras	Oportunistas en anidación	Depredadoras grandes epigeas
Landero-Torres et al. (2014) b	2014	México	Veracruz	Manejo agrícola	Policultivo	<i>Heliconia rostrata</i> Ruiz y Pav.	<i>Pachycondyla harpax</i> (Fabricius, 1804)	Anidan en troncos y debajo de piedras	Oportunistas en anidación	Depredadoras grandes epigeas
Ballah y Starr (2010)	2010	Trinidad y Tobago	Trinidad	Comportamiento	Monocultivo	<i>Heliconia lirsuta</i> L. f.	<i>Pachycondyla laevigata</i>	Anidan en la hojarasca y madera podrida	Depredadora especializada de termitas	Depredadoras grandes epigeas
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Pachycondyla</i> sp.	Anidan en el suelo, hojarasca y madera podrida sobre el suelo	Depredadoras no dominantes	Depredadoras grandes epigeas
Breed et al. (1991)	1991	Costa Rica	Heredia	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Paraponera clavata</i> (Fabricius, 1775)	Anidan en el suelo en la base de árboles	Hábitos nocturnos	Casos especiales
Young et al. (1981)	1981	Costa Rica	Heredia	Ecología	Monocultivo	<i>Heliconia pogonatha</i> Cufod.	<i>Paraponera clavata</i> (Fabricius, 1775)	Anidan en el suelo en la base de árboles	Hábitos nocturnos	Casos especiales
Saporito et al. (2004)	2004	Panamá	Bocas del Toro	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Nylandria stieblii</i> (Forel, 1893)	Anidan en el suelo y close	Carroneras generalistas	Oportunistas del suelo y vegetación

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Hábitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Landero-Torres et al. (2014b)	2014	México	Veracruz	Manejo agrícola	Policultivo	<i>Heliconia collinsiana</i> Griggs	<i>Panarchina longicornis</i> (Latreille, 1802)	Anidan en la vegetación baja	Hormigas plaga en casas	Oportunistas del suelo y vegetación
Landero-Torres et al. (2014) a	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Phaidole punctatissima</i> Mayr, 1870	Anidan en el suelo y la hojarasca	Especie dominante	Oportunistas del suelo y vegetación
Landero-Torres et al. (2014b)	2014	México	Veracruz	Manejo agrícola	Policultivo	<i>Heliconia latipalpa</i> Benth	<i>Phaidole punctatissima</i> Mayr, 1870	Anidan en el suelo y la hojarasca	Especie dominante	Oportunistas del suelo y vegetación
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Phaidole</i> sp. 1	Nidos subterráneos	Favorecidas por ambientes perturbados	Dominantes omnívoras del suelo
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Phaidole</i> sp. 2	Nidos subterráneos	Favorecidas por ambientes perturbados	Dominantes omnívoras del suelo
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Phaidole</i> sp. 3	Nidos subterráneos	Favorecidas por ambientes perturbados	Dominantes omnívoras del suelo
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Phaidole</i> sp. 4	Nidos subterráneos	Favorecidas por ambientes perturbados	Dominantes omnívoras del suelo
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Phaidole</i> sp. 4	Nidos subterráneos	Favorecidas por ambientes perturbados	Dominantes omnívoras del suelo
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghesbr. ex Lem.	<i>Phaidole</i> sp. 1	Nidos subterráneos	Favorecidas por ambientes perturbados	Dominantes omnívoras del suelo
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polyphachis</i> sp.	Anidan en los árboles	Subdominantes agresivas	Especialistas minímas de vegetación

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Habitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polythachis</i> sp.	Anidan en los árboles	Subdominantes agresivas	Especialistas minimas de vegetación
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polythachis</i> sp.	Anidan en los árboles	Subdominantes agresivas	Especialistas minimas de vegetación
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polythachis</i> sp.	Anidan en los árboles	Subdominantes agresivas	Especialistas minimas de vegetación
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polythachis arachne</i> Emery, 1896	Anidan en los árboles	Dominantes agresivas	Especialistas minimas de vegetación
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polythachis bellifera</i> Smith, F., 1859	Anida la vegetación baja	Subdominantes agresivas	Especialistas minimas de vegetación
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polythachis bicolor</i> Smith, F., 1858	Anidan en los árboles	Hormigas tejedoras	Especialistas minimas de vegetación
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polythachis dives</i> Smith, F., 1857	Anidan en los árboles y arboustos	Sus colonias pueden tener más de una reina	Especialistas minimas de vegetación
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polythachis furcata</i> Smith, F., 1858	Anidan en los árboles y arboustos	Subdominantes agresivas	Especialistas minimas de vegetación
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polythachis illaudata</i> Walker, 1859	Anidan en los árboles	Puede ser hospedante del hongo <i>Ophiocordyceps unilateralis</i>	Especialistas minimas de vegetación
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polythachis muelleri</i> Forel, 1893	Anidan en los árboles	Hormigas tejedoras	Especialistas minimas de vegetación

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Habitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polyrhachis nigropilosa</i> Mayr, 1872	Anidan en los árboles	Subdominantes agresivas	Especialistas minímas de vegetación
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polyrhachis proxima</i> Roger, 1863	Anida en arbustos y el suelo	Puede ser hospedeante del hongo <i>Ophiocordyceps unilateralis</i>	Dominantes omnívoras del suelo
Liefke et al. (1998)	1998	Malasia	Kuala Lumpur	Comportamiento	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Polyrhachis schelleriatae</i> Dorow, 1996	Anida en cavidades vegetales	Especializada en vivir dentro de tallos de bambú	Especialistas minímas de vegetación
Jalinski et al. 2017	2017	Perú	Madre de Dios	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	Indeterminado	Anidan en troncos y suelo	Patrulleras solitarias	Depredadoras grandes epíginas
Henao y Ospina (2008)	2008	Colombia	Caldas, Risaralda y Quindío	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia caribea</i> Lam.	<i>Pseudomyrmex</i> sp.	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Henao y Ospina (2008)	2008	Colombia	Caldas, Risaralda y Quindío	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L. f.	<i>Pseudomyrmex</i> sp.	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Henao y Ospina (2008)	2008	Colombia	Caldas, Risaralda y Quindío	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia wagneriana</i> Petersen	<i>Pseudomyrmex</i> sp.	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Henao y Ospina (2008)	2008	Colombia	Caldas, Risaralda y Quindío	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Pseudomyrmex</i> sp.	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Henao y Ospina (2008)	2008	Colombia	Caldas, Risaralda y Quindío	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia bilnei</i> (L.) L.	<i>Pseudomyrmex</i> sp.	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Henao y Ospina (2008)	2008	Colombia	Caldas, Risaralda y Quindío	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia orthotricha</i> L. Andersson	<i>Pseudomyrmex</i> sp.	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Hábitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Henaio y Ospina (2008)	2008	Colombia	Caldas, Risaralda y Quindío	Asociación	Policultivo	<i>Heliconia rostrata</i> Ruiz y Pav.	<i>Pseudomyrmex</i> sp.	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como deprecadores ras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Ariszabal et al. (2013)	2013	Colombia	Caldas, Quindío y Risaralda	Producción	Policultivo	<i>Heliconia orthotricha</i> L. Andersson	<i>Pseudomyrmex</i> sp.	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como deprecadores ras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Benitez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghiesbr ex Lem.	<i>Pseudomyrmex</i> sp.	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Patrulleras solitarias	Pseudomyrmecinas ágiles
Benitez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghiesbr ex Lem.	<i>Pseudomyrmex boopis</i> (Roger, 1863)	Anida en madera podrida cerca del suelo	Puede anidar en acacias	Pseudomyrmecinas ágiles
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Pseudomyrmex ferrugineus</i> (Smith, F., 1877)	Anida en la vegetación	Viven en simbiosis con la acacia <i>Acacia coriágera</i> (Corni-suelo)	Pseudomyrmecinas ágiles
Benitez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghiesbr ex Lem.	<i>Pseudomyrmex gracilis</i> (Fabricius, 1804)	Anida en ramitas muertas	Ocasionalmente se encuentra en plantas mirmecofitas	Pseudomyrmecinas ágiles
Landero-Torres et al. (2014b)	2014	México	Veracruz	Manejo agrícola	Policultivo	<i>Heliconia bilua</i> (L.) L.	<i>Pseudomyrmex gracilis</i> (Fabricius, 1804)	Anida en ramitas muertas	Ocasionalmente se encuentra en plantas mirmecofitas	Pseudomyrmecinas ágiles
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Pseudomyrmex simplex</i> (Smith, F., 1877)	Anida en ramitas muertas y arbustos	Pueden actuar como deprecadores ras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Benitez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghiesbr ex Lem.	<i>Pseudomyrmex simplex</i> (Smith, F., 1877)	Anida en ramitas muertas y arbustos	Pueden actuar como deprecadores ras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Hábitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghiesbr. ex Lem.	<i>Pseudomyrmex</i> sp. 1	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Pseudomyrmex</i> sp. 1	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghiesbr. ex Lem.	<i>Pseudomyrmex</i> sp. 2	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Pseudomyrmex</i> sp. 2	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Benítez-Malvido et al. (2016)	2016	México	Chiapas	Interacciones	Monocultivo	<i>Heliconia aurantiaca</i> Ghiesbr. ex Lem.	<i>Pseudomyrmex</i> sp. 3	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Pseudomyrmex</i> sp. 3	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Pseudomyrmex</i> sp. 4	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Pseudomyrmex</i> sp. 5	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Pseudomyrmex</i> sp. 6	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Ballah y Starr (2010)	2010	Trinidad y Tobago	Trinidad	Comportamiento	Monocultivo	<i>Heliconia tiruta</i> L. f.	<i>Pseudomyrmex</i> sp. A	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles

Cita	Año	País	Estado	Tema general	Habitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Ballah y Starr (2010)	2010	Trinidad y Tobago	Trinidad	Comportamiento	Monocultivo	<i>Heliconia hisuta</i> L. f.	<i>Pseudomyrmex</i> sp. B	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Ballah y Starr (2010)	2010	Trinidad y Tobago	Trinidad	Comportamiento	Monocultivo	<i>Heliconia hisuta</i> L. f.	<i>Pseudomyrmex</i> sp. C	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Ballah y Starr (2010)	2010	Trinidad y Tobago	Trinidad	Comportamiento	Monocultivo	<i>Heliconia hisuta</i> L. f.	<i>Pseudomyrmex</i> sp. D	Anidan en la vegetación y troncos caídos	Pueden actuar como depredadoras de suelo	Pseudomyrmecinas ágiles
Arisizabal et al. (2013)	2013	Colombia	Caldas, Quindío y Risaralda	Producción	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Solenopsis</i> sp.	Nidos subterráneos, en el suelo y hojarasca	Especies dominantes	Dominantes omnívoras del suelo
Ballah y Starr (2010)	2010	Trinidad y Tobago	Trinidad	Comportamiento	Monocultivo	<i>Heliconia hisuta</i> L. f.	<i>Solenopsis altinodis</i> Forcl, 1912	Anidan en el suelo y la hojarasca	Especie dominante	Dominantes omnívoras del suelo
Landeron-Torres et al. (2014) a	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L. f.	<i>Solenopsis geminata</i> (Fabricius, 1804)	Anidan en el suelo y la hojarasca	Favorecidas por ambientes perturbados	Dominantes omnívoras del suelo
Landeron-Torres et al. (2014b)	2014	México	Veracruz	Manejo agrícola	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Solenopsis geminata</i> (Fabricius, 1804)	Anidan en el suelo y la hojarasca	Favorecidas por ambientes perturbados	Dominantes omnívoras del suelo
Landeron-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Solenopsis</i> sp. 1	Nidos subterráneos, en el suelo y hojarasca	Dominantes, agresivas	Dominantes omnívoras del suelo
Landeron-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L. f.	<i>Solenopsis</i> sp. 2	Nidos subterráneos, en el suelo y hojarasca	Dominantes, agresivas	Dominantes omnívoras del suelo
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia platytachys</i> Baker	<i>Solenopsis</i> sp. 2	Nidos subterráneos, en el suelo y hojarasca	Dominantes, agresivas	Dominantes omnívoras del suelo

Cíza	Año	País	Estado	Tema general	Hábitat	Especie de heliconia	Especie de hormiga	Habito de anidación	Comportamiento	Gremio trófico / formas de reclutamiento y aspectos asociados al reclutamiento
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Solenopsis</i> sp. 3	Nidos subterráneos, en el suelo y hojarasca	Dominantes, agresivas	Dominantes omnívoras del suelo
Peter L. Kazan (1967)	1967	Ecuador	Napo	Ecología	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	Indeterminado			
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Strumigenys trinidadensis</i> Wheeler, W.M., 1922	Anida en el suelo y madera podrida	Depredadoras polífagas	Nómadas
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Tapinoma ramulorum</i> Emery, 1896	Anida en cavidades vegetales	Puede anidar cerca de otros nidos de hormigas	Arbóreas pequeñas de reclutamiento masivo
Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia stricta</i> Huber	<i>Tapinoma</i> sp. 2	Anidan bajo troncos y rocas	Algunas especies se relacionan con áfidos, se considera plaga doméstica	Arbóreas pequeñas de reclutamiento masivo
Landero-Torres et al. (2015)	2015	México	Veracruz	Asociación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Tapinoma</i> sp. 3	Anidan bajo troncos y rocas	Algunas especies se relacionan con áfidos, se considera plaga doméstica	Arbóreas pequeñas de reclutamiento masivo
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Paratrichomyrmex intermedius</i> (Forel, 1909)	Anidan en el suelo	Preferencia por áreas abiertas	Ainas crípticas, cultivadoras de hongos sobre material en descomposición
Ramírez et al. (2001)	2001	Colombia	Cauca	Interacciones	Policultivo	<i>Heliconia</i> sp.	<i>Wasmannia auripunctata</i> (Roger, 1863)	Anidan en el suelo y la hojarasca	Especie dominante	Arbóreas pequeñas de reclutamiento masivo
Landero-Torres et al. (2014a)	2014	México	Veracruz	Conservación	Monocultivo	<i>Heliconia psittacorum</i> L.f.	<i>Wasmannia auripunctata</i> (Roger, 1863)	Anidan en el suelo y la hojarasca	Especie dominante	Arbóreas pequeñas de reclutamiento masivo

Fuente: elaboración propia.

Referencias

- Andersen, A. N., Hoffmann, B. D., Müller, W. J. y Griffiths, A. D. (2002). Using ants as bioindicators in land management: simplifying assessment of ant community responses. *Journal of Applied Ecology*, 39(1), 8-17.
- Aristizábal, L. F., Ospina, K. A., Vallejo, U. A., Henao, E. R., Salgado, M. y Arthurs, S. P. (2013). Entomofauna associated with *Heliconia* spp. (Zingiberales: Heliconiaceae) grown in the central area of Colombia. *Florida Entomologist*, 96(1), 112-119.
- Assis, S. M. P., Mariano, R. R. L., Gondim Jr, M. G. C., Menezes, M. y Rosa, R. D. (2002). *Doenças e pragas das helicônias, diseases and pests of heliconias*. Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil.
- Ballah, S. T. y Starr, C. K. (2010). Composition and activity of ant visitors to inflorescences of *Heliconia hirsuta* (Heliconiaceae). *Sociobiology*, 56(3), 585.
- Benítez-Malvido, J., Martínez-Falcón, A. P., Dáttilo, W. y Del Val, E. (2014). Diversity and network structure of invertebrate communities associated to *Heliconia* species in natural and human disturbed tropical rain forests. *Global Ecology and Conservation*, 2, 107-117.
- Benítez-Malvido, J. y Dáttilo, W. (2015). Interaction intimacy of pathogens and herbivores with their host plants influences the topological structure of ecological networks in different ways. *American Journal of Botany*, 102(4), 512-519.
- Benítez-Malvido, J., Dáttilo, W., Martínez-Falcón, A. P., Durán-Barrón, C., Valenzuela, J., López, S. y Lombera, R. (2016). The multiple impacts of tropical forest fragmentation on arthropod biodiversity and on their patterns of interactions with host plants. *PLoS One*, 11(1), e0146461.
- Costa, A. S., Nogueira, L. C., Santos, V. F. D., Camara, T. R., Loges, V. y Willadino, L. (2011). Storage of cut *Heliconia bihai* (L.) cv. Lobster Claw flowers at low temperatures. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 15(9), 966-972.
- Cuezzo, F. (1998). Formicidae. In J.J. Morrone y S. Coscaron (eds.), *Biodiversidad de artrópodos argentinos* (pp. 452-462). Ediciones Sur, La Plata, Argentina.
- Dahlgren, R. M., Clifford, H. T. y Yeo, P. F. (1985). Evolution within the monocotyledons. In *The Families of the Monocotyledons* (pp. 91-106). Springer, Berlin, Heidelberg.
- De Souza Born, F., Broglio-Micheletti, S. M. F., de Moura Lima, I. M., de Araújo, M. J. C. y Delabie, J. H. C. (2009). Avaliação preliminar da mirmecofauna associada ao agronegócio floricultura com *Heliconia* spp. (Heliconiaceae) no estado de Alagoas, Brasil. *Revista Caatinga*, 22(2), 1-4.
- Della Lucia, T. M. C. (2011). *Formigas cortadeiras: Da bioecologia ao manejo*. Editora UFV, Viçosa, Brazil, 421 pp.
- Dehnen-Schmutz, K., Touza, J., Perrings, C. y Williamson, M. (2007). The horticultural trade and ornamental plant invasions in Britain. *Conservation Biology*, 21(1), 224-231.

- Diamé, L., Rey, J. Y., Vayssières, J. F., Grechi, I., Chailleux, A. y Diarra, K. (2018). Ants: Major functional elements in fruit agro-ecosystems and biological control agents. *Sustainability*, 10(1), 23.
- Dixon, G. R. y Aldous, D. E. (2014). An introductory perspective to horticulture: Plants for people and places. In *Horticulture: Plants for People and Places, Volume 1* (pp. 1-25). Springer, Dordrecht.
- Farji-Brener, A. G., Folgarait, P. y Protomastro, J. (1992). Asociación entre el arbusto *Capparis retusa* (Capparidaceae) y las hormigas *Camponotus blandus* y *Acromyrmex striatus* (Hymenoptera: Formicidae). *Revista de Biología Tropical*, 40(3), 341-344.
- Gutiérrez-Báez, C. (2000). *Flora de Veracruz. Fascículo 118. Familia Heliconiaceae*. Instituto de Ecología A. C. y University of California-Riverside. 32 p
- Gutiérrez-Martínez, P. R. (2013). Actividad de la hormiga *Linepithema dispertitum* (Hymenoptera: Formicidae) a lo largo del día y en diferentes estados de inflorescencia de *Heliconia rostrata* (Heliconiaceae). *UNED Research Journal/Cuadernos de Investigación UNED*, 5(1), 57-61.
- Haynes, C., VanDerZanden, A. M. y Iles, J. K. (2007). A survey of the ornamental horticulture industry in Iowa. *HortTechnology*, 17(4), 513-517.
- Henao, E. R. y Ospina, K. A. (2008). Insectos benéficos asociados a cultivos de heliconias en el eje cafetero colombiano. *Boletín Científico. Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 12(1), 157-166.
- Hölldobler, B. y Wilson, E. O. (1990). *The ants*. Harvard University Press.
- Jalinsky, J. R., Wertenberger, R. A., Radocy, T. A. y Chaboo, C. S. (2014). Insects inhabiting two host plants, *Heliconia stricta* Huber (Heliconiaceae) and *Calathea lutea* Schult (Marantaceae), in southeastern Peru. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 87(3), 299-311.
- Jerez, E. (2007). El cultivo de las heliconias. *Cultivos tropicales*, 28(1), 29-35.
- Junqueira, A. H. y Peetz, M. (2017). Brazilian consumption of flowers and ornamental plants: habits, practices, and trends. *Ornamental Horticulture*, 23(2), 178-184.
- Kress, W.J. (1985). Pollination and reproductive biology of Heliconia. *Monographs in systematic botany from the Missouri Botanical Garden (USA)*.
- Kress, W.J. (1990). The taxonomy of old world *Heliconia* (Heliconiaceae). *Allertonia*, 1-58.
- Landero-Torres, I., García-Martínez, M. Á., Galindo-Tovar, M. E., Leiva-Ovalle, O. R., Lee-Espinosa, H. E., Murguía-González, J. y Negrín-Ruiz, J. (2014a). An ornamental heliconias crop as a reservoir of the native myrmecofauna: a case of tropical horticulture in central Veracruz, Mexico. *Southwestern Entomologist*, 39(1), 135-146.
- Landero-Torres, I., Madrid-Ñeco, I., Valenzuela-González, J. E., Galindo-Tovar, M. E., Leyva-Ovalle, O. R., Murguía-González, J., Lee-Espinosa, H. E. y García-Martínez,

- M. Á. (2014b). Mirmecofauna de tres agroecosistemas ornamentales con diferente manejo y un remanente de selva en Ixtaczoquitlán, Veracruz, México. *Southwestern Entomologist*, 39(4), 783-796.
- Landero-Torres, I., Galindo-Tovar, M. E., Leyva-Ovalle, O. R., Murguía-González, J., Lee-Espinosa, H. E. y García-Martínez, M. Á. (2015). Hormigas asociadas a dos cultivos de heliconias ornamentales en Ixtaczoquitlán, Veracruz, México. *Entomología Mexicana*, 2, 106-111.
- Leyva-Ovalle, O. R., Rodríguez-Goya, A. Y., Herrera-Corredor, J. A., Galindo-Tovar, M. E. y Murguía-González, J. (2011). Polímero hidrofílico combinado con soluciones preservadoras en la vida de florero de tallos florales de rosa y heliconia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 13(3), 551-559.
- Liefke, C., Dorow, W. H. O., Hölldobler, B. y Maschwitz, U. (1998). Nesting and food resources of syntopic species of the ant genus *Polyrhachis* (Hymenoptera, Formicidae) in West-Malaysia. *Insectes Sociaux*, 45(4), 411-425.
- Martínez, M. F. (2003). Plantas Ornamentales de México: su potencial ornamental. *III Simposium de plantas Nativas con Potencial Ornamental. Departamento de Fitotecnia*, 32-47.
- Mestre, L., Bucher, R. y Entling, M. H. (2014). Trait-mediated effects between predators: ant chemical cues induce spider dispersal. *Journal of Zoology*, 293(2), 119-125.
- Ortíz G. C. F., Ramos H. E., Terán V. N. y Saldaña H. M. I. (2015). Enfermedades fúngicas en Heliconiaceae, Zingiberaceae y Musaceae de ornato en Tabasco. En *Ciencia y Tecnología Forestal y Agropecuaria en Tabasco*, 881 p (1158pp).
- Ramírez, M., de Ulloa, P. C., Armbrecht, I. y Calle, Z. (2001). Contribución al conocimiento de las interacciones entre plantas, hormigas y homópteros en bosques secos de Colombia. *Caldasia*, 23(2), 523-536.
- Ramírez-Rojas, J. L. R., Vega, C. A. S. y Vázquez, Y. R. (2011). Diagnóstico de las condiciones de operación y manejo administrativo de la producción de palmas ornamentales en las unidades productoras de los municipios de Actopan, Emiliano Zapata, Paso de Ovejas y Puente Nacional. *Revista Ciencia Administrativa*, 56-64.
- Rico-Gray, V. y Morais, H. C. (2006). Efecto de una fuente de alimento experimental sobre una asociación hormiga-hemíptero. *Acta Zoológica Mexicana*, 22(3), 23-28.
- Rojas, P. (2001). Las hormigas del suelo en México: diversidad, distribución e importancia (Hymenoptera: Formicidae). *Acta Zoológica Mexicana (ns)*, 189-238.
- Sánchez Colón, S., Flores Martínez, A., Cruz-Leyva, I. A. y Velázquez, A. (2008). *Estado y transformación de los ecosistemas terrestres por causas humanas. II Estudio de país*. CONABIO, México.
- Santos, B. A., Lombera, R. y Benitez-Malvido, J. (2009). Nuevos registros de *Heliconia* (Heliconiaceae) para la región de Chajul, sur de México, y su uso potencial en plantaciones amigables de la biodiversidad. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 80(3), 861-865.

- Santos, B. A. y Benítez-Malvido, J. (2012). Insect herbivory and leaf disease in natural and human disturbed habitats: lessons from early-successional *Heliconia* herbs. *Biotropica*, 44(1), 53-62.
- Saporito, R. A., Garraffo, H. M., Donnelly, M. A., Edwards, A. L., Longino, J. T. y Daly, J. W. (2004). Formicine ants: an arthropod source for the pumiliotoxin alkaloids of dendrobatid poison frogs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(21), 8045-8050.
- Seifert, R. P. (1982). Neotropical *Heliconia* insect communities. *The Quarterly Review of Biology*, 57(1), 1-28.
- Snow, D. W. y Teixeira, D. L. (1982). Hummingbirds and their flowers in the coastal mountains of southeastern Brazil. *Journal für Ornithologie*, 123(4), 446-450.
- Sosa-Rodríguez, F. M. (2013). Cultivo del género *Heliconia*. *Cultivos Tropicales*, 34, 24-32.
- Strong Jr, D. R. (1977). Insect species richness: hispine beetles of *Heliconia latispatha*. *Ecology*, 58(3), 573-582.
- Van Kleunen, M., Essl, F., Pergl, J., Brundu, G., Carboni, M., Dullinger, S., et al. (2018). The changing role of ornamental horticulture in alien plant invasions. *Biological Reviews*, 93(3), 1421-1437.
- Wielgoss, A., Tschardtke, T., Rumedé, A., Fiala, B., Seidel, H., Shahabuddin, S. y Clough, Y. (2014). Interaction complexity matters: disentangling services and disservices of ant communities driving yield in tropical agroecosystems. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 281(1775), 20132144.
- Wills, B. D. y Landis, D. A. (2018). The role of ants in north temperate grasslands: a review. *Oecologia*, 186(2), 323-338.

Capítulo II

Diversidad de ácaros (Acari) asociados al cultivo de la vid (*Vitis vinifera* L.) y su perspectiva para México¹

José Irving Monjarás Barrera²

Cristina Domínguez Castro²

Resumen

La vid es uno de los cultivos más importantes en el mundo, y se encuentra expuesta a problemas bióticos y abióticos. Conocer las interacciones de la vid con otros organismos es fundamental para realizar un manejo adecuado y diseñar estrategias que subsanen pérdidas económicas y mantener una vigilancia permanente de especies exóticas. Con esta revisión, se pretende dar a conocer el panorama actual de ácaros en el cultivo de la vid en México respecto a los demás países productores. Se encontraron más de 120 especies de ácaros con diversos hábitos alimenticios: depredadores, fitófagos y generalistas. De estos, solo una pequeña porción (<17%) del total están reportados para México. Solo se obtuvo información para la familia Tetranychidae respecto a las 20 familias pertenecientes a tres subórdenes (Mesostigmata, Trombidiformes y Sarcoptiformes) alrededor del mundo. Este trabajo resalta la importancia y al mismo tiempo, la falta de información y conocimiento que se tiene de este grupo; el cual juega un papel clave en los agroecosistemas como especies potenciales para el manejo y control de otras plagas.

¹ Citar este capítulo, como: Monjarás-Barrera, J. I. y Domínguez-Castro, C. (2024). Diversidad de ácaros (Acari) asociados al cultivo de la vid (*Vitis vinifera* L.) y su perspectiva para México. En: *Perspectivas multidisciplinarias para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas*. UAT, México, pp. 59-82.

² Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Enología y Gastronomía Fraccionamiento Playitas #3917, Ensenada, Baja California, México. C.P. 22860. jmonjaras@uabc.edu.mx

Introducción

La vid es una planta perteneciente a la familia Vitaceae. Dentro de los diversos géneros en los que se divide esta familia, el género *Vitis* es el más importante agronómica y económicamente. Este género está dividido en dos subgéneros (Galet, 1967): *Muscadinia* con $2n = 40$ cromosomas, zarcillos simples y ritidoma adherente; y *Euvitis* con $2n = 38$ cromosomas, zarcillos bifurcados y ritidoma exfoliable. La casi totalidad de las variedades cultivadas pertenecen al subgénero *Euvitis* (Hidalgo, 2002; Cid, 2015).

El género *Vitis* está compuesto por, aproximadamente, 60 especies interfértiles presentes mayoritariamente en el hemisferio norte. Entre estas especies, *Vitis vinifera* L. incluye casi la totalidad de cultivares destinados a la producción de uva, tanto para su consumo en fresco como para vinificación. Además, dos subespecies coexisten en Eurasia y en el norte de África: la cultivada, *Vitis vinifera* subsp. *vinifera* (o sativa) y la silvestre, *Vitis vinifera* subsp. *silvestris* (= *sylvestris*). Esta separación en subespecies está basada en diferencias morfológicas debidas a la domesticación de la vid por parte de los humanos más que al aislamiento geográfico, lo cual hace que esta distinción entre subespecies no sea del todo válida (This et al., 2006).

La vid en México

La vid es una de las especies frutícolas de mayor importancia económica en México, debido al uso diversificado que se les da a sus bayas. Los destinos principales de la uva en este país son la comercialización en fresco o pacificada, industrias en las que México es uno de los principales productores a nivel mundial (OIV, 2019) y, en menor escala, la producción de vinos. Esta última, a pesar de ser una industria minoritaria, en los últimos años ha experimentado un crecimiento muy significativo debido al renacimiento de la cultura del vino en este país (Faesler et al., 2003; Trejo-Pech et al., 2012).

El inicio de esta tradición vitivinícola en México se remonta al siglo XVI, con la llegada de los primeros colonos al continente americano. Aunque se considera que México fue la primera región norteamericana donde se inició el cultivo de *V. vinifera* (Covarrubias y Thach 2015), se ha demostrado que las civilizaciones prehispánicas ya empleaban vides silvestres. Estas especies del género *Vitis*, distribuidas ampliamente en diferentes regiones del país (Cruz-Castillo, 2007; Cruz-Castillo et al., 2006; 2009; Franco-Mora et al., 2008; 2009; Martínez et al., 2007; Rzedowski y Rzedowski, 2005; Sabás-Chávez et al., 2018), se utilizaban con fines medicinales, o bien para la elaboración de pasas, que eran consumidas durante el invierno (Salomón et al., 2012).

México cuenta con 36 861 hectáreas dedicadas al cultivo de la vid, siendo una actividad que genera una producción anual total que supera las 477 318 toneladas, de acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera hasta el 2022 (SIAP, 2023). Esta actividad se localiza en zonas que cuentan con las características edafológicas, hidrológicas y microclimáticas adecuadas para el cultivo. Así, la superficie de cultivo dedicada a la vid en el país se concentra, sobre todo, en los estados de Sonora (56.1 %), Zacatecas (21.7 %), Baja California (12.8 %) y Aguascalientes (2.9 %) (SIAP, 2022). El porcentaje restante, aproximadamente un 7 %, se distribuye entre otros estados de la república: Baja California Sur, Coahuila, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Jalisco, Nuevo León, Puebla, Querétaro y San Luis Potosí (SIAP, 2022).

Factores bióticos que determinan el rendimiento en la vid

Un aspecto fundamental en todos los sistemas de producción de la vid es la regulación de la relación rendimiento-calidad. Esta se encuentra en función al área fotosintéticamente activa y como respuesta en la masa del fruto, lo cual determina el rendimiento del cultivo; sin embargo, estas características se ven comprometidas por la interacción entre los factores bióticos y abióticos (Jackson, 2014). Los factores bióticos importantes incluyen las interacciones entre la planta y los microorganismos (hongos, virus y bacterias), el consumo de partes vegetales por herbívoros, y el consumo de herbívoros por depredadores y parasitoides; donde la mayoría de estas interacciones son sensibles a cambios ambientales -abióticos-, modificando su entorno, por lo que es importante no tomarlo como factores aislados (Reignault y Sancholle, 2005; Chapin et al., 2011).

Dentro de los factores bióticos que tienen implicaciones sobre el rendimiento y calidad de la vid se encuentran las enfermedades de plantas. Estas pueden agruparse según su sintomatología, órgano que afecta o por el grupo o especies de planta que afectan; no obstante, Agrios (2005) menciona que un mejor criterio para agruparlos es por el tipo de patógeno como hongos, bacterias, plantas parásitas, algas verdes, virus, viroides, fitoplasmas, nematodos y protozoarios. Otros componentes de estos factores son los artrópodos que se encuentran en la clase Insecta y Acari (Arachnida). Aunque algunas plagas pueden afectar una sola parte de la planta, todas sus partes pueden ser atacadas por una o más especies (Jackson, 2014).

A nivel mundial, se estima que las pérdidas por herbívoros, en su mayoría larvas de lepidóptera, van de un 10 % a 26 % (Culliney, 2014), donde la reducción del área foliar es el mayor problema en la pérdida del rendimiento (Moschos, 2006; Isaacs et al., 2012). En algunos casos, el daño de los artrópodos en la temporada de vid puede no tener un efecto significativo ese mismo ciclo, pero podría reducir la

resistencia de las yemas al invierno, lo que provocaría una pérdida en el rendimiento de la vid el año siguiente. Este tipo de efecto es observable con la defoliación por escarabajos en vides jóvenes que presentaron un nivel alto de defoliación (38-48 % de área foliar perdida), los cuales reducen el rendimiento de un 32 % hasta el 76 %, aunado a un menor número de racimos y peso de bayas (Hammons et al., 2010). La filoxera es un hemíptero que afecta las hojas de la vid lo que provoca deformaciones (agallas), necrosis, defoliaciones tempranas y reducción de la fotosíntesis, lo que impacta directamente en el peso del racimo, baya y sólidos solubles (Yi et al., 2019).

Los ácaros herbívoros se alimentan del mesófilo del tejido de las hojas de la vid (Duso et al., 2012), por lo tanto, disminuyen la capacidad fotosintética de la planta. Además, se ha observado que el ataque por arañas rojas (Tetranychidae) puede reducir el contenido de azúcar en las bayas (Hluchý y Pospíšil, 1992), mientras que, algunos eriófidos (Eriophyodae) que provocan deformaciones en las hojas pueden reducir considerablemente el rendimiento (Kido y Stafford, 1955; Duso et al., 2012).

Los organismos como factores bióticos no solo impactan negativamente en el rendimiento de la vid, ya que una gran cantidad de especies que incluyen microorganismos, artrópodos y mamíferos voladores son capaces de controlar y regular las poblaciones de plagas a niveles que no causen pérdidas en el rendimiento y calidad de la vid. Se ha demostrado que los murciélagos pueden alimentarse de más de 395 especies de insectos, incluyendo ocho especies de importancia económica en vid (Baroja et al., 2019). Mientras que, dentro del grupo de los artrópodos existen diferentes grupos de insectos (depredadores y parasitoides) y ácaros (depredadores y parásitos) que han sido muy usados en el control biológico de plagas de importancia económica, incluyendo la vid (Duso et al., 2012).

Importancia de los ácaros en los sistemas de producción

Las enfermedades como factores bióticos han sido un gran problema en la producción de vid a nivel mundial (Basso et al., 2017). En la mayoría de ellas, la transmisión se debe principalmente a insectos y ácaros vectores (Bahder et al., 2016) o nematodos (Martelli, 2014). Mientras que, en otros casos, para algunos virus estos son desconocidos (Martelli et al., 2002). Estos grupos han sido uno de los mayores objetos de estudio debido a las pérdidas que conllevan en la producción agrícola y sus características favorables que le permiten establecerse; ya que presentan ciclos cortos, gran capacidad para adaptarse al medio y su expresión rápida a la resistencia por agroquímicos (Zhang, 2003; Heck, 2018). Contraponiendo los efectos negativos de insectos y ácaros como herbívoros, un grupo ecológicamente importante en la regulación de organismo plaga son los depredadores y parasitoides

(Van Driesche et al., 2007); dentro de los cuales, los ácaros depredadores mantienen el equilibrio de las plagas en niveles por debajo del umbral económico (Badii et al., 2010; McMurtry et al., 2013).

La estructura y complejidad en la composición de la biodiversidad de ácaros tanto en ecosistemas como agroecosistemas juega un papel importante en la estabilidad ecológica de los organismos. Algunos autores se refieren a la estabilidad mediante grupos específicos de ácaros que suelen ser más diversos que abundantes. Esta peculiaridad sugiere ambientes sumamente ricos en alimentación y refugio, que permite la diversificación de las especies sin competencia (McMurtry, 1992; Monjarás-Barrera et al., 2019).

Los agroecosistemas son ecosistemas que presentan alguna modificación o acción antropogénica. Estas alteraciones no naturales influyen directamente en la composición de la biodiversidad de los organismos, incluyendo a los ácaros (Çobanoğlu y Kumral, 2016; Monjarás-Barrera et al., 2019). Primero, el uso y cambio del suelo conlleva al desplazamiento de especies vegetales nativas para establecer monocultivos. Al momento de remover una especie nativa de su ecosistema, las especies de ácaros que interactúan con ella, ya sea para proveer alimento o refugio, se desplazan con ella. Este fenómeno es muy peculiar en ácaros eriófidios, los cuales se asocian estrictamente con su planta hospedera (Lillo et al., 2018).

En los sistemas de producción existen dos grandes grupos ecológicos de ácaros: depredadores y fitófagos. Estos últimos son una de las principales limitantes en el rendimiento y calidad de los productos agrícolas que, sin un manejo adecuado, pueden llevar a la pérdida significativa en la producción (Rezende et al., 2016). Además, pueden constituir una alternativa al manejo convencional con acaricidas los cuales provocan problemas de salud, ambientales y de resistencia (Van Leeuwen et al., 2010); los ácaros depredadores son ampliamente usados en los planes de manejo en diversos cultivos (Zhang, 2003); incluyendo un gran número de especies dentro de diferentes familias de Acari (Carrillo et al., 2015).

Biodiversidad de ácaros asociados a cultivos en México

En México se conocen más de 2 680 especies de ácaros habitando diversos hábitats (Monjarás-Barrera et al., 2019); de estos, la diversidad de ácaros asociadas con cultivos de importancia económica ha sido poca explorada. Algunos estudios representativos en México incluyen al aguacate (Estrada-Venegas et al., 2002), zarzamora (Ayala-Ortega et al., 2020; Vargas-Madriz et al., 2020), jitomate (Lugo-Sánchez et al., 2019) y maíz (Chaires-Grijalva et al., 2021); además, algunos catálogos pueden ser usados para referir a familias específicas asociadas con diversos cultivos (Migeon et al., 2010; Demite et al., 2014; Castro et al., 2020).

Biodiversidad de ácaros asociados al cultivo de la vid

En todos los países productores de vid, los ácaros son un grupo que se monitorea constantemente; sobre todo especies de las familias Tetranychidae y Eriophyidae, ya que algunas se encuentran ampliamente distribuidas (CABI, 2019; 2021; Migeon y Dorkeld, 2022), además, los eriófidos son transmisores de virus (Malagnini et al., 2016).

Países como Brasil y España han realizado una mayor aportación para el conocimiento de la biodiversidad de especies de ácaros (Ferragut et al., 2008; Ferla et al., 2011; Johann et al., 2014; Silva et al., 2014; Sáenz-Romo et al., 2019). Esto ha permitido desarrollar trabajos para la prospección en el uso de ácaros depredadores, así como la descripción de nuevos taxones (Johann et al., 2013; Silva et al., 2014). Otros países, como Portugal, han investigado grupos específicos como los Phytoseiidae, permitiendo conocer las especies más abundantes y su eficiencia para suprimir especies plaga (Silva et al., 2019).

La diversidad de familias de ácaros reportadas al cultivo de la vid comprende dentro de las órdenes Mesosigmata, Trombidiformes y Sarcoptiformes (Tabla 2).

Tabla 2

Principales familias de ácaros reportadas en Vitis vinifera

Orden	Familia	País
Mesostigmata	Ascidae ^{1,2,4,5,6}	Australia, Brasil, Egipto, Sudáfrica, India
	Parasitidae ^{1,2}	Australia, Brasil
	Phytoseiidae*	Cosmopolita
Trombidiformes	Bdellidae ^{1,2}	Brasil
	Caligonellidae ¹	
	Anystidae ²	Australia
	Camerobiidae ⁴	Egipto
	Cheyletidae ^{1,2,5}	Brasil, India
	Cunaxidae ¹	Brasil
	Eriophyidae	Ver: CABI, 2019; 2021
	Iolinidae ^{1,4,8}	Brasil, Egipto, Alemania, USA
	Pygmephoridae ¹	Brasil
	Pyemotidae ⁶	
	Stigmaeidae ^{1,4,5}	Brasil, Egipto, India
	Tarsonemidae ¹	Brasil
	Tenuipalpidae ^{1,2,3}	

Orden	Familia	País
Sarcoptiformes	Tetranychidae*	Cosmopolita
	Tydeidae ^{1,2,4}	Brasil, Egipto, Alemania
	Histiostomidae ⁶	Brasil
	Winterschmidtiiidae ⁶	

¹Johann et al., 2013; ²James y Whitney, 1991; ³Vermaak et al., 2021; ⁴Sallam et al., 2010; ⁵Rather, 2006; ⁶Klock et al., 2011; ⁷Schruft, 1972; ⁸Knop y Hoy, 1983.

Orden Mesostigmata

Ácaros depredadores

Los ácaros depredadores cumplen un papel importante en la regulación de organismos en los ecosistemas. Estos pueden ser encontrados desde el suelo alimentándose de nematodos y pequeños artrópodos, hasta el follaje de las plantas alimentándose de una gran diversidad de artrópodos de manera natural (Abou-Awad y Elsayi, 1993; Castro y Moraes, 2010). La mayoría de los depredadores son muy activos en la búsqueda de su alimento desplazándose sobre las superficies de hojas, tallos y frutos, pero algunos otros como los queilétidos (Prostigmata: Cheyletidae) son depredadores de emboscada, los cuales prefieren esperar hasta que su presa esté lo suficientemente cerca para capturarla (Muma, 1975).

Dentro de este grupo se identifican más de 25 de familias depredadoras y con potencial para el control biológico, donde la mayoría de las especies han sido reportadas alimentándose de otros ácaros e insectos de importancia agrícola (Carrillo et al., 2015). Esta diversidad es tan grande, que permite que los nuevos récords y especies descritas puedan ser agentes potenciales para el manejo de plagas.

Familia Phytoseiidae

Los Phytoseiidae o fitoseídos, son depredadores que se encuentran en todos los agroecosistemas, incluyendo la vid (Silva et al., 2019). Estos se alimentan de diferentes especies de Tetranychidae y Eriophyidae; sin embargo, la gran diversidad de especies dentro de este grupo permite tener un amplio rango de estilos de vida e incluyen a especies generalistas que pueden alimentarse de otros recursos como polen, exudados de la planta, hongos y pequeños artrópodos (McMurtry et al., 2013). Esta familia es una de las primeras en aparecer en los cultivos y está mayormente representada. En la Tabla 3 se presentan algunas especies de la familia Phytoseiidae asociada a *V. vinifera*.

Tabla 3*Especies de la familia Phytoseiidae asociadas a V. vinifera*

Especie	Referencia	Especie	Referencia
<i>Amblyseius andersoni</i> (Chant)	3	<i>N. viticolus</i> Trincado & Martin	1
<i>A. neochiapensis</i> Lofego, Moraes & McMurtry	2	<i>Paraseiulus talbii</i> (Athias-Henriot)	
<i>A. operculatus</i> De Leon		<i>Phytoseius azorensis</i> Ferragut	
<i>A. vitis</i> Ferla & Silva		<i>P. ferax</i> Afzal, Akbar & Qayyum	
<i>A. gaucho</i> Ferla, Silva & Moraes		<i>P. glyptos</i> Afzal, Bashir, Akbar & Khan	
<i>Chiliseius camposi</i> Gonzalez & Schuster	1	<i>P. lapis</i> Afzal, Akbar & Qayyum	
<i>Cydnoseius vitis</i> Basha, Yousef, Ibrahim & Mostafa		<i>Proprioseiopsis ovatus</i> (Garman)	2
<i>Euseius insanus</i> (Khan & Chaudhri)		<i>Pr. sharkiensis</i> Basha & Yousef	1
<i>E. omentum</i> Qayyum, Afzal & Ahmad		<i>Transeius audeae</i> Kreiter, Allam & Tixier	
<i>Iphiseiodes metapodalis</i> (El-Banhawy)	2	<i>Typhlodromalus aripo</i> De Leon	2
<i>Kampimodromus aberrans</i> (Oudemans)	1	<i>T. marmoreus</i> (El-Banhaway)	
<i>Metaseiulus (Metaseiulus) mexicanus</i> (Muma)	2	<i>Typhlodromina tropica</i> (Chant)	

¹ Dimete et al., 2011; ² Ferla et al., 2011; ³ Silva et al., 2019.

Familia Ascidae

Los ácaros de la familia Ascidae habitan diferentes ecosistemas, formando un componente importante dentro de los depredadores que se encuentran en la vegetación y el suelo (Moraes et al., 2016). Como depredadores, se alimentan de nematodos y pequeños artrópodos, incluyendo ácaros plaga (Momen et al., 2011). Además, se ha observado que son capaces de alimentarse de polen, hongos o estar asociados a insectos (Lindquist, 1979; Moraes et al., 2016). En *V. vinifera* pocas especies de esta familia han sido reportadas; sin embargo, no dejan de ser especies potenciales para el control de especies plaga (Tabla 4).

Tabla 4

Especies de la familia Ascidae asociadas a V. vinifera

Especies	Referencia
<i>Asca</i> sp.	Klock <i>et al.</i> , 2011; Johann <i>et al.</i> , 2013
<i>Bakiscoks tersalis</i> (Berlese)	Sallam <i>et al.</i> , 2010
<i>Diseius</i> sp.	Klock <i>et al.</i> , 2011
<i>Lasioseius</i> sp.	Rather, 2006; Klock <i>et al.</i> , 2011; Johann <i>et al.</i> , 2013
<i>Lasioseius sewai</i> Nasr & Abou-Awad	Moraes <i>et al.</i> , 2016

Fuente: elaboración propia.

Familia Parasitidae

Estos ácaros han sido reportados como depredadores de pequeños artrópodos y nematodos que habitan suelo, nidos de insectos, aves y mamíferos, galerías de insectos y plantas (Lindquist *et al.*, 2009; Johann *et al.*, 2013). En *V. vinifera* se ha reportado a una especie no identificada del género *Holoparasitus* sp. para Brasil (Johann *et al.*, 2013).

Orden Trombidiformes

Stigmaeidae y Caligonellidae (Rapignathoidea)

La familia Stigmaeidae se encuentra distribuida en todo el mundo. Más del 35 % de sus especies son depredadores de vida libre que habitan sobre plantas (Carrillo *et al.*, 2016). Los géneros *Agistemus* Summers y *Zetzellia* Oudemans son los más diversos de la familia, al mismo tiempo, son los dos géneros mayormente representados en el cultivo de la vid (Tabla 5). Además, son uno de los grupos de depredadores más diversos e importantes después de los fitoseídos (Toldi *et al.*, 2021). En contraste con los Stigmaeidae, la familia Caligonellidae comprende un grupo muy pequeño de ácaros depredadores con poco más de 60 especies (Khaustov, 2021). En vid, solo se ha reportado una especie no identificada por Johann *et al.* (2013) en Brasil.

Tabla 5*Especies de la familia Stigmaeidae asociados a V. vinifera*

Familia	Especie	Referencia
Stigmaeidae	<i>Agistemus brasiliensis</i> Matioli, Ueckermann & Oliveira	Johann et al., 2013
	<i>A. exertus</i> Gonzales	Sallan et al., 2010
	<i>A. floridanus</i> Gonzales	Johan et al., 2013
	<i>A. herbarius</i> (Kuznestov and Wainstein)	Rather, 2006
	<i>A. mendozensis</i> Simons	Johann et al., 2013
	<i>A. riograndensis</i> Johann & Ferla	
	<i>Žetzellia agistzellia</i> Hernandez and Feres	
	<i>Ž. ampelae</i> Johann & Ferla	
	<i>Ž. malvinae</i> Matioli, Ueckermann & Oliveira	

Fuente: elaboración propia.

Bdellidae y Cunaxidae (Bdelloidea)

Las familias Bdellidae y Cunaxidae (Bdelloidea) son ácaros depredadores de vida libre muy activos que se alimentan de pequeños artrópodos incluyendo otras especies de ácaros, habitando diferentes sustratos como suelo y plantas (Skavarla et al., 2014; Hernandez et al., 2016). Sobre plantas, son organismos más abundantes y diversos comparado con otros grupos de depredadores (Castro et al., 2007); sin embargo, son parte fundamental en la regulación de organismos plaga. En la Tabla 6, se presentan las especies asociadas a *V. vinifera*.

Tabla 6*Especies de la superfamilia Bdelloidea asociados a V. vinifera*

Familia	Especie	Referencia
Bdellidae	Bdellidae	Sallam et al., 2010; Johann et al., 2013
	<i>Spinibdella</i> sp.	Sallam et al., 2010
	<i>Spinibdella tenella</i> (Banks)	Hernandes et al., 2016
Cunaxidae	<i>Cunaxa capreolus</i> (Berlese)	Sallam et al., 2010
	<i>Cunaxa</i> sp.	Johann et al., 2013
	<i>Neocunaxoides andrei</i> (Baker & Hofmann)	Sallam et al., 2010

Familia	Especie	Referencia
	<i>Neocunaxoides</i> sp.	Johan et al., 2013
	<i>Coleoscerius baptois</i> (Chaudri)	Sallam et al., 2010
	<i>Cunaxoides biscutum</i> (Nesbitt)	Skavarla et al., 2014

Fuente: elaboración propia.

Cheyletidae

Los Cheyletidae son ácaros depredadores de vida libre que habitan plantas, con movimientos lentos en los que generalmente atrapan a sus presas por emboscada (De Leon, 1962). En la vid, una especie *Cheletomimus (Hemicheyletia) wellsii* (Baker) ha sido reportada para Brasil (Bizarro et al., 2021).

Iolinidae

La familia Iolinidae comprende ácaros que de diferentes hábitats (Da-Costa et al., 2020); aunque poco se sabe sobre su importancia económica (Silva et al., 2017), juegan roles muy importantes en las cadenas tróficas en las plantas. Estas especies que habitan plantas son reguladores de ácaros eriófidis y sirven de alimento suplementario a los Phytoseiidae cuando su presa no está disponible (Flaherty y Hoy, 1971; Calvert y Huffaker, 1974). En vid, *Homeopronematus anconcai* (Baker), *H. staercki* Schruft, *Metapronematus* sp., *Pronematus ubiquitous* (McGregor) han sido reportados (Schurft, 1972; Knop y Hoy, 1983; Ferragut et al., 2008; Johann et al., 2013).

Ácaros herbívoros (Trombidiformes)

Uno de los principales problemas en la vid se debe a todas las especies de ácaros que se alimentan de alguna parte de la planta (Krantz, 2009). El problema no solo radica en la propia alimentación, sino que, durante este proceso, son capaces de transmitir virus que afectan el rendimiento y calidad de la uva (Malagnni et al., 2016). Además, algunas especies que no se encuentran distribuidas mundialmente en todas las zonas productoras de vid, son plagas potenciales pueden perjudicar gravemente la producción vitivinícola en México (Estrada-Venegas et al., 2013)

Tetranychidae

Esta familia de ácaros es una de las más económicamente importantes a nivel mundial, ya que comprende especies con distribución cosmopolita como *Tetranychus urticae* Koch, la cual se estima tiene más de 1 169 especies de plantas hospederas, incluyendo la vid (Migeon et al., 2010; Migeon y Dorkeld, 2022). Según la base de

datos *Spider Mites Web* un total de 46 especies son reportadas asociadas a la especie *V. vinifera*, de las cuales 19 están presentes en México (Tabla 7).

Tabla 7

Especies de la familia Tetranychidae asociadas a V. vinifera

Especie	
<i>Bryobia praetiosa</i> Koch*	<i>O. litchii</i> Lo & Ho
<i>Eotetranychus carpini</i> (Oudemans)*	<i>O. mangiferus</i> (Rahman & Sapra)
<i>E. geniculatus</i> Ehara	<i>O. milleri</i> (McGregor)*
<i>E. kankitus</i> Ehara	<i>O. perseae</i> Tuttle, Baker & Abbatiello*
<i>E. pruni</i> (Oudemans)	<i>O. peruvianus</i> (McGregor)
<i>E. queenslandicus</i> Manson	<i>O. punicae</i> (Hirst)
<i>E. rubiphilus</i> Reck	<i>O. sayedi</i> Zaher, Gomaa & El-Enany
<i>E. sexmaculatus</i> (Riley)	<i>O. vitis</i> Zaher & Shehata
<i>E. smithi</i> Pritchard & Baker	<i>O. yothersi</i> (McGregor)*
<i>E. truncatus</i> Estebanes & Baker*	<i>Panonychus citri</i> (McGregor)*
<i>E. vinealis</i> Flechtmann	<i>P. ulmi</i> (Koch)
<i>E. willamettei</i> (McGregor)	<i>Petrobia (Petrobia) latens</i> (Müller)*
<i>E. yumensis</i> (McGregor)*	<i>P. (Tetranychina) harti</i> (Ewing)*
<i>Eurytetranychus ulmi</i> Wang	<i>Schizonobia viticola</i> Meyer
<i>E. banksi</i> (McGregor)*	<i>Tetranychus kanzawai</i> Kishida*
<i>E. orientalis</i> (Klein)	<i>T. ludeni</i> Zacher*
<i>Mononychelus planky</i> (McGregor) ¹	<i>T. mcdanieli</i> McGregor
<i>Oligonychus acigni</i> (Livshits)	<i>T. neocaledonicus</i> André
<i>O. anonae</i> Paschoal	<i>T. pacificus</i> McGregor*
<i>O. bagdasariani</i> Baker & Pritchard ²	<i>T. piercei</i> McGregor
<i>O. bicolor</i> (Banks)	<i>T. schoenei</i> McGregor
<i>O. biharensis</i> (Hirst)*	<i>T. truncatus</i> Ehara
<i>O. coffeae</i> (Nietner)	<i>T. turkestanii</i> (Ugarov & Nikolskii)*
<i>O. fileno</i> Mendonca, Navia & Flechtmann	<i>T. urticae</i> Koch*

Nota: *Especies presentes en México; ¹Johann et al. (2013); ²González y Vilora (1991).

Fuente: elaboración propia.

Eriophyidae

La familia Eriophyidae se caracteriza por presentar especies obligadas a alimentarse de plantas y con una alta especialización con su planta hospedera (Lillo et al., 2018). Los principales problemas que causan en la vid son las deformaciones o erineos sobre las hojas de vid, además de la transmisión de virus (Malagnini et al., 2016). Dos especies se encuentran ampliamente distribuidas en todas las zonas productoras de vid; sin embargo, en México las especies *Colomerus vitis* (Pagenstecher) y *Calepitrimerus vitis* (Nalepa) no han sido reportadas (Estrada-Venegas et al., 2013; CABI, 2019; 2021).

Tenuipalpidae

Esta familia presenta una distribución mundial e incluye varias especies de importancia económica en diferentes cultivos. Especies del género *Brevipalpus* Donnadieu han sido identificadas como vectores de virus (Mesa et al., 2006); sin embargo, en vid su conocimiento e impacto no ha sido estudiado. En la base de datos *Tenuipalpidae Database* se reportan un total de 19 especies (Tabla 8), en las cuales dos son sinónimas de *B. yothersi* Baker y *Priscapalpus gurdaspurensis* Kaur & Sadana está descrita con base en un inmaduro por lo que no se considera una especie válida (Mesa et al., 2006; Castro et al., 2022).

Tabla 8

Especies de la familia Tenuipalpidae asociadas a V. vinifera

Especie
<i>Brevipalpus amicus</i> Chaudhri*
<i>B. californicus</i> (Banks)
<i>B. chilensis</i> Baker
<i>B. deleoni</i> * Pritchard & Baker
<i>B. lewisi</i> McGregor
<i>B. nocivus</i> Siddiqui, Chaudhri & Akbar, 1979
<i>B. obovatus</i> Donnadieu
<i>B. phoenicis</i> (Geijskes)
<i>B. rica</i> Chaudhri
<i>B. tinsukiaensis</i> Sadana & Gupta
<i>Cenopalpus bakeri</i> Düzgünes
<i>C. irani</i> Dosse

Especie
<i>C. pulcher</i> (Canestrini & Fanzago)
<i>C. viniferus</i> Hatzinikolis, Papadoulis & Kapaxidi
<i>Priscapalpus gurdaspurensis</i> Kaur & Sadana**
<i>Tenuipalpus granati</i> Sayed
<i>T. ludhianaensis</i> Sadana & Chhabra
<i>T. reticulus</i> Siddiqui & Chaudhri
<i>T. viticola</i> Al-Gboory

Nota: *Sinonimias con *B. yothersi*; **Especie basada en inmaduros.

Fuente: elaboración propia.

Ácaros con hábitos diversos

Tarsonemidae

La familia Tarsonemidae exhibe una alta diversificación de hábitos alimenticios, por lo que son capaces de encontrarse habitando distintos nichos ecológicos (Sousa et al., 2022). En esta familia se ha identificado una especie importante en la agricultura y producción vitivinícola. *Polyphagotarsonemus latus* (Banks), se encuentra asociado en hojas y yemas de vid. En hojas jóvenes provocan necrosis en los bordes de las hojas, proyectando estas hacia abajo; además de que limita el desarrollo de nuevas ramas (Monteiro, 1994; Johann et al., 2013). Aunado a esta especie, se conocen especies no identificadas de los géneros *Acaronemus* sp., *Tarsonemus* spp. y *Xenotarsonemus* sp. (Johann et al., 2013)

Tydeidae

La familia Tydeidae comprende pequeños ácaros de cuerpo blando y de vida libre, con diversos hábitos alimenticios, como alimentarse de polen, fitófagos y depredadores; sin embargo, la mayoría son carroñeros o fungívoros (Johann y Silva, 2021). Además, algunas especies como *Lorryia formosa* (Cooreman) tiene una amplia distribución en el mundo (Nuvoloni et al., 2020). En la Tabla 9 se enlistan las especies asociadas a *V. vinifera*.

Tabla 9*Especies de la familia Tydeidae asociadas a V. vinifera*

Especie	Referencia
<i>Lorryia formosa</i> (Cooreman)	Johann et al., 2013
<i>Tydeus lambi</i> Baker	Sallam et al., 2010
<i>Tydeus caudatus</i> (Dugés)	
<i>Tydeus californicus</i> (Banks)	Silva et al., 2014
<i>Neolorryia pandana</i> (Baker)	
<i>Pretydeus</i> sp.	Sallam et al., 2010

Fuente: elaboración propia.

Perspectiva para México

La necesidad de desplazarse de un lugar a otro permite que de manera directa o indirecta los humanos sean capaces de transportar y distribuir organismos plaga alrededor del mundo. Con el fin de prever el ingreso que estos organismos y las pérdidas que puedan ocasionar en cultivos de importancia económica como la vid, las autoridades fitosanitarias mantienen vigilancia en puntos específicos para supervisar el ingreso de material vegetal (Estrada-Venegas et al., 2013). Sin embargo, el riesgo puede presentarse de una parcela a otra, cuando el productor no tiene protocolos fitosanitarios establecidos para la propagación de material vegetal y estos son compartidos entre productores, lo que conlleva al movimiento de organismos que pueden perjudicar nuevas plantaciones (CSVBC *com. pers.*).

Uno de los principales retos para la viticultura en México es la entrada de plagas exóticas que pueden ocasionar pérdidas significativas en el cultivo. Estas plagas, al verse libres de factores de regulación natural como la presencia de enemigos naturales, aumentan los costos para el manejo y control (Barrera et al., 2008). Para conocer el estatus fitosanitario en el que se encuentra el cultivo, se debe entender la composición e interacción de los organismos (Monjarás-Barrera et al., 2019). Por ello, esta revisión genera conocimiento de las especies de ácaros que se asocian a la vid. Si bien los ácaros asociados a este cultivo para México es pobremente estudiado, es importante reconocer las especies que componen el sistema vid; así como los enemigos naturales que, en algún momento, forman parte fundamental en los programas de control biológico.

Las limitantes en México respecto a la escasa información en el tema, son la falta de especialistas en los diferentes grupos de ácaros y la importancia económica

que algunas plagas representan en el cultivo. De esta manera, el esfuerzo que se tiene para proveer información respecto a los organismos que se asocian al cultivo, se encuentran mayormente enfocadas en plagas emergentes como *Planococcus ficus* Signoret; sin embargo, el explorar la diversidad de ácaros podría exponer especies potenciales que ayuden a controlar de manera eficiente este problema.

Referencias

- Abou-Awad, B. A., y Elswawi, S. A. (1993). Biology and life table of the predacious mite, *Agistemus exsertus* Gonz. (Acari: Stigmaeidae). *Anzeiger für Schaedlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz*, 66(5), 101-103. <https://doi.org/10.1007/BF01906820>
- Agrios, G. N. (2005). Introduction. Pp. 3-76. En G. N. Agrios (Ed), *Plant Pathology*. Academic Press. Waretown, NJ. USA.
- Ayala-Ortega, J. de J., Martínez-Castillo, A. M., Pineda-Guillermo, S., Figueroa-De La Rosa, J. I., Acuña-Soto, J., Ramos-Lima, M., y Vargas-Sandoval, M. (2020). Mites associated with blackberry (*Rubus* sp. cv. *Tupy*) in two areas of Michoacan, México. *Revista Colombiana de Entomología*. 45(2), e8480. <https://doi.org/10.25100/socolen.v45i2.8480>
- Barrera, J. F., Toledo, J. y Infante, F. (2008). Manejo integrado de plagas: conceptos y estrategias. En Toledo, J. e Infante, F., *Manejo integrado de plagas*. Trillas. México. 327 p.
- Badii, M. H., Landeros, J., y Cerna, E. (2010). Regulación poblacional de ácaros plaga de impacto agrícola (population regulation of pest mites of agricultural significance). *International Journal of Good Conscience*, 5(1), 270-302.
- Bahder, B. W., Zalom, F. G., Jayanth, M., y Sudarshana, M. R. (2016). Phylogeny of geminivirus coat protein sequences and digital PCR aid in identifying *Spissistilus festinus* as a vector of grapevine red blotch-associated virus. *Phytopathology*, 106, 1223-1230. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-03-16-0125-FI>
- Baroja, U., Garin, I., Aihartza, J., Arrizabalaga-Escudero, A., Vallejo, N., Aldasoro, M., y Goiti, U. (2019). Pest consumption in vineyard system by the lesser horseshoe bat (*Rhinolophus hipposideros*). *PLoS One*, 14(7), e0219265 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219265>
- Basso, M. F., Fajardo, T. V. M., y Saldarelli, P. (2017). Grapevine virus diseases: Economic impact and current advances in viral prospection and management. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 39(1). <http://dx.doi.org/10.1590/0100-29452017411>
- Bizarro, G., da Silva, G. L., Silva, R. T. L., Ueckermann, E. A., Ferla, N. J. y Johann, L. (2021). Intraspecific variations and additional information about *Cheletomimus (Hemicheyletia) wellsi* (Baker, 1949) (Trombidiformes: Cheyletidae) from Brazil. *Entomological Communications*, 3, ec03024. <https://doi.org/10.37486/2675-1305.ec03024>

- CABI. (2019). *Invasive Species Compendium*. *Calepitrimerus vitis* (grape leaf rust mite). <https://www.cabi.org/isc/datasheet/21548> (Último acceso 20/04/2022).
- CABI. (2021). *Invasive Species Compendium*. *Colomerus vitis* (grape erineum mite (USA)). <https://www.cabi.org/isc/datasheet/21865> (Último acceso 20/04/2022).
- Calvert, D. J. y Huffaker, C. B. (1974). Predator (*Metaseiulus occidentalis*) - prey (*Pronematus* spp.) interactions under sulfur and cattail pollen applications in a non-commercial vineyard. *Entomophaga*, 19, 361-369. <https://doi.org/10.1007/BF02371062>
- Carrillo, D., De Moraes, G. J., y Peña, J. E. (2015). *Prospects for biological control of plant feeding mites and other harmful organisms*. Springer. Dordrecht. Países Bajos. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15042-0>
- Castro, E. B., Mesa, N. C., Feres, R. J. F., Moraes, G. J. de, Ochoa, R., Beard, J. J., y Demite, P. R. (2020). A newly available database of an important family of phytophagous mites: Tenuipalpidae database. *Zootaxa*, 4868(4), 577-583. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4868.4.7>
- Castro, T. M. y Moraes, G. J. D. (2007). Mite diversity on plants of different families found in the Brazilian Atlantic Forest. *Neotropical Entomology*, 36(5), 774-782. <https://doi.org/10.1590/S1519-566X2007000500020>
- Castro, T. M., y de Moraes, G. J. (2010). Life cycle and behaviour of the predaceous mite *Cunaxatricha tarsospinosa* (Acari: Prostigmata: Cunaxidae). *Experimental and Applied Acarology*, 50(2), 133-139. <https://doi.org/10.1007/s10493-009-9303-x>
- Chaires-Grijalva, M. P., Serrano-Domínguez, A. K., y Coronado-Blanco, J. M. (2021). Ácaros asociados al maíz en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(8), 497-1510. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i8.2718>
- Chapin, III, F. S., Matson, P. A., y Vitousek, P. (2011). *The Ecosystem Concept*. Pp. 3-22.
- Cid, N. (2015). *Caracterización ampelométrica y molecular de las variedades de vid (Vitis vinifera L.) del plan de selección clonal de Galicia*. Tesis doctoral. Universidad de Vigo, España.
- Çobanoğlu, S., y Kumral, N. A. (2016) The biodiversity, density, and population trend of mites (Acari) on *Capsicum annuum* L. in temperate and semi-arid zones of Turkey. *Systematic and Applied Acarology*, 21(7), 907-918. <https://doi.org/10.11158/saa.21.7.5>
- Covarrubias, J., y Thach, L. (2015). Wines of Baja Mexico: A qualitative study examining viticulture, enology, and marketing practices. *Wine Economics and Policy*, 4(2), 110-15. <https://doi.org/10.1016/j.wep.2015.11.001>
- Cruz-Castillo, J. G. (2007). Las uvas (*Vitis*) silvestres: Distribución y usos en la región central de Veracruz. Pp. 225-235. En R. A. Nieto (ed.), *Frutales nativos, un recurso fitogenético de México*. Chapingo, México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Cruz-Castillo, J. G., Franco, O. M., y Famiani, F. (2009). Presence and uses of wild grapevine (*Vitis* spp.) in the central region of Veracruz in Mexico. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 43(2), 77-81. <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2009.43.2.787>

- Cruz-Castillo, J. G., Ortíz, J. A., Roque, P. A., Franco, O. M., Madero, J. T., Cirigiliano J. P., y Murguía, J. (2006). Las uvas (*Vitis*) silvestres, distribución y usos en la región central de Veracruz. *Aquí Centros Regionales*, 48, 3-6.
- Culliney, T. (2014). Crop Losses to Arthropods. Pp. 201-225. En D. Pimentel y R. Peshin (eds.), *Integrated Pest Management*. Springer. Dordrecht, Países Bajos. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7796-5_8
- Da Silva, G. L., Da-Costa, T., Ferraz, C. S., Pallini, A. y Ferla, N. J. (2017). First description of iolinid mites (Acari: Tydeoidea) from Brazil. *Systematic and Applied Acarology*, 22(5), 694-701. <https://doi.org/10.11158/saa.22.5.8>
- Da-Costa, T., Rodighero, L. F., Da Silva, G. L., Monjarás-Barrera, J. I., Blochtein, B. y Ferla, N. J. (2020). Three new species of the genus *Proctotydaeus* (Acari: Iolinidae) associated with Brazilian stingless bees. *Systematic and Applied Acarology*, 25(6), 1032-1049. <https://doi.org/10.11158/saa.25.6.7>
- De Leon, D. (1962). Three New Genera and Seven New Species of Cheyletids (Acarina: Cheyletidae). *The Florida Entomologist*, 45(3), 129-137.
- Demite, P. R., McMurtry, J. A., y Moraes, G. J. de (2014). Phytoseiidae Database: A website for taxonomic and distributional information on phytoseiid mites (Acari). *Zootaxa*, 3795(5), 571-577. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3795.5.6>
- Demite, P. R., Moraes, G. J. de, McMurtry, J. A., Denmark, H. A., y Castilho, R. C. (2022). *Phytoseiidae Database*. www.lea.esalq.usp.br/phytoseiidae. (Último acceso 20/04/2022)
- Duso, C., Pozzebon, A., Kreiter, S., Tixier, M.-S., y Candolfi, M. (2012). Management of phytophagous mites in european vineyards. Pp. 191-217. En N. Bostanian, C. Vincent y R. Isaacs (eds.), *Arthropod Management in Vineyards*. Springer. Dordrecht. Países Bajos. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4032-7_9
- Estrada-Venegas, E. G., Acuña Soto, J. A., Chaires Grijalva, M. y Equihua Martínez, A. E. (2013). Ácaros de importancia cuarentenaria en Latinoamérica: sus efectos y su relevancia. *Sociedad Mexicana de Entomología*. COLPOS.
- Estrada-Venegas, E. G., Rodríguez-Navarro, S. y McMurtry, J. A. (2002). Some avocado mites from Michoacan, Mexico. *International Journal of Acarology*, 28(4), 387-393. <https://doi.org/10.1080/01647950208684315>
- Faesler, C., Cerón, R., y Calderwood, M. (2003). *El vino mexicano. Raíz, sarmiento y fruto*. Asociación Nacional de Vitivinicultores, Editorial Revimundo. México, México.
- Ferla, N. J., Johann, L., Klock, C., Majolo, F., y Botton, M. (2011). Phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) from vineyards in Rio Grande do Sul State, Brazil. *Zootaxa*, 2976(1), 15-31. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.2976.1.2>
- Ferragut, F., Gallardo, A., Ocete, R., y López, M. A. (2008). Natural predatory enemies of the erineum strain *Colomerus vitis* (Pagenstecher) (Acari, Eriophyidae) found on wild

- grapevine populations from southern Spain (Andalucía). *Vitis*, 47(1), 51-54. <https://doi.org/10.5073/vitis.2008.47.51-54>
- Flaherty, D. L. y Hoy, M. A. (1971). Biological control of Pacific mites and Willamette mites in San Joaquin Valley vineyards. III. Role of tydeid mites. *Research on Population Ecology*, 13, 80-96. <https://doi.org/10.1007/BF02522015>
- Franco, M. O., Cruz J. G. C., y Cortés A. A. S. (2009). *Diagnóstico de la vid silvestre en México. Reporte técnico*. Toluca, México.
- Franco, M.O. y Cruz, C.J.G. (2012). La vid silvestre en México Toluca. *Actualidades y potencial. Universidad Autónoma del Estado de México*. Altres-Costa Amic Editores.
- Franco-Mora, O., Cortés-Sánchez, A. A, Rodríguez-Landero, A. C., Cruz-Castillo, J. G., Pérez, J. M. y Madero-Tamargo, J. (2008). Location of wild grapevine (*Vitis* spp.) in the state of Puebla, México. *Ra Ximhai*, 4(1), 151-165.
- Galet, P. (1967). *Reserches sur le méthode d'identification et classification des Vitacées des zonas temperes*. Tesis doctoral. Universidad de Montpellier, Francia.
- González, M. Q., y Vilorio, Z. (1991). *Tetranychus urticae* KOCH y *Oligonychus bagdasariani* Baker y Pritchard, (ACARI: TETRANYCHIDAE) acaros fitofagos de importancia en vid (*Vitis vinifera* L.) en el estado Zulia.-descripción taxonómica y daños. *Revista de Agronomía (LUZ)*, 8(1), 1-14.
- Hammons, D. L., Kaan Kurtural, S., y Potter, D. A. (2010). Impact of insecticide-manipulated defoliation by Japanese beetle (*Popillia japonica*) on grapevines from vineyard stablishment through production. *Pest Management Science*, 66(5), 565-571. <https://doi.org/10.1002/ps.1908>
- Heck, M. (2018). Insect transmission of plant pathogens: A systems biology perspective. *mSystems*, 3(2), e00168-17. <https://doi.org/10.1128/mSystems.00168-17>
- Hernandes, F. A., Skvarla, M. J., Fisher, J. R., Dowling, A. P., Ochoa, R., Ueckermann, E. A. y Bauchan, G. R. (2016). Catalogue of snout mites (Acariformes: Bdellidae) of the world. *Zootaxa*, 4152(1), 1-83. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4152.1.1>
- Hidalgo, L. (2002). Orígenes del cultivo de la vid en España. Pp. 29-73. En L. Hidalgo (ed.), *Tratado de viticultura general*. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Hluchý, M., y Pospíšil, Z. (1992). Damage and economic injury levels of eriophyid and tetranychid mites on grapes in Czechoslovakia. *Experimental and Applied Acarology*, 14, 95-106. <https://doi.org/10.1007/BF01219102>
- Isaacs, R., Saunders, M. C., y Bostian, N. J. (2012). Pest thresholds: Their development and use in vineyards for arthropod management. Pp. 17-20. En N. J. Bostaind (ed.), *Arthropod Management in Vineyards: Pests, approaches, and future directions*. Springer. Dordrecht, Países Bajos: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4032-7_2
- Jackson, R. S. (2014). Vineyard Practice. Pp. 143-306. En R. S. Jackson (ed.), *Wine Science: Principles and applications*. Academic Press. Waretown, NJ. USA.

- James, D. G., y Whitney, J. (1991). Biological control of grapevine mites in inland south-eastern Australia. *Australian & New Zealand Wine Industry Journal*, 6(3), 210-214.
- Johann, L. y da Silva, G. L. (2021). How long do Tydeidae live? *Zoosymposia*, 20, 71-76 <https://doi.org/10.11646/zoosymposia.20.1.7>
- Johann, L., Carvalho, G. S., Majolo, F., y Ferla N. J. (2013). Stigmaeid mites (Acari: Stigmaeidae) from vineyards in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. *Zootaxa*, 3701(2), 238-256. <http://dx.doi.org/10.11646/zootaxa.3701.2.6>
- Johann, L., Horn, T. B., Carvalho, G. S., y Ferla, N. J. (2014). Diversity of mites (Acari) in vineyard agroecosystems (*Vitis vinifera*) in two viticultural regions of Rio Grande do Sul State, Brazil. *Acarologia*, 54(2), 137-154. <https://doi.org/10.1051/acarologia/20142122>
- Khaustov, A. (2021). Two new species of Caligonellidae (Acari: Raphignathoidea) from Crimea. *Acarologia*, 61(4), 910-927. <https://doi.org/10.24349/DZRV-GIdY>
- Kido, H., y Stafford, E. M. (1955) The biology of the grape bud mite *Eriophyes vitis* (Pgst). *Hilgardia*, 24, 119-141. <https://doi.org/10.3733/hilg.v24n06p119>
- Klock, C. L., Johann, L., Botton, M., y Ferla, N. (2011). Mitefauna (Arachnida: Acari) associated to grapevine, *Vitis vinifera* L. (Vitaceae), in the municipalities of Bento Gonçalves and Candiota, Rio Grande do Sul, Brazil. *Check List*, 7, 522. <https://doi.org/10.15560/7.4.522>
- Knop, N., y Hoy, M. (1983). Biology of a tydeid mite, *Homeopronematus anconai* (n. comb.) (Acari: Tydeidae), important in San Joaquin Valley vineyards. *Hilgardia*, 51(5), 1-30. <http://doi.org/10.3733/hilg.v51n05p030>
- Krantz, G. W. (2009). Habits and Habitats. Pp 64-82. En Krantz, G. W., y Walter, D. E. (eds.). *A Manual of Acarology*. Texas Tech University Press. Lubbock, TX. USA.
- Lillo, E., Pozzebon, A., Valenzano, D., y Duso, C. (2018). An intimate relationship between eriophyoid mites and their host plants - A review. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1786. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01786>
- Lindquist, E. E. (1979): Acari. Pp. 252-290. En H. V. Danks (ed.), *Canada and Its Insects Fauna*. Memoirs of the Entomological Society of Canada.
- Lindquist, E. E., Krantz, G. W., y Walter, D. E. (2009). Order Mesostigmata. Pp. 124-232. En G. W. Krantz y D. E. Walter (eds.), *A manual of Acarology*. Texas Tech University Press. Lubbock, TX. USA.
- Lugo-Sánchez, M. A., Flores-Canales, R. J., Isiordia-Aquino, N., Lugo-García, G. A., y Reyes-Olivas, A. (2019). Ácaros fitófagos asociados a jitomate en el norte de Sinaloa, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(7), 1541-1550. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i7.1756>
- Malagnini, V., Lillo, E., Saldarelli, P., Beber, R., Duso, C., Raiola, A., Zanotelli, L., Valenzano, D., Giampetruzzi, A., Morelli, M., Ratti, C., Causin, R., y Gualandri, V. (2016).

- Transmission of grapevine Pinot gris virus by *Colomerus vitis* (Acari: Eriophyidae) to grapevine. *Archives of Virology*, 161, 2595-2599. <https://doi.org/10.1007/s00705-016-2935-3>
- Martelli G. P., Sabanadzovic, S., Ghanem-Sabanadzovic, N. A., Saldarelli, P. (2002). *Maculavirus*, a new genus of plant viruses. *Archives of Virology*, 147(9), 1847-1853. <https://doi.org/10.1007/s007050200046>
- Martelli, G. P. (2014). Directory of virus and virus-like diseases of the grapevine and their agents. *Journal of Plant Pathology*, 96, 1-136. <https://dx.doi.org/10.4454/JPP.V96I1SUP>
- Martínez, M. A., Evangelista, V., Basurto, F., Mendoza, M., y Cruz-Rivas, A. (2007). Flora útil de los cafetales en la Sierra Norte de Puebla, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 78,15-40.
- McMurtry, J. A. (1992). Dynamics and potential impact of generalist phytoseiids in agroecosystems and possibilities for establishment of exotic species. *Experimental and Applied Acarology*, 14, 371-328. <https://doi.org/10.1007/BF01200574>
- McMurtry, J. A., De Moraes, G. J., y Sourassou, N. F. (2013). Revision of the lifestyles of phytoseiid mites (Acari: Phytoseiidae) and implications for biological control strategies. *Systematic and Applied Acarology*, 18(4), 297-320. <https://doi.org/10.11158/saa.18.4.1>
- Migeon, A., Nouguié, E., y Dorkeld, F. (2010). Spider mites web: A comprehensive database for the Tetranychidae. *Trends in Acarology*, 557-560. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9837-5_96
- Migeon, A., Nouguié, E., y Dorkeld, F. (2022). Spider Mites Web: A comprehensive database for the Tetranychidae. Disponible en: <https://www1.montpellier.inra.fr/CBGP/spmweb/> (Último acceso 20/042022).
- Momen, F., Abou-Elela, M., Metwally, A., Naser, A. y Saleh, K. H. (2011). Biology and feeding habits of the predacious mite, *Lasioseius lindquisti* (Acari: Ascidae) from Egypt. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, 46(1), 151-163. <https://doi.org/10.1556/aphyt.46.2011.1.12>
- Monjarás-Barrera, J. I., Chacón-Hernández, J. C., Da Silva, G. L., Johann, L., Da Silva, O. S., Landeros-Flores, J., Vanoye-Eligio, V., Reyes-Zepeda, F., y Ferla, N. J. (2019). Mites associated to chile piquín (*Capsicum annum* L. var. *glabriusculum*) in two Protect Natural Areas in Northeastern México. *Systematic and Applied Acarology*, 24(12), 2537-2551. <https://doi.org/10.11158/saa.24.12.17>
- Monteiro, L. B. (1994). Ocorrência de Polyphagotarsonemus latus (Banks) (Acari: Tarsonernidae) em videira em Bento Gonçalves, RS, Brasil. *Anais Da Sociedade Entomológica Do Brasil*, 23(2), 349-350. <https://doi.org/10.37486/0301-8059.v23i2.951>

- Moraes, G. J., Britto, E. P., Mineiro, J. L., y Halliday, B. (2016). Catalogue of the mite families Ascidae Voigts & Oudemans, Blattisociidae Garman and Melicharidae Hirschmann (Acari: Mesostigmata). *Zootaxa*, 4112(1), 1-299. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4112.1.1>
- Moschos, T. (2006). Yield loss quantification and economic injury level estimation for the carpophagous generations of the European grapevine moth *Lobesia botrana* Den. et Schiff. (Lepidoptera: Tortricidae). *International Journal of Pest Management*, 52(2), 141-147. <https://doi.org/10.1080/09670870600639179>
- Muma, M. H. (1975). Mites associated with Citrus in Florida. *University of Florida Agricultural Experimental Station Bulletin* 640, 1.
- Nuvoloni, F. M., Mondin, A. D. S., y Feres, R. J. (2020). Review of *Lorryia* Oudemans, 1925 (Acari: Tydeidae: Tydeinae) associated with *Hevea* spp. in Brazil. *International Journal of Acarology*, 46(4), 235-240. <https://doi.org/10.1080/01647954.2020.1760931>
- OIV. (2019). *Statistical report of world viticulture*. <http://www.oiv.int/es/area-de-prensa/>. (Último acceso 20/04/2022).
- Rather, A. Q. (2006). Management of phytophagous and predatory mites in vineyards of Jammu and Kashmir, India. In *International Symposium on Grape Production and Processing*, 785, 327-334. <http://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.785.41>
- Reignault, P., y Sancholle, M. (2005). Plant-pathogen interactions: Will the understanding of common mechanisms lead to the unification of concepts? *Comptes Rendus Biologies*, 328(9), 821-833. <https://doi.org/10.1016/j.crvi.2005.07.002>
- Rezende, D., Melo, J. W., Oliveira, J.E., y Gondim, M. G. Jr. (2016) Estimated crop loss due to coconut mite and financial analysis of controlling the pest using the acaricide abamectin. *Experimental and Applied Acarology*, 69(3), 297-310. <https://doi.org/10.1007/s10493-016-0039-0>
- Rzedowski, G. C., y Rzedowski, J. (2005). *Flora fanerogámica del Valle de México*. Instituto de Ecología, A.C. y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Páztcuaro, Michoacán, México.
- Sabás-Chavez, C. C., Franco-Mora, O., Castañeda-Vildózola, Á., Sánchez-Pale, J. R., y Cruz-Castillo, J. G. (2018). An approach to the model for conservation of Central Mexico native grapevines. *Natural Resources, Conservation and Research*, 1. <https://doi.org/10.24294/nrcr.v1i4.212>
- Sáenz-Romo, M. G., Martínez-García, H., Veas-Bernal, A., Carvajal Montoya, L. D., Martínez-Villar, E., Ibáñez Pascual, S., Marco-Mancebón, V. S., y Pérez-Moreno, I. (2019). Effect of ground-cover management on predatory mites (Acari: Phytoseiidae) in a Mediterranean vineyard. *Vitis*, 58 (Special Issue), 25-32 <https://doi.org/10.5073/vitis.2019.58.special-issue.25-32>

- Sallam, G. N., Abdel-Azeim, N. A., y Yassin, E. (2010). Abundance of predaceous mites and spiders associated with grapevine pests in Fayoum region, Egypt. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 88(4), 1167-1175. <https://doi.org/10.21608/EJAR.2010.191350>
- Salomón, C. J., Cruz C, J. G., Franco M. O., y Rubí A. M. (2012). Potencial agroindustrial y culinario. Pp. 80-93. En M. O. Franco y C. J. G. Cruz (eds.), *La vid silvestre en México. Actualidades y potencial*. Universidad Autónoma del Estado de México, Altres Costa-Amic Editores. México, México.
- Schruff, G. (1972). Das vorkommen von milben aus der familie Tydeidae (Acari) an Reben. VI. Beitrag über untersuchungen zur faunistik und biologie der Milben (Acari) an Kulturreben (*Vitis spec.*). *Zeitschrift für angewandte Entomologie*, 71(2), 124-133.
- SIAP. (2020). *Avance de siembras y cosechas*. https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/. (Último acceso 20/04/2022).
- Silva, G. D., Cunha, U. D., Rocha, M. D. S., Panou, E. N., y Ferla, N. J. (2014). Tydeid and triophyteid mites (Acari: Tydeoidea) associated with grapevine (Vitaceae: *Vitis* spp.) in Brazil, with the descriptions of species of *Prelorryia* (André, 1980) and *Tydeus* Koch, 1835. *Zootaxa*, 3814(4), 495-511. <http://dx.doi.org/10.11646/zootaxa.3814.4.3>
- Silva, D. E., do Nascimento, J. M., da Silva, V. L., de Azevedo Meira, A., Corrêa, L. L. C., Johann, L., Rodrigues, R., y Ferla, N. J. (2019). Effect of grapevine varieties on phytoseiid (ACARI) populations in the northwestern area of Portugal. *Crop Protection*, 126, 104928. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104928>
- Silva, G. D., Cunha, U. D., Rocha, M. D. S., Panou, E. N., y Ferla, N. J. (2014). Tydeid and triophyteid mites (Acari: Tydeoidea) associated with grapevine (Vitaceae: *Vitis* spp.) in Brazil, with the descriptions of species of *Prelorryia* (André, 1980) and *Tydeus* Koch, 1835. *Zootaxa*, 3814(4), 495-511. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3814.4.3>
- Skvarla, M. J., Fisher, J. R. y Dowling, A. P. (2014). A review of Cunaxidae (Acariformes, Trombidiformes): Histories and diagnoses of subfamilies and genera, keys to world species, and some new locality records. *ZooKeys* (418), 1-103. <https://doi.org/10.3897/zookeys.418.7629>
- Sousa, A. S. G., Rezende, J. M., Lofego, A. C., Ochoa, R., Bauchan, G., Gulbranson, C., y Oliveira, A. R. (2022). New species and records of *Metatarsonemus* (Acari: Tarsonemidae) from Central and South Americas. *Systematic and Applied Acarology*, 27(2), 381-398. <https://doi.org/10.11158/saa.27.2.11>
- This, P., Lacombe, T., y Thomas, M. R. (2006). Historical origins and genetic diversity of wine grapes. *Trends in Genetics*, 22, 511-519. <https://doi.org/10.1016/j.tig.2006.07.008>
- Toldi, M., de Freitas, E. M., da Silva, V. L., Caumo, M., Ferla, J. J., Orlandi, C. R., Da-Costa, T., Johan, L. y Ferla, N. J. (2021). Communities of predatory mites (Phytoseiidae and Stigmaeidae) in different environments of the Brazilian Pampa. *Acarologia*, 61(1), 20-30. <https://doi.org/10.24349/acarologia/20214413>

- Trejo-Pech, C. O., Arellano-Sada, R., Coelho, A. M., y Weldon, R. M. (2012). Is the Baja California, Mexico, Wine Industry a Cluster? *American Journal of Agricultural Economics*, 94(2), 569-75. <https://doi.org/10.1093/ajae/aar080>
- Van Driesche, R., Hoddle, M., Center, T. D., Ruíz, C. E., Coronada, B. J., y Manuel, A. J. (2007). *Control de plagas y malezas por enemigos naturales* (No. 632.96 V33). US Department of Agriculture, US Forest Service, Forest Health Technology Enterprise Team.
- Van Leeuwen, T., Vontas, J., Tsagkarakou, A., Dermauw, W., y Tirry, L. (2010). Acaricide resistance mechanisms in the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae* and other important Acari: A review. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 40(8), 563-572. <https://doi.org/10.1016/j.ibmb.2010.05.008>
- Vargas-Madriz, H., Acuña-Soto, J. A., Rodríguez-Bautista, G., Grifaldo-Alcántara, P. F., García-Escamilla, P., y Lázaro-Dzul, M. O. (2020). Fluctuación poblacional de familias de ácaros asociados a plantas de zarzamora (*Rubus fruticosus* L.). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 7(2), e2435. <https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2435>
- Vermaak, M., Ueckermann, E. A., Veldtman, R., y Addison, P. (2021). An overview of mites on grapevines and the discovery of a new Phytoseiidae species: *Typhlodromus* (*Typhlodromus*) *spiceae*. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 42(1), 91-99. <https://doi.org/10.21548/42-1-4297>
- Yin, L., Clark, M. D., Burkness, E. C., y Hutchison, W. D. (2019). *Grape phylloxera* (Hemiptera: Phylloxeridae), on cold-hardy hybrid wine grapes (*Vitis* spp.): A review of pest biology, damage, and management practices. *Journal of Integrated Pest Management*, 10(1), 16: 1-9. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmz011>
- Zhang, Z. Q. (2003). *Mites of greenhouses: Identification, biology, and control*. CABI.

Capítulo III

La agricultura en México y sus estrategias en el control biológico de plagas agrícolas¹

Griselda Gaona García²
Madai Rosas Mejía²

Resumen

Para México, los cultivos agrícolas son parte fundamental de la economía, además de ser muy importantes en diferentes regiones agrícolas prioritarias de la nación. Representan y generan una gran cantidad de empleos al sector rural y zonas marginadas, así como a los grandes y medianos empresarios agrícolas. Muchas de las prácticas del agro, si se seleccionaran y aplicaran correctamente, podrían preservar los entornos naturales de los cultivos, siendo prósperos y estimulando el progreso y calidad de vida de muchos sectores rurales del país y de algunas zonas de amortiguamiento de áreas naturales protegidas adyacentes a estos sistemas de producción. La diversidad de climas, suelos y ecosistemas son ideales para que se desarrollen una gran variedad de cultivos agrícolas permitiendo a las regiones una producción competitiva. Los estados donde se encuentra la mayor actividad agrícola del país son Michoacán, Sinaloa, Jalisco, Chiapas, Sonora, Veracruz, Estado de México y Guanajuato. En el resto de las entidades federativas se hacen esfuerzos para mejorar la tecnología de producción para obtener cultivos y hortalizas que cumplan con los estándares de calidad para su exportación, siendo su principal problemática la presencia de plagas, que son un factor importante en la reducción de la producción, lo cual también demerita la calidad y atributos de estos, en otros casos, provocan la pérdida total de las siembras. Este documento promueve el desarrollo sostenible presentando diversas estrategias bio-ecológicas para la reducción, manejo y control de los insectos plaga en los cultivos o como una

¹ Citar este capítulo como: Gaona-García, G. y Rosas-Mejía, M. (2024). La agricultura en México y sus estrategias en el control biológico de plagas agrícolas. En *Perspectivas multidisciplinares para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas*. UAT. México, pp. 86-106.

² Instituto de Ecología Aplicada, Universidad Autónoma de Tamaulipas. División del Golfo 356, Col. Libertad, 87019, Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. ggaona@docentes.uat.edu.mx

alternativa en la reducción de estos. Esta información permite tener un conocimiento actualizado de los principales problemas fitosanitarios e incidencias de plagas en los cultivos de importancia agrícolas. Se presentan métodos y estrategias de control para que el productor pueda realizar un manejo apropiado a su cultivo.

Introducción

Para México, los cultivos agrícolas son parte fundamental de la economía, puesto que responden a las necesidades alimenticias de millones de personas, preservan los entornos naturales y estimulan el progreso al mejorar la calidad de vida de muchas familias. De acuerdo con la entonces Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA- FAO, 2014), los sectores agrícola y pecuario son los más dinámicos del país, representando cerca del 10 % del Producto Interno Bruto (PIB). La gran biodiversidad de México es la causa de este nivel de productividad, pues aproximadamente el 13 % del territorio nacional -alrededor de 145 millones de hectáreas- es utilizado como campo agrícola, cosechando cerca de 200 productos en diferentes estaciones y temporada (Soto, 2021).

La diversidad de climas, suelos y ecosistemas del país es ideal para que en él se desarrollen muchos cultivos agrícolas, permitiendo que por regiones se adapten, como el maíz, la caña de azúcar, el aguacate, el chile verde, el tomate, el sorgo y el frijol, entre otros. Lo anterior, permite que la producción sea diversa y que los estados tengan la capacidad de proveer y distribuir sus productos a diferentes mercados.

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2019) registra información relevante sobre la actividad agrícola de México, así como las características de la forma de producción y tipo de cultivo, los datos de superficie sembrada, producción y modalidad de cultivo, tecnologías utilizadas, nos da un panorama de las estadísticas de producción de cada uno de los cultivos.

En México existen registros de domesticación de especies de diferentes hortalizas con importancia nacional e internacional, sobresaliendo por su demanda el chile, jitomate, papa, tomate de cáscara, calabaza y chayote (López y Montes, 2006; SIAP; 2015). Según el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP, 2019), se producen cultivos anuales como maíz de grano blanco, frijol, maíz amarillo, sorgo, trigo, soya, chile, calabaza, cebolla, jitomate, arroz y amaranto. En lo que se refiere a cultivos perennes, son: caña de azúcar, naranja, alfalfa, aguacate, limón, mango, plátano, cacao, manzana, uva y fresa.

El Panorama Agroalimentario 2019 publicado por el SIAP, con datos de 2018, ubica a México en el primer lugar dentro de la exportación en la comercialización de diversos productos como ensaladas preparadas, las verduras

en conserva, los vegetales congelados, incluidas las verduras frescas, de las cuales el tomate rojo ocupa el primer lugar con un 22 %, pimientos con un 12 %, cebollas 9 %, pepinos 6 %, ajo 7 %, coles 6 %, espárragos 4 %, lechuga, coliflor y brócoli con 3 %, y 28% otros alimentos; además, nuestro país resalta en el octavo lugar con la exportación de otros productos agrícolas, ganaderos, pesqueros y agroindustriales (CEDRSSA, 2020).

México lidera en la exportación de aguacate -el *oro verde*- a Estados Unidos de América con 2 242 495 toneladas en el 2021 y sobresale en otros productos agrícolas como chile verde, frambuesa, limón, cártamo, espárragos, guayabas, mango, fresa, brócoli, coliflor, arándano, calabacita, frijol, lechuga, maíz, caña de azúcar, coco y tomate (SIAP, 2022). El Grupo Consultor de Mercados Agrícolas (GCMA, 2020) y el SIAP (2020, 2022) mencionan que México se sigue proyectando como líder en la producción mundial de aguacate, tomate y mango, respectivamente.

Los estados donde se encuentra la mayor actividad agrícola del país son Michoacán, Sinaloa, Jalisco, Chiapas, Sonora, Veracruz, Estado de México y Guanajuato (INEGI, 2019). En todos los sentidos, México ha hecho grandes esfuerzos para mejorar e incorporar la tecnología en los sistemas de producción a fin de obtener cultivos y hortalizas que cumplan con los estándares de calidad para su exportación (Carrillo, 2009). El presente capítulo promueve el desarrollo sostenible, presentando algunas estrategias bio-ecológicas para el control y manejo de los insectos plagas en los cultivos o como una alternativa en la reducción de estos, de tal manera que esta información permitirá tener un conocimiento actualizado de los principales problemas fitosanitarios e incidencias de plagas en los cultivos de importancia agrícola.

Panorama actual

La actividad agrícola ha alcanzado una producción muy diversificada para el uso de la alimentación nacional y, como se ha documentado, también una producción para la exportación internacional (CEDRSSA, 2020). Por otro lado, el SIAP de la SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural) pronostica un incremento en 3.2 % respecto al año anterior (FAO, 2020).

Sin embargo, conseguir producciones agrícolas con características adecuadas que permitan continuar a México en esta posición y mantener los estándares de calidad es una situación comprometida para los agricultores, debido al incremento en los últimos años de las plagas y enfermedades que ponen en riesgo la producción y la seguridad alimentaria en muchas áreas agrícolas afectadas, repercutiendo en consecuencias económicas, sociales y ambientales. Además, el cambio climático ha alterado la presencia y dispersión de las plagas y enfermedades

tanto de animales como de las plantas. Aunado a esto, la resistencia de algunos antimicrobianos se ha dispersado cada vez más rápido a las condiciones ambientales que se están presentando a nivel mundial. El control de plagas y enfermedades ha traspasado fronteras y es necesario trabajar para mejorar la producción tanto vegetal como animal y cuidar al mismo tiempo aspectos fundamentales de la inocuidad alimentaria.

Con la problemática expuesta, se observa que la producción de cultivos agrícolas y de hortalizas suele afectarse por plagas, ocasionando la reducción de la producción, lo cual disminuye también su calidad y provoca la pérdida total del área sembrada. No todos los insectos presentes en los cultivos son dañinos, el impacto económico es diferente según sea el caso, bien puede ser positivo (enemigos naturales de plagas o actuar como polinizadores en cultivos) o negativo (por causar daños a nivel económico en los cultivos). Aproximadamente 5 000 especies pueden ser clasificadas como dañinas, pero considerando que solo se cuenta con 32 órdenes taxonómicos la clase Insecta, solo 6 son los que ocasionan afectaciones como plagas a la agricultura. Las plagas agrícolas más comunes y con mayor número de especies se encuentran en los siguientes órdenes taxonómicos: Diptera, Lepidoptera, Coleoptera, Hemiptera, Tysanoptera y Orthoptera (Futurcrop, 2018).

Rodríguez y Jiménez (2019) consideran necesarias técnicas y estrategias para minimizar las pérdidas agrícolas, que suelen provocar enfermedades o daños a las plantas. La aplicación de estas ayudaría a incrementar la producción de alimentos y eficiencia de los sistemas productivos.

Después de la Segunda Guerra Mundial de 1939, se inició con la llamada “era de los insecticidas modernos” (agroquímicos, pesticidas, los cuales fueron usados para reducir daños en los cultivos ocasionados por plagas causando pérdidas económicas, generando un retraso momentáneo al progreso del control biológico. Sin embargo, el uso excesivo y la elevada toxicidad de estos ha generado persistencia en el ambiente (suelo), y el mal uso de estos productos ha provocado la destrucción de muchas áreas de sembradío y sus residuos finalizan en diferentes ecosistemas, ocasionando grandes daños que perjudican o interfieren en las cadenas tróficas. Por otro lado, el uso desmedido provoca la resistencia de las plagas, lo que ha permitido que se replanteen las técnicas de control de plagas con estos productos.

Definición de plaga agrícola

El término plaga es una connotación al daño ocasionado a un bien personal, planta y/o animal, y generalmente su efecto puede ser de gran magnitud. En la agricultura, la definición de plaga se refiere a todo organismo que al alimentarse le causan perjuicio, manifestándose incluso con la muerte del cultivo, en la reducción

de producción o en la pérdida económica para el productor. Los insectos son las principales plagas agrícolas, no solo por su presencia, sino porque muchas veces son vectores de agentes causantes de enfermedades, como pueden ser virus y hongos, entre otras (CEDRSSA, 2020).

El término *plaga agrícola* ha sido abordado por varios autores, y gira en torno al organismo que reduce la disponibilidad, calidad o valor de un recurso, también puede definirse como cualquier especie animal u organismo fitófago, lo que provoca que el cultivo baje su producción, reduzca el vigor y afecte el valor de la cosecha e incremente sus costos de producción al realizar acciones de control de la misma (Cisneros, 1995; Morales et al., 1999). De acuerdo con el comportamiento de las plagas, estas pueden ubicarse en categorías ecológicas de los consumidores primarios: *plagas clave*, como las de mayor importancia para el agricultor; ya que son especies que se presentan en forma persistente cada año y llegan a causar pérdidas considerables en la producción como en costos de su manejo; *plagas ocasionales*, como aquellas que, aunque pueden causar pérdidas importantes, se presentan solo ocasionalmente (no siempre) y están asociadas a factores climáticos; y *plagas secundarias*, las cuales suelen estar presentes, pero no ocasionan pérdidas significativas (Jiménez, 2009; Rodríguez y Jiménez, 2019).

Perspectiva agrícola

Dentro del contexto de plaga, el término “control natural” se relaciona con otros términos, como “resistencia ambiental” o “balance de poblaciones”. Lo que significa que el control natural es la reacción biológica y física de la propia planta para evitar el incremento poblacional de la plaga (Cisneros, 1995). Rodríguez y Jiménez (2019) mencionan que el combate de plagas va a depender de la eficacia que se requiera obtener con los recursos que se apliquen, por lo que recomiendan necesario diseñar estrategias oportunas para que el control se realice de manera racional y eficiente, tomando en cuenta aspectos ecológicos de la plaga, el cultivo, el ambiente y, en general, los factores que determinan la existencia de los insectos plaga en los cultivos agrícolas (Morales et al., 1999), y como menciona Bahena (2018): “No se trata de solucionar con base en los síntomas, sino de encontrar el origen de las plagas para incidir en las causas y modificar las condiciones que hacen que aumenten, con el fin de tener un mejor manejo”.

Los aspectos más importantes que se deben considerar para el manejo de plagas en cultivos se presentan a continuación:

- Conocimiento de la biología del cultivo, es decir, saber qué actividades o funciones (interacciones) realiza el insecto en el cultivo: identificar los diferentes tipos de insectos, los perjudiciales (dañan a plantas de cultivo),

los benéficos (polinizadores, depredadores y parasitoides). Ya identificada la interacción, se puede establecer el manejo adecuado y oportuno, así como utilizar y preservar a los benéficos existentes.

- Identificación de las plagas del cultivo. Es importante identificar a la plaga primaria que esté afectando al cultivo.
- Sincronización del ciclo biológico del insecto plaga con las etapas fenológicas del cultivo.
- Para un manejo adecuado y eficientemente de la plaga primarias es importante obtener información sobre su conducta dentro del cultivo (alimentación, reproducción, forma de propagación y sitios preferibles para vivir). Identificar el daño económico que causa, es decir, conocer todo el ciclo biológico de la especie.
- Conocer y seleccionar el método de manejo más apropiado a esa plaga para evitar daños al medio ambiente y menor costo en el manejo (Rodríguez y Jiménez, 2019; Vázquez y García, 2001).
- Conocer el estatus socioeconómico del agricultor. Para tratar de adaptar una técnica de control que se pueda ajustar a su economía, sugiriendo métodos alternativos de bajo costo.
- Reconocer en qué momento es necesaria la intervención de la técnica de manejo, ya sea química o biológica.

Tomando en cuenta estas consideraciones, se puede establecer cuál es el tipo de control más apropiado para el manejo de la plaga, considerando también el cultivo agrícola, el efecto nocivo que esté causando, qué controladores biológicos tiene, el valor económico del cultivo y los recursos financieros del agricultor para seleccionar y ejecutar el manejo.

Clasificación de los métodos de control

El productor puede seleccionar de las diferentes estrategias la que considere más adecuada para ejecutar un buen manejo integrado de plagas en su cultivo (Stenberg, 2017). Estas varían en diferentes grados de impacto en el agroecosistema (Rivera, 2017). Las opciones para la elección de alguna herramienta son amplias y de muy variada naturaleza para el control de plagas, como la reducción de las densidades de las poblaciones de insectos, que en ocasiones requiere de la utilización de diversos métodos o técnicas de control (Tabla 10). Los agricultores pueden utilizar sus propias técnicas basados en la experiencia y en la observación del comportamiento de todos los elementos de su sistema productivo.

Tabla 10

Clasificación de los métodos de control de plagas utilizados en la agricultura

Tipo de control	Ejemplo
Control mecánico	Uso de barreras
Control físico	Uso de altas o bajas temperaturas
Control cultural	Utilización de prácticas agronómicas y plantas resistentes
Control biológico	Uso de depredadores, parasitoides y patógenos
Control químico	Uso de plaguicidas e insecticidas
Control etológico	Uso de trampas, feromonas
Control genético	Hibridaciones estériles
Control legal	Reglamentación de cultivos, cuarentenas
Control integrado o manejo integrado de plagas	Uso combinado de estrategias

Fuente: elaboración propia.

Modalidades o estrategias de control

Control mecánico

Este control es amigable con el medio ambiente, se usa en áreas pequeñas o situaciones específicas (Navarro, 2010). Futch (2014) menciona que consiste en usar dispositivos, trampas, máquinas u otros métodos físicos para controlar o alterar el ambiente donde la planta puede ser encontrada o, en su defecto, evitar que la plaga entre en determinada área. Por otro lado, Cisneros (1995) ya comentaba que esta técnica es una de las más utilizadas para minimizar el grado de infestación de las plagas, sirviendo como una alternativa al uso de plaguicidas. Estas técnicas tienden a desaparecer porque en general demandan mucha mano de obra.

El control mecánico tiene diferentes usos, algunos de los cuales se enlistan a continuación (Cisneros, 1995; Vázquez y García, 2001; Jiménez 2009; Navarro, 2010; Futch, 2014; CEDRSSA 2020):

- Colecta directa de los insectos
- Eliminación de frutos, brotes o ramas infectadas
- Barreras físicas
- Rotación de cultivos
- Alternancia de cultivos
- Cultivos de refugio

- Solarización del suelo
- Herramientas para la limpieza de cultivo
- Inundación
- Coberturas vivas y de materia orgánica
- Acolchado
- Trampas de luz incluyendo fotocromáticas y en algunos casos de calor o frío
- Trampas alimenticias

La rotación de cultivos

Es uno de los procedimientos utilizados en el control mecánico, esta táctica minimiza la infestación de plagas en el cultivo, evita daños severos y alarga el tiempo de la aparición de la plaga hasta niveles peligrosos. La rotación del cultivo obliga a la plaga a sobrevivir sin su hospedero, favoreciendo una baja población de insectos. Sembrar el mismo cultivo ciclo tras ciclo en la misma área o terreno favorece el aumento de poblaciones de organismos que se alimentan de estos cultivos (Navarro, 2010).

Cultivos trampa

Esta técnica consiste en sembrar plantas alrededor del cultivo o intercalado que atraen o alejan a los insectos plaga, la siembra debe ser antes o simultáneamente al cultivo principal. Las plantas pueden ser una especie o variedad diferente al cultivo o ser simplemente diferente en su etapa de desarrollo, considerando su atractivo para las plagas cuando estas se presentan en las etapas tempranas de los cultivos. Este tipo de cultivo trampa es útil para controlar plagas recurrentes, abundantes y dañinas; esta estrategia funciona mejor con plagas de movilidad intermedia y que se desplazan por corrientes de aire (áfidos) o con gran capacidad de vuelo (Navarro, 2010). Brechelt (2004) menciona que dentro de las plantas que se pueden recomendar como repelentes o disuasivos de los insectos son aromáticas, como el cilantro, perejil, apio, menta, hierbabuena, y algunas gramíneas siendo estas efectivas para las larvas de mariposas y nematodos. Sembrar cultivos trampas es beneficioso porque se infestan primero que el cultivo principal, además de dar tiempo a la reproducción o llegada de los parasitoides y depredadores que circundan en el medio.

Solarización

Jiménez (2009) menciona que es una técnica que utiliza la energía solar para eliminar insectos, algunos patógenos del suelo (hongos y bacterias) así como nematodos y semillas de malezas. El proceso es simple, se sugiere un incremento en

la temperatura. Una vez preparado el suelo y hechos los semilleros, se humedece con abundante agua sin saturarlo, se cubre el semillero con plástico transparente y se sellan los extremos de tal manera que no permita la fuga de agua al calentarse por los rayos del sol; se recomienda colocar un segundo plástico con ayuda de arcos a una distancia de 25 cm del primero. Este procedimiento dura de 3 a 6 semanas, dependiendo de las temperaturas de la zona. La principal ventaja de este procedimiento es que hay una rápida descomposición de la materia orgánica, favoreciendo la disponibilidad de nutrientes para las plántulas.

Control legal

Consiste en el conjunto de medidas legales y administrativas obligatorias reguladas por el gobierno que impiden la introducción y dispersión de una plaga perjudicial o enfermedad, que podrían ocasionar daños o pérdidas significativas a la agricultura nacional. Asimismo, trata de impedir o retardar su propagación, erradicarla o limitar su desarrollo mediante la reglamentación del cultivo. El Manejo Integrado de Plagas -MIP- está fundamentado con regulaciones legales fitosanitarias, como leyes, resoluciones, decretos, reglamentos, con el propósito de actuar eficazmente en el área de influencia de la plaga. Este control permite fiscalizar los productos agrícolas importados en los puestos de entrada al país, como las aduanas en carreteras y aeropuertos, para evitar la introducción y dispersión de plagas perjudiciales a nuestra agricultura. De igual manera, garantiza el buen estado fitosanitario de los productos agropecuarios sujetos a exportación (Cisneros, 1995; Martínez, 2010; VIFINEX, 2001; Falconi, 2013). El control legal también contempla disposiciones que regulan la comercialización y el uso ilícito de los pesticidas, incluye también las medidas de cuarentena, inspección, monitoreo y erradicación. Estas medidas deben ser consideradas por todas las personas que se dediquen a la venta y distribución de estos productos en el país (Cisneros 1995).

Control etológico

Falconi (2013) menciona que la utilización de métodos de represión se basa en el comportamiento de los insectos a determinados estímulos con relación al medio ambiente, tienen amplio uso en los programas de MIP, y pueden relacionarse con otros componentes, por ejemplo, el uso extenso de trampas y feromonas, el uso de trampas luminosas o los cebos utilizados como sustancias alimenticias, empleados como métodos indirectos para evaluar y monitorear poblaciones de insectos (Cisneros, 2010). Actualmente, en México se desarrolla el programa de SENASICA-MOSCAMED con la misión de evitar el establecimiento de esta plaga, detener su avance hacia el interior del país y al norte en el continente, objetivo que se ha

cumplido con resultados satisfactorios cada año, para lo cual participan los países de México, Estados Unidos y Guatemala, haciendo uso del manejo integrado de plagas (SENASICA, 2020).

El comportamiento de los insectos generalmente se determina por una respuesta o estímulo de naturaleza química, aunque considera respuestas a estímulos físicos y mecánicos. Cada insecto tiene un comportamiento determinado por un estímulo. Una sustancia química liberada por planta puede incitar a atraer al insecto y obligarlo a acercarse a ella; y su sustancia atrayente puede causar un efecto opuesto, haciendo que el insecto se aleje, considerándose una sustancia repelente. Algunas plantas liberan sustancias que estimulan que la ingestión aumente, otras lo inhiben. Esto explica que el comportamiento de los insectos se debe al conjunto de reacciones a una variedad de estímulos, y que se ve favorecido gracias al estímulo o señales químicas que se producen, permitiendo la comunicación entre individuos de la misma especie. Los mensajes que se envían y reciben son de atracción sexual, alarma, agregación, orientación y otros. En el punto de vista práctico, las aplicaciones del control etológico incluyen feromonas, atrayentes en trampas y cebos; repelentes, inhibidores de alimentación y sustancias diversas con efectos similares (Cisneros, 2010).

Repelentes y atrayentes

Los insectos tienen diferentes formas de comunicación entre sí, generalmente lo hacen por sonidos o por olores y su comportamiento frente a la planta es una respuesta a la reacción de la percepción de esas sustancias secretadas y liberadas llamadas feromonas. Existen algunos mecanismos que las plantas han desarrollado y actúan como repelentes, como la textura superficial de la planta, pubescencias, espinas, polvos gránulos, ceras. Los repelentes químicos que secretan las plantas son gaseosos u olfatorios y de contacto. Los primeros tienen escaso poder residual debido a su volatilidad; los de contacto, tienen el inconveniente de no cubrir toda la superficie conforme crecen los tejidos de la planta (Cisneros, 2010). El uso de compuestos volátiles (mVOC) puede funcionar como insecticida o como control de insectos al producirse la fermentación y descomposición de sustratos como fuente de alimento para los adultos que los atrae para la ovoposición y de desarrollo, por ejemplo, control de algunos insectos como moscas (Diptera) y en algunas polillas (Lepidoptera) (Caroline y Borrero, 2018).

Las trampas son herramientas para atraer a los insectos de plantas, capturarlos y causarles la muerte. Se suelen emplear e instalar para monitorear insectos o determinar su ocurrencia y abundancia para ejercer un control oportuno. El uso de trampas en ocasiones se emplea como métodos directos para la

destrucción de insectos. Una las principales ventajas del uso de trampas es no dejar residuos tóxicos que contaminan el ambiente, pueden usarse en diferentes ciclos agrícolas sin ser afectadas por las diferentes actividades que se realizan durante el cultivo; por otro lado, el bajo costo de operación comparado con otras estrategias es considerable. Las desventajas que presentan las trampas es que los atrayentes que se usan atraen a una diversidad de insectos generalistas, no propiamente a la plaga que está causando el daño al cultivo. Otra desventaja es que actúa solo con adultos y no con los estadios larvarios, que son los que más daños causan.

Existen trampas cuyo atrayente consiste en una fuente química o física, como la luz, que facilita la captura de los insectos. El uso de los atrayentes químicos que se emplean en las trampas son sustancias que emiten olores que perciben los insectos y hacen que se dirijan hacia la trampa. Dependiendo de la finalidad para la que se requieren atraer a los insectos hay dos tipos de atrayentes químicos: los relacionados con olores de alimentos y los relacionados con olores de atracción sexual entre ellos (Cisneros, 2010).

La luz como atrayente

La actividad nocturna que presentan algunos insectos puede también ser monitoreada con la ayuda de trampas de luz, se desconoce cuál es el principio de atracción de este comportamiento, solo que muchos insectos caen en estas trampas; esto ha servido en la detección oportuna de la presencia de algunos insectos plaga. Se ha documentado que el espectro electromagnético que atrae a los insectos se encuentra en la longitud de onda que va de los 300 a 700 milimicrones que corresponde a la luz natural y a las radiaciones ultra-violeta (luz negra). De la amplia diversidad de insectos de vida nocturna, son los del orden Lepidoptera los más atraídos por las trampas de luz, y en menor abundancia el orden Coleoptera y otros insectos. El diseño de estas trampas está elaborado de tal manera que haya una superficie de impacto, un embudo y un recipiente donde se contenga el líquido conservación donde caen los insectos (Cisneros, 2010).

Trampas pegajosas de color

En la práctica agrícola es común utilizar trampas con pegamento para atrapar insectos que llegan a los cultivos. Existen diferentes grupos de estos que prefieren un color en particular, por ejemplo, el color amarillo es preferido por los áfidos y moscas minadoras, el blanco por los trips y el color rojo por algunas especies de escarabajos de la corteza. Las trampas pueden comprarse o elaborarse con cuadros de plástico amarillo y cubrirse con una sustancia pegajosa donde el insecto queda adherido. Una manera práctica es untar aceite u otra grasa vegetal o mineral, otra

opción es usar un pegamento especial de larga duración (*tanglefoot, stickem*). Hay trampas fijas colocadas en el campo con marcos y estacas, y trampas móviles que el agricultor pasa continuamente entre el cultivo. Las ventajas del uso de esta estrategia son: 1) reducción de la población de insectos adultos y 2) conservación de los enemigos naturales. Esta técnica permite al agricultor detectar a tiempo la llegada de algún insecto plaga que pudiera dañar al cultivo, y considerar cuándo se debe ejercer un control para proteger la producción (Cisneros, 2010).

Feromonas

Los insectos y las plantas pueden liberar de forma natural compuestos volátiles (CV) que afectan el comportamiento y la fisiología de los insectos, por mencionar algunas, están las alomonas o las kairomonas, que emiten señales beneficiosas para quien las emite, pero perjudiciales para los organismos receptores, los cuales suelen ser miembros de diferentes especies. Con la percepción de aromas, los insectos reaccionan con comportamientos variados muy específicos y fijos. Algunos ejemplos de su uso son la regulación de castas, agregación, alarma, sexuales, antiafrodisiacas, de dispersión, antiagregación o epidécticas (Rossini y González, 2019; Rebollar, et al., 2012).

Las feromonas sexuales son utilizadas para atraer individuos del sexo opuesto, otras para agregar o concentrar organismos de la misma especie (hormonas de agregamiento), otras son utilizadas como marcadoras de senderos para guiarlas hacia otro camino y algunas otras son disuasivas de alarma. La obediencia muestra un campo de acción y posibilidades para manejar a voluntad su comportamiento. Originalmente las hormonas sexuales han sido usadas para monitoreo, en otros casos para buscar un manejo adecuado de la plaga, se ha documentado también que la captura masiva de machos evitará que ocurran los apareamientos y las oviposuras necesarias para el incremento y establecimiento de la plaga (Osorio, 2001; Guerrero y Bahena, 2018). El control autocida, también llamado Técnica del Insecto Estéril (TIE), se utiliza contra la mosca del mediterráneo y otras moscas de la fruta en diferentes lugares del planeta (Hendrichs et al., 2002) como un método de prevención, supresión o erradicación con resultados positivos. El éxito de estas acciones está directamente relacionado con el éxito de los machos estériles liberados. Al respecto, es indispensable mejorar algunos de los elementos que inciden en el proceso de la calidad de los adultos estériles liberados tales como fuentes de nutrientes, dosis de irradiación, así como los métodos de estimación de acoplamientos o en la frecuencia de liberación.

Control biológico

El control biológico (CB), es la técnica aplicada para el combate de plagas y se considera una herramienta eficaz en el manejo de plagas y se dirige a menudo contra las plagas nativas de una zona geográfica, trata de buscar y establecer un equilibrio natural mediante la implementación de diferentes técnicas (Futch, 2014). Nava et al. (2001) definen al CB como el uso de parasitoides, depredadores o patógenos que ayudan a que las poblaciones de insectos sean más bajas. Esta técnica permite controlar la proliferación de la plaga aprovechando los enemigos naturales presentes. El CB comprende el uso de enemigos naturales de las plagas, que no eliminan totalmente a su presa; dado que a futuro, no tendrían suficiente alimento para consumir (Navarro, 2010).

Puede presentarse en dos modalidades: CB natural y CB inducido o artificial. En el primer caso, existen organismos benéficos que son enemigos naturales de plagas agrícolas; se requiere de un conocimiento profundo de sus actividades, de sus épocas de abundancia, y su distribución beneficiará a las plantas cultivadas por el hombre. Mientras que en el CB inducido se incluye la búsqueda de enemigos naturales en áreas lejanas, se requiere de un estudio minucioso, cría masiva y colonización hasta lograr un equilibrio del área (Carrillo, 1991). Para liberar estos organismos no nativos o introducidos, se deben de tomar las precauciones y estudios con pruebas exhaustivas y una evaluación para garantizar que no representan un riesgo para los sitios donde serán liberados para controlar la plaga y evitar que estos organismos liberados se conviertan en plagas introducidas (Futch, 2014). Son importantes los conocimientos bio-ecológicos para el combate y regulación de poblaciones de plagas. Conociendo su origen, evolución y desarrollo biológico, se puede determinar qué organismos utilizar, entre los que se encuentran los parásitos, depredadores y patógenos (Bahena, 2018).

Predadores

En la naturaleza hay insectos polífagos que se alimentan vorazmente de diferentes estados biológicos de sus presas, que generalmente son otros insectos; siendo, por lo tanto, menos específicos que el parasitoide (Romero, 2004). Algunas de las características de los predadores incluyen rasgos biológicos, rol e impacto de los depredadores y estos se emplean en algunas ocasiones donde la plaga no tiene un parasitoide para su control. Los depredadores, en su mayoría son voraces y se alimentan de una plaga durante su desarrollo. Algunas especies son más eficaces que otras al controlar las plagas. Hay dos tipos de depredación: los nativos y específicos, los primeros son más efectivos en la eliminación de muchas presas, pueden eliminar tanto plagas nativas como exóticas; mientras que los depredadores específicos son

insectos que se usan para el control de plagas exóticas (Zambrano, 2020). Existen más de 30 familias de insectos depredadores, de las cuales Anthocoridae, Nabidae, Reduviidae, Geocoridae, Carabidae, Coccinellidae, Nitidulidae, Staphylinidae, Chrysopidae, Formicidae, Cecidomyiidae y Syrphidae son las más importantes en el manejo de plagas en agroecosistemas (Van Driesche et al., 2007). Entre los insectos benéficos como controladores de plagas en hortalizas y frutales se encuentran insectos en estadios larvarios y adultos de las familias Coccinellidae, Chrysopidae, Miridae, Braconidae, Aphelinidae, Cecidomyiidae (García et al., 2001). Algunos casos de éxito son los adultos de *Hippodamia convergens* y la tijereta *Doru taeniatum*, que ocasionaron la mayor mortalidad de huevos de *S. frugiperda*, una plaga que limita el rendimiento de maíz, trigo y otros cultivos (Jaraleño et al., 2020).

A pesar de la importancia de la depredación en el factor de mortalidad, como mortalidad denso-dependiente de las poblaciones de un organismo objetivo, es interesante evaluar el papel de otros organismos posiblemente locales para el control de la plaga (Alderete et al., 2010). Muchos especialistas consideran importante el papel de los organismos entomófagos en la naturaleza para restablecer y equilibrar el perturbado equilibrio ecológico, señalando que muchas poblaciones de estos depredadores pueden aumentarse en la naturaleza mediante liberaciones periódicas de especies criadas en laboratorio (García et al., 2001; Romero 2004; Zambrano, 2020).

Parasitoides

Bernal (2007) señala que el parasitoide se refiere a todo insecto que necesita de otro para sobrevivir y llegar al estado adulto; esto es, que durante su desarrollo larvario se alimenta y desarrolla en el interior de otro organismo (endoparasitoide), o en la superficie del cuerpo de su hospedero (ectoparasitoide), de tal manera que cuando culmina su desarrollo y llega a estado adulto puede vivir libremente. Un parasitoide busca activamente y elige con cuidado a su huésped y generalmente lo termina matando. Cuando lo parasitan, van alimentándose de sus órganos internos para crecer hasta que lo matan, terminando en un insecto adulto que finalmente solo requirió un solo huésped para culminar su ciclo de vida. El parasitoide elige un huésped de tamaño similar, con un ciclo de vida simple, y generalmente pertenecen al mismo grupo taxonómico (ambos son insectos).

Es importante conocer si existen parasitoides de una plaga, esto se puede constatar con monitoreos en las áreas agrícolas o regiones, ya que su presencia permitiría un buen manejo agroecológico de la plaga. Los insectos parasitados u hospederos tienden a morir en un tiempo muy corto, pero es desde antes que van mostrando inactividad, dejando de causar daños al cultivo (Guerrero y Bahena, 2018).

La efectividad de un parasitoide se logra con algunas estrategias: 1) la búsqueda constante, activa y dirigida de un hospedero; 2) ovipositar sobre, cerca o dentro del huésped una vez que lo haya encontrado; 3) que la larva del parasitoide se desarrolle alimentándose de su huésped hasta emerger como adulto. La mayoría de los insectos son holometábolos; en el caso de los parasitoides, pasan por cuatro etapas: huevo, larva, pupa y adulto; la presencia de parasitoides en el ambiente sugiere controlar problemas de plagas porque su efectividad es mayor respecto al uso de predadores y patógenos. Una población de parasitoides, al igual que los depredadores, también responde a la densidad poblacional de la especie plaga con cambios en la densidad propia (denso-dependencia). En este contexto, el término de hiperparasitoide o parasitoide secundario se refiere a un organismo que se desarrolla a expensas de las larvas de los parasitoides primarios (Van Driesche y Bellows, 1996).

Dentro de los casos de control biológico en México está realizado en el 2009, donde se implementó un programa nacional para el control del psílido asiático de los cítricos *Diaphorina citri*, vector de *Candidatus Liberibacter asiaticus*, bacteria causante de la enfermedad de los cítricos Huanglongbing; el parasitoide asiático *Tamarixia radiata* se liberó en 19 entidades citrícolas del país (Arredondo y Rodríguez, 2020). Otros parasitoides ampliamente utilizados son Trichogrammatidae, Ichneumonidae, Braconidae, Pteromalidae, Eulophidae Vandriesche (Arredondo y Rodríguez, 2008).

Entomopatógenos

Son agentes de control biológico; muchos de ellos son los causantes de cerca del 80% de las enfermedades de los insectos y otros artrópodos. Estos microorganismos son también considerados como especies entomófagas por alimentarse de un huésped. Los hongos entomopatógenos presentan un mecanismo de acción que los diferencia de otros grupos de patógenos: invaden y penetran la cutícula del insecto (superficie externa) así como los orificios naturales como la boca o el ano y los estigmas respiratorios; algunos hongos llegan a su hospedero al ingerir sus conidios forman un tubo germinativo que invade su hemocele y es gracias a una serie de procesos enzimáticos que se va degradando la cutícula, estas infecciones comienzan con el contacto entre el huésped susceptible y las partículas infecciosas (como las esporas o conidios) (Van Driesche y Bellows, 1996; Nájera, 2018). Las etapas de infección son: 1) penetración al tegumento, 2) germinación del conidio, 3) penetración y dispersión al hemocele (cavidad general del cuerpo), 4) multiplicación al interior del insecto, 5) muerte del insecto y 6) la colonización.

Durante las primeras fases de la manifestación de la enfermedad, los síntomas que presentan los insectos infectados por hongos entomopatógenos son casi imprevisibles, muy escasos o nulos; conforme avanza el desarrollo del hongo, en ocasiones pueden verse manchas irregulares necróticas -tejido muerto- en la superficie del cuerpo, como resultado de la penetración o invasión del hongo (Nájera, 2018).

Otros entomopatógenos utilizados en control biológico son los nematodos, ubicados en las familias Steinernematidae y Heterorhabditidae, que poseen un efecto letal sobre sus hospedadores y se utilizan en el control biológico de insectos perjudiciales (Rodríguez et al., 2012). Se les ha encontrado en regiones de clima frío, templado subtropical y tropical (Burnell y Stock, 2000; Bertolotti y Cagnolo, 2019).

Control químico

El control químico es el uso de un producto o sustancia elaborada de manera natural o sintética para combatir poblaciones de insectos, ácaros, u organismos fitopatógenos a través del uso de herbicidas, fungicidas, nematicidas e insecticidas, contribuyendo a bajar su nivel poblacional (Martínez, 2010). Sin embargo, su uso en exceso puede contaminar y degradar los suelos o alteran sus propiedades físicas, químicas y biológicas, provocando que estos se hagan más pobres nutricionalmente porque la mayoría son altamente tóxicos, alteran las comunidades microbianas y contaminan el suelo y el agua superficial y subterránea (Jiménez, 2011).

Leal-Almanza et al. (2018) mencionan que en décadas recientes la agricultura convencional se ha caracterizado por el uso excesivo de plaguicidas con la finalidad de aumentar la producción agrícola. El control químico presenta un daño colateral adverso con el control biológico, e incluso, el uso de algunos plaguicidas obstaculiza totalmente el empleo del control biológico (Croft, 1990).

Los métodos químicos son imprescindibles para el agricultor por ser rápidos y efectivos, a pesar de los costos elevados que estos productos alcanzan para obtener rendimientos altos o moderados en sus cosechas. A partir de los avances científicos de los últimos años, se han desarrollado nuevos plaguicidas con mecanismos de acción más específicos, como los fenilpirroles, anilino pirimidinas, fenoxiquinolinas, las estrobirulinas o los neonicotinoides e inhibidores de la síntesis de quitina y también nuevos compuestos (elicitores) que activan mecanismos de defensa de las plantas (Knight et al., 1997).

A pesar de la eficacia de los productos químicos que se elaboran en los últimos años, menos contaminantes, pero más costosos, siguen siendo utilizados en MIP con daños ambientales muy severos en el agua, aire y suelo (Badii, 2007). Con el uso de plaguicidas se obtienen: 1) altos rendimientos (producción- productividad),

2) buena calidad y aspecto físico de los productos agrícolas, 3) mayor eficiencia en la protección de las plantas, 4) estabilidad en la economía agrícola, 5) control inmediato de las plagas una vez que sobrepasan el umbral económico, 6) implementación rápida de acción curativa, lo que permite evitar mayores daños, 7) posee un amplio rango de usos, propiedades, métodos de aplicación, selectividad y otros, 8) su utilización produce una relación costo-beneficio relativamente alta, 9) solo se usan cuando sean necesarios (Salas, 1993).

Dentro de los principales problemas adversos de los químicos, es que causan un efecto en la salud de los seres humanos y animales si no se usan de forma adecuada y con los cuidados necesarios durante su aplicación (forma, hora), equipamiento y protección; contaminan el medio ambiente, además favorecen al desarrollo de poblaciones resistentes de plagas, surgimiento de plagas secundarias u ocasionales, presencia de residuos en los productos cosechados, alto costo económico y energético (Salas, 1993; Badii, 2007; CEDRSSA, 2020), así como el desequilibrio ecosistémico y la pérdida de biodiversidad y fauna benéfica (Badii, 2007).

Mecanismos promotores de crecimiento

En los últimos años, una de las formas para ayudar a una buena producción y al crecimiento de las plantas es la utilización de algunos promotores de crecimiento; de hecho, algunos agricultores han adoptado el uso de microorganismos promotores de crecimiento para las plantas, para potenciar el crecimiento de raíces, fortalecer mecanismos naturales para reacción a enfermedades e insectos y aumentar la producción.

El uso de las bacterias de la rizósfera en el crecimiento de las plantas ha manifestado su efecto en la facultad de fijar nitrógeno, lo que favorece a un buen crecimiento y producción. Sin embargo, en las últimas décadas las bacterias han destacado como promotoras del desarrollo de las plantas, debido a su habilidad y a su capacidad para sintetizar metabolitos o sustancias reguladoras de crecimiento. Los reguladores de crecimiento vegetal sintetizados por las plantas son cinco: auxinas, giberelinas, citocininas, etileno y ácido abscísico (Arshad y Frankenberger, 1991). Cuando las plantas producen estos metabolitos en forma endógena, se les denomina hormonas vegetales o fitohormonas.

La alternativa actual para optimizar el crecimiento de los cultivos agrícolas son los productos biológicos o biofertilizantes. Los cuales son incorporados al sistema productivo como productos seleccionados por sus bondades y beneficios que elevan sus funciones en diversos aspectos biológicos. Los productos biofertilizantes que están siendo empleados son los microorganismos promotores de crecimiento vegetal, conocidos como PGPM, por sus siglas en inglés (*Plant Growth-Promoting*

Microorganism), aislados de ambientes diversos, con la habilidad potencial de afectar positivamente el crecimiento de las plantas (Bashan et al., 1996; Elein et al., 2005).

Entre los promotores más utilizados que estimulan el crecimiento de las plantas mediante la producción de antibióticos, se encuentran los PGPM como *Pseudomonas fluorescens*, que evita enfermedades a la planta por otras bacterias y hongos patógenos; *Bacillus subtilis*, produce auxinas que promueven el crecimiento en tomate e inducen resistencia sistémica contra *Fusarium oxysporum*, que provoca marchitez y pudrición de las raíces (Gupta et al., 2000). En general, los biofertilizantes son una herramienta ampliamente utilizada que da alternativas viables para alcanzar un desarrollo agrícola ecológicamente sostenible y prometedor; ya que permite una producción a bajo costo que no contamina el ambiente y mantiene la conservación del suelo (Elein et al., 2005).

Conclusión

Pese a la complicada coyuntura de la producción agrícola del país, la agricultura mexicana refleja posibilidades hacia las demandas del sector y ha manifestado su potencial por considerarse una de las naciones más ricas en biodiversidad del mundo.

En los últimos años se está incentivando y creando conciencia para que las prácticas en el manejo y control de plagas que se realicen en los cultivos agrícolas impacten positivamente en la conservación ambiental. Se recomiendan prácticas sustentables más amigables con la producción para evitar el daño al suelo, agua y atmósfera. Cuando el productor es competitivo e intensifica capital a su sistema de producción aunado a nuevas tecnologías y buenas prácticas para elevar su producción repercute de algún modo en lo económico, social y ambiental, e incide directa o indirectamente en los ecosistemas.

Los problemas agrícolas por la presencia de plagas llegan a alcanzar un 20-30 % de afectación en los rendimientos productivos, por esta razón se derivan las constantes recomendaciones de no utilizar plaguicidas, la aplicación de las buenas prácticas agrícolas modernas en sus diferentes modalidades y estrategias anteriormente expuestas. Lo anterior puede llevar a una buena selección y estrategia de manejo adecuados para minimizar umbrales de plagas, cuidando a la fauna benéfica, permitiendo alcanzar producciones de buena calidad aptas para el mercado agroalimentario nacional e internacional.

Referencias

- Alderete, M., Liljestrom, G., Fidalgo, P., Alderete, M., Liljestrom, G., y Fidalgo, P. (2010). Bio-ecología y perspectivas para el manejo de la avispa sierra del sauce, *Nematus oligospilus*. *Serie Técnica del Manejo Integrado de Plagas Forestales*. Cuadernillo 10. Buenos Aires.
- Arredondo, B. H. C. y Rodríguez del Bosque L. A. (2008). *Casos de Control Biológico en México* (1ra ed.). México.
- Arredondo, B. H. C. y Rodríguez, B. L. A. (2020). Programas de control biológico de México. En Arredondo-Bernal, H. C., Tamayo, M. F. y Rodríguez-del Bosque, L. A. (eds.). *Fundamento y práctica del control biológico de plagas y enfermedades. Biblioteca básica de agricultura (BBA)* (pp. 523-546). Cd. de México.
- Arshad, M., y Frankenberger, Jr., W. T. (1991). Microbial production of plant hormones. *Plant Soil*. 133. 11,1-8. <https://doi.org/10.1007/BF00011893>
- Badii, M., Landeros, J., y Cerda, E. (2007). Manejo Sustentable de Plagas o Manejo Integral de Plagas: Un apoyo al desarrollo sustentable. *Cultura Científica y Tecnológica*, 23, 13-30.
- Bashan, Y., Holguín, G., y Ferrera-Cerrato, R. (1996). Interacciones entre plantas y microorganismos benéficos. I Azospirillum. *Terra*, 14, 159-194.
- Bahena, J. F. (2018). Manejo Agroecológico de Plagas. *Enlace: La Revista de la Agricultura de la Conservación*, 3 -7.
- Bernal, J. S. (2007). Biología, ecología y etología de parasitoides. Pp. 61-74. En Rodríguez-del Bosque, L. A., y Arredondo-Bernal, H. C. (eds.), *Teoría y Aplicación del Control Biológico*. Sociedad Mexicana de Control Biológico, México.
- Bertolotti, M. A., y Cagnolo, S. R. (2019). Nematodos entomopatógenos (familias Steinernematidae y Heterorhabditidae) en Argentina. Recopilación de hallazgos de poblaciones naturales en medio siglo de prospecciones. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 6(1), 63-63.
- Brechelt, A. (2004). El manejo ecológico de plagas y enfermedades. Red de acción en plaguicidas y sus alternativas para América Latina (RAP-AL). *Fundación Agricultura y Medio Ambiente (FAMA)*, 1-14.
- Burnell, A., y Stock, S. P. (2000). Heterorhabditis, Steinernema and their bacterial symbionts-lethal pathogens of insects. *Nematology*, 2(1), 31-42.
- Caroline, D. C. y Borrero-Echeverry, F. (2018). *Control biológico de fitopatógenos, insectos y ácaros. Capítulo 23. Los volátiles microbianos y su potencial en el control biológico de fitopatógenos e insectos* (pp. 992-1006). Agrosavia. Colombia.
- Carrillo, S. J. L. (1991). Estado actual del control biológico en el manejo de plagas agrícolas. En Anaya, R. S y Bautista, N. (eds.), *Plagas y hortalizas y su manejo en México*. (pp. 206-213). Centro de Entomología y Acarología, C.P. y Sociedad Mexicana de Entomología.

- Cisneros, F. H. (1995). *Control de Plagas Agrícolas* (2da ed.). Lima, Perú.
- _____. (2010). *Control de Plagas: MIP. Fascículo 13. Manejo Integrado de Plagas*. 1-35 pp. Centro de Estudio para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, CEDRSSA. (2020). *Manejo Integrado de Plagas, una alternativa ante el uso de los plaguicidas*. Palacio Legislativo de San Lázaro. 26 pp. México.
- Croft, B. A. (1990). *Arthropod Biological Control Agents and Pesticides*. John Wiley and Sons, New York.
- Elein, T., A., Leyva, Á. y Hernández, A. (2005). Microorganismos benéficos como biofertilizantes eficientes para el cultivo del tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill). *Revista Colombiana de Biotecnología*, 7, 47-54. FAO. (2020). México en una Mirada. <http://www.fao.org/mexico/fao-en-mexico/mexico-en-una-mirada/es/> (Último acceso 23/07/2021)
- Falconí, P. J. S. (2013). *Guía Técnica, Manejo integrado de plagas y enfermedades de Kúwicha*. Agrobanco. Perú.
- Futch, S. H. (2014). *Pest management methods*. University of Florida. Citrus Industry. 6-9 pp. https://crec.ifas.ufl.edu/media/crecifasufledu/extension/extension-publications/2014/2014_May_Pestmgmt.pdf
- FuturCrop, (2018). Taxonomía de las Plagas.
- Jaraleño, T. J., Lomeli, F. J. R., Rodríguez, L. E., Bujanos, M. R. y Rodríguez, R. S. E. (2020). Egg parasitoids survey of *Spodoptera frugiperda* (Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in maize and sorghum in Central Mexico. *Insects*. 11(3), 157. <https://doi.org/10.3390/insects11030157>.
- Gupta, V. P., Bochow, H., Dolej, S., y Fischer, I. (2000). Plant growth-promoting *Bacillus subtilis* strain as potential inducer of systemic resistance in tomato against Fusarium wilt/Ein das Pflanzenwachstum fördernder *Bacillus subtilis*-Stamm als potentieller Resistenzinduktor gegen die Fusarium-Welke an Tomaten. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz/Journal of Plant Diseases and Protection*, 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.05.004>
- García, G. C., Carrillo, S. J. L., Medrano, R. H., González, C. M. P. y Pérez, S. G. (2001). Control Biológico de Plagas de Hortalizas. En *Estrategias para el control de plagas de hortalizas, estudios de identificación y control* (pp. 97-115).
- Guerrero, R. M. y Bahena, J. F. (2018). Manejo agroecológico de gusano cogollero *Spodoptera frugiperda* y gusano elotero *Helicoverpa zea*. *Enlace: La Revista de la Agricultura de la Conservación. CYMMIT-INIFAP*, 33-36.
- GCMA. (2020). *Perspectivas agroalimentarias* (2da. ed.).
- Hendrichs, J., Robinson, A. S., Cayol, J. P., y Enkerlin, W. (2002). Medfly areawide sterile insect technique programmes for prevention, suppression, or eradication: the importance of mating behavior studies. *Florida Entomologist*, 1-13.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). *Encuesta Nacional Agropecuaria*. <https://www.inegi.org.mx/temas/agricultura/> (Último acceso: 19/07/2021)
- Jiménez, M. E. (2009). *Métodos de Control de Plagas*. Universidad Nacional Agraria, Dirección de Investigación extensión y posgrado. Pp.174. Managua, Nicaragua.
- Jiménez, O. (2011). *Aislamiento, Selección e Identificación de Actinomicetos, Bacterias Fotosintéticas no Sulfurosas y Bacterias Ácido Lácticas con Potencial Biofertilizante, a Partir de Suelos Asociados al Cultivo de Plátano en la Costa Atlántica Colombiana*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia.
- Knight, S. C., Anthony, V. M., Brady, A. M., Greenland, A. J., Heaney, S. P., Murray, D. C., Powell, K., Schulz, C. A., Soinks, P. A., y Youle, D. (1997). Rationale and perspectives on the development of fungicides. *Annual Review of Phytopathology*, 35(1), 349-372.
- Leal-Almanza, J., Gutiérrez-Coronado, M. A., Castro-Espinoza, L., Lares-Villa, F., Cortes-Jiménez, J. M., y Santos-Villalobos, S. D. L. (2018). Microorganismos promotores de crecimiento vegetal con yeso agrícola en papa (*Solanum tuberosum* L.) bajo casa sombra. *Agrociencia*, 52(8), 1149-1159.
- Martínez, N. (2010). Manejo integrado de plagas: Una solución a la contaminación ambiental. *Comunidad y Salud*, 8(1), 073-082.
- Morales, S. J. Gutiérrez F., Díaz F., Pereira C., González R. y Neicy V. (1999). *Manual de Entomología Económica*. Universidad Centro Occidental “Lisandro Alvarado” Tarabana. Venezuela.
- Nava, C. U., Cano, R. P., y Martínez C. J. L. (2001). Manejo integrado de la Mosquita blanca de la hoja plateada, *Bemisia argentifolii* Bellows y Perring. En García G. C., y Medrano R. H., IPND y ITD (ed.). *Estrategias para el control de Plagas y Hortalizas. Estudios de identificación y control* (pp. 19-58).
- Nájera, R. M. B. (2018). Hongos Entomopatógenos y antagonistas. Alternativa para el Manejo Agroecológico de Plagas y Enfermedades. *Enlace: La Revista de la Agricultura de la Conservación*. CYMMIP-INIFAP, 11-13.
- Navarro, M. D. A. (2010). *Manejo Integrado de Plagas*. University of Kentucky College of Agriculture, Food and Environment Cooperative Extension Service.
- Osorio, O. R. (2001). Feromonas y su importancia en el control de plagas. Pp.76-96. En García G. C. y Medrano R. H., IPND y ITD (eds.). *Estrategias para el control de Plagas y Hortalizas*. Estudios de identificación y control. Durango.
- Rebollar, T. E.A., Castillo, V. A. y S. Ibáñez. B. (2012). *Temas selectos en Ecología Química de Insectos*. Cap. 5. Ecología Química de Phelebotominae (Diptera; Psychodidae). Pp. 120-135.

- Rivera, M. W. (2017). *Manejo Integrado de Plagas: Enfoque de responsabilidad en la producción*. Centro de Investigación en Biotecnología. ITCR. <https://www.croplifela.org/es/actualidad/articulos/manejo-integrado-de-plagas-enfoque-de-responsabilidad-en-la-produccion#:~:text=Existen%20una%20serie%20de%20herramientas,de%20impacto%20en%20el%20agroecosistema>.
- Rodríguez, M. G., Hernández, D. O. y Gómez, L. (2012). Nematodos entomopatógenos; elementos del desarrollo y retos para su consolidación como biorreguladores en la agricultura en Cuba. *Rev. Protección Veg.*, 27(3), 137-146.
- Rodríguez, F. O. y Jiménez, M. E. (2019). *Órdenes de insectos de importancia agrícola en nicaragua. Identificación y Diagnóstico* (1ra ed.). Universidad Nacional Agraria. Nicaragua.
- Romero, R. F. (2004). *Manejo Integrado de Plagas. Las bases, los conceptos, su mercantilización*. Universidad Autónoma de Chapingo. Chapingo, México.
- Rossini, C. y A. González. (2010). Ecología Química: Alomonas, feromonas y kariomonas. *Uruguay Ciencia*, (10), 26-27.
- Salas, J. (1993). Manejo Integrado de Plagas: Una alternativa ante la Problemática del uso Creciente e Irracional de Plaguicidas. En *VI Curso de Manejo Integrado de Plagas. FONALAP*. Centro de Investigaciones Agropecuarias del estado de Mangas.
- SAGARPA- FAO. (2014). *Diagnóstico del Sector Rural y Pesquero de México, 2012*. <https://www.agricultura.gob.mx/sites/default/files/sagarpa/document/2019/01/28/1608/01022019-1-diagnostico-del-sector-rural-y-pesquero.pdf>
- SENASICA (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2020). *Mosca del Mediterráneo*. <https://www.gob.mx/senasica/documentos/mosca-del-mediterraneo-110879>
- SADER (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural). (2020). *Cultivos perennes, riqueza en nuestro campo*. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cultivos-perennes-riqueza-en-nuestro-campo> (Último acceso 01/06/2021).
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2019). *Cultivos perennes, riquezas en nuestro campo*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural | Gobierno | gob.mx (www.gob.mx)
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2022). *Panorama Agroalimentario 2022*. https://nube.siap.gob.mx/gobmx_publicaciones_siap/pag/2022/Panorama-Agroalimentario-2022 (Último acceso 02/03/2024).
- Stenberg, J. A. (2017). A Conceptual Framework for Integrated Pest Management. *Trends in Plant Science*, 22(9), 759-769.
- Soto, M. M. (2021). *La agricultura: El motor de la economía*. Tecnológico de Monterrey. TecScience. (Último acceso 01/06/2021).

- Van Driesche T. G. y Bellows, T. D. (1996). Biology and dynamics of pathogen. En: *Biological Control* (pp. 337-352). International Thomson Publishing. New York.
- Van Driesche, R. G., Hoddle, M. S., Center, T. D., Ruíz, C. E., Coronada, B. J., Manuel, A. J. (2007). *Control de plagas y malezas por enemigos naturales*. Washington. U. S. D. A.
- Vázquez, L. (1993). El control Físico y el Manejo Integrado de Insectos. En: *VI Curso de Manejo Integrado de Plagas*. FONAIAP. Centro de Investigaciones Agropecuarias del Estado Monagas, Venezuela.
- Vázquez, N. J. M. y García, G. C. (2001). Manejo Integrado de Plagas Insectiles. En García G. C. y Medrano R. H. (eds.), *estrategias para el control de Plagas y Hortalizas. Estudios de identificación y control*. IPND y ITD. Durango.
- VIFINEX. (2001). *Manual Técnico, Manejo Integrado de Plagas. Proyecto regional fortalecimiento de la vigilancia fitosanitaria en cultivos de exportación no tradicional, República de China - OIRSA*. Universidad del Salvador Facultad de Ciencias Agronómicas, Unidad de Posgrado. El Salvador.
- Zambrano, O. (2020). *Control Biológico*. <https://agrotendencia.tv/agropedia/control-biologico/> (06/08/2021).

Capítulo IV

Potencial biotecnológico de las especies endémicas vegetales en la protección de cultivos¹

Francisco Reyes Zepeda²
Venancio Vanoye Eligio²

Resumen

El crecimiento poblacional de las últimas décadas ha provocado que se desarrollen e implementen diversas estrategias que tienen como finalidad aumentar la producción de alimentos a diferentes niveles y así lograr una seguridad alimentaria sostenible. La biotecnología vegetal, como herramienta, ha contribuido en la identificación y obtención de compuestos químicos de diversas especies vegetales para la producción de nuevos productos contra plagas y enfermedades. Las especies de plantas endémicas, debido a su historia evolutiva y adaptación a diferentes microambientes, tienen potencial biotecnológico como materia prima para elaborar nuevos compuestos químicos empleados en productos relacionados con el combate de plagas, enfermedades y protección de cultivos. Se realizó una búsqueda en la base de datos del Web of Science para el periodo de 1980 al 2022 y se encontró un total de 1 014 productos académicos que usan especies endémicas principalmente para estudios antimicrobianos y la elaboración insecticidas, pesticidas, herbicidas, fungicidas, acaricidas, fumigantes y nematocidas. Turquía y Estados Unidos son los países que tienen mayor número de artículos publicados, seguidos de Irán, Brasil, India, Francia, Italia, Serbia, Marruecos y México. En México se identifican estudios en 38 especies vegetales endémicas y, considerando que actualmente se tiene una estimación de 11 681 especies endémicas, se pone de

¹ Citar este capítulo como: Reyes-Zepeda, F. y Vanoye-Eligio, V. 2024. Potencial biotecnológico de las especies endémicas vegetales en la protección de cultivos. En *Perspectivas multidisciplinarias para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas*. UAT, México, pp. 107-132.

² Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Cd. Victoria, Tamaulipas, México. Autor para correspondencia: freyes@docentes.uat.edu.mx

manifiesto su potencial como fuente de obtención de compuestos y extractos para la protección de cultivos en el país.

Introducción

Entre los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas se encuentra la disminución del hambre de 690 millones de personas que la padecen y al mismo tiempo, satisfacer las necesidades alimenticias de la población mundial estimada en 7 800 millones de habitantes (FAO, 2020). Desde hace décadas se han desarrollado e implementando estrategias para aumentar la producción de alimentos a diferentes niveles con la finalidad de lograr una seguridad alimentaria de manera sostenible. La biotecnología vegetal permite diseñar productos y producciones más resistentes, de mayor calidad, más rentables, e incluso con propiedades beneficiosas sobre la salud del consumidor. También, permite minimizar la carga química, reutilizar y eliminar residuos, y realizar controles sanitarios más eficientes, es decir, avanzar hacia la sostenibilidad (Llorca, 2009). La biotecnología vegetal permite dibujar un nuevo horizonte en los actuales campos de producción, desde cultivar nuevas especies comestibles hasta cosechar productos no alimentarios, como fármacos, enzimas industriales o precursores energéticos.

- Dentro de los principales objetivos de la aplicación de la biotecnología en el sector agrícola se pueden resumir en los siguientes:
- Incremento de la calidad de los productos y las producciones, incluida la orientación de dicha producción (alimentos) hacia la prevención y tratamiento de enfermedades.
- Incremento de la productividad y resistencia de las especies, variedades y razas, dotado de una mayor capacidad competitiva a las exportaciones agrícolas.
- Implantación de criterios de sostenibilidad en la gestión de las explotaciones, limitando el consumo de insumos y el impacto sobre el medio ambiente e incrementando la sanidad de las explotaciones.
- Mejoras sobre el control sanitario, con el objetivo de dar respuestas rápidas y eficaces a las crisis alimentarias.
- Desarrollo de nuevas variedades comestibles, para incrementar la producción actual de alimentos, satisfaciendo así una demanda constante del consumidor de nuevos productos.

A partir de las múltiples aplicaciones de la biotecnología, una de las áreas con mayor potencial es producir nuevos productos contra plagas y enfermedades, identificando

y obteniendo compuestos químicos de diversas especies de plantas. Pavela (2016), señala que, gracias a las investigaciones sobre la elaboración de insecticidas botánicos, se han podido identificar metabolitos secundarios con diferentes modos de acción en contra de organismos plaga de cultivos agrícolas a lo largo de varias décadas, resaltando la importancia que pueden tener ciertas especies de plantas en la producción de productos comerciales (Tabla 11). También hace hincapié en que existen otras especies vegetales que son usadas en la elaboración de productos artesanales para la protección de cultivos locales por parte de los propios agricultores, quienes han transmitido el conocimiento a través de las generaciones. En la mayoría de los casos se han usado especies de plantas que pueden garantizar la materia prima para elaborar los productos, es decir, que se pueden cultivar o que se encuentran distribuidas en varios puntos geográficos y preferentemente de fácil acceso.

En el mundo se conocen alrededor de 272 655 especies vegetales distribuidas en diferentes tipos de ecosistemas (CONABIO, 2008). Sin embargo, a la fecha no se tiene la certeza de la cantidad de plantas que son evaluadas y usadas para la elaboración de productos relacionados con el combate de plagas, enfermedades y protección de cultivos, pero se tiene un estimado de 2 500 especies (Golob et al., 1999). Se puede seguir contabilizando los estudios científicos y etnobotánicos que recientemente se han publicado y siguen descubriendo nuevas sustancias para la protección de cultivos prometedoras de las floras locales.

Tabla 11

Ejemplos de especies vegetales usadas con fines de protección de cultivos

Especies (Familia)	Compuestos activos	Modo de acción
<i>Allium sativum</i> L. (Liliaceae)	Compuestos de azufre: trisulfuro de dialilo, disulfuro de dialilo, trisulfuro de metilo alilo	El ajo tiene un modo de acción no tóxico para repeler aves e insectos.
<i>Annona squamosa</i> L. (Annonaceae)	Squamocin (annonin), aceite de annona deseterizado	Los estudios sobre el modo de acción revelaron que la dunniona exhibe actividad insecticida y fungicida al inhibir el complejo mitocondrial III.
<i>Azadirachta indica</i> Juss. (Meleaceae)	Azadiractina, salanin, nimbin	La azadiractina inhibe significativamente la actividad de AChE en insectos. AChE-EC es una enzima clave responsable de terminar el impulso nervioso catalizando la hidrólisis de neurotransmisores en el sistema nervioso.

Especies (Familia)	Compuestos activos	Modo de acción
		Recientemente, la azadiractina se clasificó como un antimitótico (fase G2 / M de división celular) e insecticida.
<i>Capsicum annuum</i> L. (Solanaceae)	Protoalcaloides p.ej. capsaicina	En los insectos, la capsaicina causa alteraciones metabólicas, daño de la membrana y falla del sistema nervioso. También tiene acción repelente física.
<i>Citrus x sinensis</i> (L.) Osbeck (Rutaceae)	Limoneno y linalol	El modo de acción neurotóxico; los síntomas más prominentes son hiperactividad seguida de hiperexcitación que conduce a un rápido derribo e inmovilización. Para el linalol se identificó como un inhibidor de la acetilcolinesterasa.
<i>Chrysanthemum cinerariaefolium</i> (Trevir.) Vis. (Asteraceae)	Piretrinas (cinerinas; jamolinas y piretrinas)	Las piretrinas ejercen sus efectos tóxicos al interrumpir el proceso de intercambio de iones de sodio y potasio en las fibras nerviosas de los insectos e interrumpir la transmisión normal de los impulsos nerviosos. Los insecticidas de piretrinas son de acción extremadamente rápida y causan una parálisis inmediata de "caída" en insectos.
<i>Lonchocarpus</i> spp., <i>Derris</i> spp. (Fabaceae)	Rotenona	La rotenona actúa como inhibidor de la respiración celular (inhibidor del transporte de electrones del complejo mitocondrial), provocando un rápido cese de la alimentación. La muerte ocurre de varias horas a unos días después de la exposición.
<i>Nicotiana tabacum</i> L. (Solanaceae)	Nicotina	Compite con la acetilcolina, el neurotransmisor principal, al unirse a los receptores de acetilcolina en las sinapsis nerviosas y provocar una descarga nerviosa incontrolada. Esta interrupción de la actividad normal del impulso nervioso da como resultado una falla rápida de los sistemas corporales que dependen de la información nerviosa para su correcto funcionamiento.

Especies (Familia)	Compuestos activos	Modo de acción
<i>Pongamia pinnata</i> (L.) Pierre (Fabaceae)	Karanjin, aceite de karanjin desamargado	El aceite de Pongam son mezclas complejas de materiales biológicamente activos, y es difícil precisar los modos de acción exactos de varios extractos o preparaciones. En los insectos es más activo como disuasivo de la alimentación, pero en diversas formas también sirve como repelente, regulador del crecimiento, supresor de la ovoposición (deposición de huevos) o esterilizante.
<i>Schoenocaulon officinale</i> A. Gray (Melanthiaceae)	Cevadina y veratridina	En los insectos, los alcaloides tóxicos de la sabadilla afectan la acción de la membrana de las células nerviosas, provocando la pérdida de la acción de la membrana de las células nerviosas, provocando la pérdida de la función nerviosa, parálisis y muerte.

Fuente: tomado de Pavela (2016).

Características de las especies endémicas

Una especie endémica es la que está geográficamente restringida en un lugar específico en el mundo. El concepto de endemismo surge a partir de la teoría biogeográfica del siglo XIX, siendo la geografía, la principal inferencia acerca de cuál es el área con mayor probabilidad de que una determinada especie esté presente (Espinosa et al., 2001). Por ello, para diferenciar una especie común (que se encuentra en muchos lugares) de una especie endémica (que se encuentra en pocos lugares), solamente se toma en cuenta las localidades donde se han registrado, caracterizadas en términos de su tamaño, ubicación geográfica y continuidad (Espinosa y Llorente, 1993); dejando de lado otros atributos del hábitat que también son importantes en el establecimiento y permanencia de las especies. Al respecto, Rabinowitz (1981) hace una clasificación para evaluar las especies comunes y endémicas, ya que considera que pueden existir siete tipos de rareza en función de asociarlas con tres características: 1) el tamaño de su rango de distribución geográfico (grande o pequeño), 2) el nivel de la especificidad del hábitat (amplio o restringido) y 3) la abundancia poblacional local (alta o baja) (Tabla 2).

Tabla 12*Clasificación de los siete tipos de rareza*

Rango geográfico		Grande		Pequeño	
Especificidad del hábitat		Amplio	Restringido	Amplio	Restringido
Tamaño de la población local.	Grande, dominante en alguna parte.	Especies Comunes.	Localmente abundante en un amplio rango en un hábitat.	Localmente abundante en varios hábitats, pero restringido geográficamente.	Localmente abundante en un hábitat específico pero restringido geográficamente.
	Pequeña, no dominante.	Constantemente escaso en un amplio rango y en varios hábitats.	Constantemente escaso en un específico hábitat, pero en un amplio rango.	Constantemente escaso y geográficamente restringido en varios hábitats.	Constantemente escaso y geográficamente restringido en un hábitat específico.

Fuente: Tomado de Rabinowitz (1981).

La información disponible hasta ahora sobre especies endémicas y/o raras permite tener un panorama general de su comportamiento en la naturaleza. Los análisis demográficos sugieren que ni en las especies endémicas, ni en las comunes existen patrones en las tasas de crecimiento poblacional o en los parámetros demográficos (e.g., crecimiento, supervivencia y fecundidad) (Esparza-Olguín, 2004). No obstante, la forma biológica y los mecanismos de reproducción y dispersión pueden determinar que se den comportamientos demográficos similares (Silvertown et al., 1993). Una característica en común que presentan las especies endémicas en ambientes extremos es la vulnerabilidad de las etapas tempranas del ciclo de vida, debido a que el reclutamiento de nuevos individuos a partir de semillas es poco frecuente y que una vez establecidas como plántulas, su tasa de mortalidad puede ser alta, por lo que la abundancia poblacional tiende a fluctuar a través del tiempo (Herrera y García, 2010). Sin embargo, este fenómeno también se ha reportado en varias especies comunes de amplia distribución (Jacquemyn et al., 2012). Respecto a las tasas de crecimiento poblacional, por lo general cuando las especies habitan en ambientes heterogéneos, la mayoría de ellas reflejan poblaciones cercanas al equilibrio ($l = 1$), aunque sus valores pueden oscilar espacio-temporalmente. Por otra parte, cuando se comparan aspectos demográficos de especies endémicas y comunes filogenéticamente cercanas, se ha encontrado que sus estrategias demográficas pueden variar dependiendo el hábitat donde se desarrollen debido a las diferencias micro-ambientales que existen de un lugar a otro (Munzbergova, 2005). Desde la perspectiva de la interacción planta-herbívoro, se ha encontrado una tasa promedio

de herbivoría del 10.8 % y que su impacto depende de muchos factores, como el costo de construcción de la hoja, las tasas de crecimiento y reemplazo y la vida útil de la hoja, pero no por la condición de que si son especies comunes o endémicas (Lim et al. 20)

Al igual que las especies comunes, las especies de plantas endémicas han desarrollado una amplia gama de defensas físicas y químicas contra una variedad de insectos, lo que les ha permitido evolucionar y adaptarse a los diferentes microambientes donde se desarrollan (Moreira et al., 2020); lo que les permite también ser consideradas en estudios que busquen nuevos compuestos químicos que permitan la elaboración de productos relacionados con el combate de plagas, enfermedades y protección de cultivos.

Estudios biotecnológicos con especies endémicas a nivel mundial

Con la finalidad de estimar el número de estudios relacionados con la protección de cultivos empleando extractos derivados de especies endémicas, se realizó una revisión especializada utilizando la base de datos de la colección principal de Web of Science (<https://www.webofscience.com>) que es un índice selectivo de citas de publicaciones científicas y académicas que abarca revistas, actas, libros y compilaciones de datos de alrededor de 34 000 revistas en la actualidad (Birkle et al., 2019). Para ello, se hizo una búsqueda con una combinación de ocho palabras clave en inglés y el término de especie endémica, quedando de la siguiente manera: “acaricidal and endemic plant”, “antimicrobial and endemic plant”, “fungicide and endemic plant”, “fumigant and endemic plant”, “ herbicide and endemic plant”, “insecticide and endemic plant”, “ nematocide and endemic plant” y “pesticide and endemic plant” dentro del periodo de 1980 al 31 de marzo del 2022. Por cada búsqueda se consideró el número de productos publicados por año, así como las diez principales categorías de investigación que agrupa el mismo Web of Science, y finalmente se consideraron los principales países que están publicando en estas áreas.

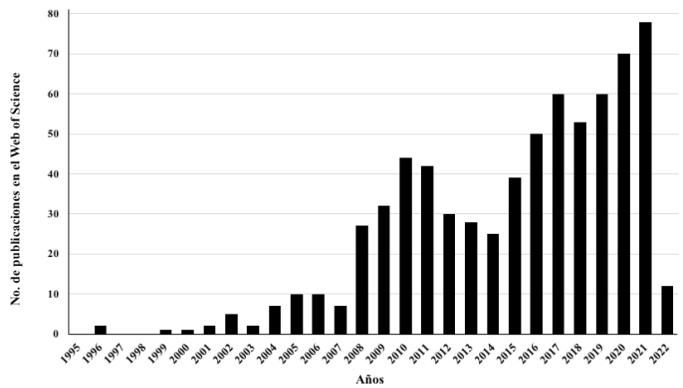
Se encontraron un total de 1 014 productos académicos, de los cuales el 98 % corresponden a artículos científicos y el 2 % restante son libros, capítulos de libros y actas. La principal categoría de publicación corresponde al área antimicrobiana con 697 artículos. Se observa que de 1980 a 1995 no se había publicado ningún artículo y es en 1996 cuando se logra publicar el primero. A partir del 2008 se empieza a tener un crecimiento constante en el número de publicaciones, siendo el año de 2021 el más productivo al alcanzar 78 publicaciones (Figura 1).

La segunda categoría de publicación corresponde al área de insecticidas con 109 artículos, seguida del área de pesticidas (79 artículos), herbicidas (61 artículos), fungicidas (52 artículos), acaricidas (11 artículos), fumigantes (5 artículos)

y por último el área de nematocida con 2 artículos. En la Figura 2 se puede observar que a partir de 1991 empieza la publicación en estas áreas y es a partir del año 2000 cuando solamente en cuatro categorías de investigación tienden a incrementar su publicación de artículos.

Figura 1

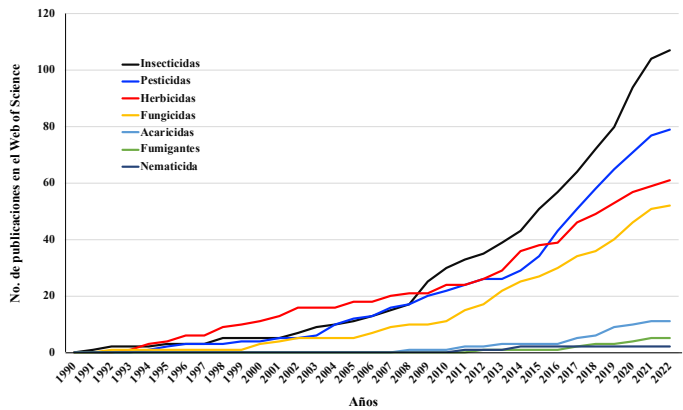
Publicaciones de estudios antimicrobianos con especies endémicas publicados en la base de datos del Web of Science durante el periodo de 1995 a 2022



Fuente: elaboración propia.

Figura 2

Publicaciones de estudios de protección de cultivos usando extractos de especies endémicas publicados en la base de datos del Web of Science durante el periodo de 1990 a 2022



Fuente: elaboración propia.

Al analizar las principales áreas de investigación por cada categoría de búsqueda realizada, se observa que en el área de ciencias de las plantas se enmarcan 236 artículos, lo que representa un 23.3% de la producción global. No obstante, en cada categoría varían las áreas de investigación (Tabla 13).

Para el caso de las categorías antimicrobiana, fungicidas y herbicidas, la principal área de investigación está relacionada con las ciencias de las plantas. En las categorías de insecticidas y pesticidas, la principal área de investigación está relacionada con la entomología. En la categoría de acaricidas, la principal área de investigación está relacionada a la parasitología. Mientras que, en las categorías de fumigantes y nematocida no hay un área de investigación dominante, ya que en todas las áreas se cuenta con un solo artículo publicado (Tabla 13).

Tabla 13

Principales áreas de investigación reportadas en estudios de protección de cultivos usando especies endémicas publicadas en la base de datos del Web of Science durante el periodo de 1990 a 2022. Entre paréntesis está el número de artículos

No.	Categoría Acaricida	Categoría Antimicrobiana	Categoría Fungicida	Categoría Fumigantes
1	Parasitología (4)	Ciencias de las plantas (176)	Ciencias de las plantas (23)	Ingeniería agrícola (1)
2	Ciencias de las plantas (3)	Farmacología (159)	Agronomía (18)	Agronomía (1)
3	Ciencias veterinarias (3)	Medicina química (143)	Agricultura multidisciplinaria (3)	Medicina química (1)
4	Ingeniería agrícola (1)	Tecnología de la ciencia de los alimentos (98)	Microbiología aplicada a la biotecnología (3)	Ciencias ambientales (1)
5	Agricultura multidisciplinaria (1)	Bioquímica y biología molecular (71)	Entomología (3)	Tecnología de la ciencia de los alimentos (1)
6	Agronomía (1)	Química aplicada (66)	Tecnología de la ciencia de los alimentos (3)	Ciencias de las plantas (1)
7	Biología (1)	Medicina integrativa complementaria (63)	Microbiología (3)	Zoología (1)
8	Dermatología (1)	Química multidisciplinaria (54)	Ingeniería agrícola (2)	
9	Medicina integrativa complementaria (1)	Microbiología (41)	Biología (2)	
10	Farmacología (1)	Microbiología aplicada a la biotecnología (32)	Química aplicada (2)	
No.	Categoría Herbicida	Categoría Insecticida	Categoría Nematocida	Categoría Pesticida
1	Ciencias de las plantas (14)	Entomología (36)	Ciencias ambientales (1)	Entomología (18)
2	Agronomía (13)	Parasitología (14)	Microbiología (1)	Agricultura (13)

3	Ecología (11)	Agronomía (12)	Ecología y ciencias ambientales (13)
4	Ciencias ambientales (7)	Ciencias de las plantas (11)	Ciencias de las plantas (8)
5	Forestal (6)	Medicina tropical (11)	Química (7)
6	Agricultura multidisciplinaria (5)	Bioquímica y biología molecular (8)	Bioquímica y biología molecular (5)
7	Bioquímica y biología molecular (5)	Ciencias ambientales (8)	Conservación biológica (5)
8	Ciencias multidisciplinarias (4)	Enfermedades infecciosas (7)	Parasitología (5)
9	Ingeniería agrícola (2)	Microbiología aplicada a la biotecnología (5)	Farmacología (4)
10	Conservación biológica (2)	Química multidisciplinaria (5)	Salud ocupacional ambiental pública (4)

Fuente: elaboración propia.

Al analizar esta productividad que se genera por país, Turquía y Estados Unidos son los que tienen mayor número de artículos publicados con especies endémicas (180 y 164, respectivamente), seguido de Irán (69), Brasil (63), India (60), Francia (57), Italia (49), Serbia (34), Marruecos (33) y México (30). Estos diez países poseen el 73 % de la producción global, de acuerdo con esta revisión. Para el caso de la categoría de investigación antimicrobiana, los tres países con más artículos son Turquía (179), Irán (69) e India (44). Para la categoría de insecticidas, los tres países con más artículos son Estados Unidos (31), Brasil (12) e India (10). Para pesticidas, los tres países con más artículos son Estados Unidos (23), China (8) y Francia (7). Para herbicidas, los tres países con más artículos son Estados Unidos (32), Ecuador (5) y Australia (4). Para fungicidas, los tres países con más artículos son Estados Unidos (15), Australia (6) y Brasil (6). Para acaricidas, los tres países con más artículos son Brasil (4), Francia (2) y Nueva Caledonia (2). Para fumigantes, hay seis países con solo un artículo cada uno (Brasil, Estados Unidos, Grecia, Italia, Marruecos y Turquía). Finalmente, para nematocidas solo hay cinco países con solo un artículo cada uno (Bangladesh, Costa Rica, Holanda, Malasia y Suiza).

Estudios biotecnológicos con especies endémicas en México

La búsqueda sistemática realizada en la base de datos Web of Science arroja un total 30 publicaciones relacionadas con la protección de cultivos usando especies endémicas, las cuales se han enfocado en cinco líneas de investigación: antimicrobial (18 artículos), fungicida (4 artículos), pesticidas (3 artículos), acaricida (3 artículos) e insecticidas (2 artículos). Para poder identificar las especies endémicas reportadas

en las publicaciones, se revisó el resumen de cada artículo y se leyó el texto completo cuando fue necesario.

Se encontraron 38 especies vegetales reportadas, 20 arbustos, 11 hierbas y 7 árboles. Se contabilizaron 17 familias, siendo la Asteraceae y la Fabaceae las que tienen mayor cantidad de especies estudiadas (11 y 6 especies respectivamente). Al analizar el grado de endemismo desde el punto de vista geográfico, se encontró que 24 especies son endémicas de México, 7 especies son endémicas de Centro y Sur américa, 5 especies de México y sur de Estados Unidos y solo 2 de América central (Tabla 14).

Tabla 14

Especies endémicas de México reportadas en estudios de protección de cultivos publicados en la base de datos del Web of Science durante el periodo de 1990 a 2022

No.	Familia	Especie	Forma de vida	Distribución	Referencias electrónicas
1	Amaranthaceae	<i>Dysphania graveolens</i> (Willd.) Mosyakin & Clemants	Herbácea	Endémica de Centro y Sur América	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
2	Anacardiaceae	<i>Cyrtocarpa procera</i> Kunth	Árbol	Endémica de México	https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.07.001
3	Annonaceae	<i>Annona macrophyllata</i> Donn. Sm.	Árbol	Endémica de América Central	https://doi.org/10.1590/1678-9199-JVAITTD-2020-0023
4	Arecaceae	<i>Chamaedorea radicalis</i> Mart.	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.3958/059.045.0115 https://doi.org/10.1080/01647954.2020.1802511
5	Asteraceae	<i>Flourensia cernua</i> DC.	Arbusto	Endémica de México y sur de Estados Unidos	https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.12.008
6	Asteraceae	<i>Porophyllum linaria</i> (Cav.) DC.	Herbácea	Endémica de México	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.058
7	Asteraceae	<i>Trixis angustifolia</i> DC.	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.1080/14786419.2017.1416381
8	Asteraceae	<i>Ageratina jocospecana</i> B.L. Turner	Herbácea	Endémica de México	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
9	Asteraceae	<i>Chrysactinia mexicana</i> A.Gray	Herbácea	Endémica de México y sur de Estados Unidos	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
10	Asteraceae	<i>Eupatorium glabratum</i> Kunth	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
10	Asteraceae	<i>Hofmeisteria schaffneri</i> (A.Gray) R.King & H.Rob.	Herbácea	Endémica de México	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
12	Asteraceae	<i>Porophyllum linaria</i> (Cav.) DC.	Herbácea	Endémica de México	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
13	Asteraceae	<i>Salmea scandens</i> (L.) DC.	Arbusto	Endémica de Cento y Sur América	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044

No.	Familia	Especie	Forma de vida	Distribución	Referencias electrónicas
14	Asteraceae	<i>Tagetes coronopifolia</i> Wild	Herbácea	Endémica de México	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
15	Asteraceae	<i>Tagetes filifolia</i> Lag.	Herbácea	Endémica de Cento y Sur América	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
16	Burseraceae	<i>Bursera graveolens</i> (Kunth) Triana & Planch.	Árbol	Endémica de Cento y Sur América	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
17	Cordiaceae	<i>Cordia curassavica</i> Jacq.	Arbusto	Endémica de Cento y Sur América	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
18	Euphorbiaceae	<i>Jatropha neopauciflora</i> Pax	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.21010/ajtcam.v14i1.5 , https://doi.org/10.1016/j.jep.2017.04.003 , https://doi.org/10.1177/2515690X20986762
19	Fabaceae	<i>Tephrosia abbottiae</i> C.E. Wood	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.1006/pest.2000.2522
20	Fabaceae	<i>Tephrosia crassifolia</i> Benth.	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.1006/pest.2000.2522
21	Fabaceae	<i>Tephrosia leiocarpa</i> A. Gray	Arbusto	Endémica de México y sur de Estados Unidos	https://doi.org/10.1006/pest.2000.2522
22	Fabaceae	<i>Tephrosia madrensis</i> Seem.	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.1006/pest.2000.2522
23	Fabaceae	<i>Tephrosia tepicana</i> (Standl.) Standl.	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.1006/pest.2000.2522
24	Fabaceae	<i>Tephrosia viridiflora</i> O. Tellez	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.1006/pest.2000.2522
25	Labiatae	<i>Hesperozygis marifolia</i> (S.Schauer) Epling	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
26	Lamiacea	<i>Salvia ballotiflora</i> Benth.	Herbácea	Endémica de México y sur de Estados Unidos	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
27	Lamiaceae	<i>Agastache mexicana</i> subsp. <i>xolocotziana</i> Bye, Linares & Ramamoorthy	Herbácea	Endémica de México	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.058 , https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
28	Lamiaceae	<i>Clinopodium macrostemonum</i> (Moc. & Sessé ex Benth.) Kuntze	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
29	Lamiaceae	<i>Poliomntha longiflora</i> A.Gray	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
30	Leguminosae	<i>Acaciella angustissima</i> var. <i>texensis</i> (Torr. & A.Gray) L.Rico	Arbusto	Endémica de México y sur de Estados Unidos	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.03.040
31	Magnoliaceae	<i>Magnolia dealbata</i> Zucc.	Árbol	Endémica de México	https://doi.org/10.1080/03601234.2013.774933
32	Magnoliaceae	<i>Magnolia tamaulipana</i> Vázquez	Árbol	Endémica de México	https://doi.org/10.17221/13/2020-PPS , https://doi.org/10.1080/01647954.2019.1702097

No.	Familia	Especie	Forma de vida	Distribución	Referencias electrónicas
33	Magnoliaceae	<i>Magnolia vovidesii</i> Zucc.	Árbol	Endémica de México	https://doi.org/https://doi.org/10.1177/1934578X1801300502
34	Primulaceae	<i>Ardisia standleyana</i> P.H.Allen in Allen	Árbol	Endémica de Centro y Sur América	https://doi.org/10.15258/sst.2008.36.3.08
35	Rosaceae	<i>Rubus liebmannii</i> Focke	Arbusto	Endémica de América Central	https://doi.org/10.1155/2012/503031
36	Scrophulariaceae	<i>Buddleja perfoliata</i> Kunth	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044
37	Verbenaceae	<i>Lippia berlandieri</i> Schauer	Arbusto	Endémica de México	https://doi.org/10.1080/0972060X.2015.1116413
38	Verbenaceae	<i>Lippia graveolens</i> Kunth	Herbácea	Endémica de Centro y Sur América	https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.11.044

Fuente: elaboración propia.

La identificación de estas endémicas es importante desde el punto de vista ecológico y comercial, ya que siempre existe la idea errónea de que las endémicas solo se deben conservar por su limitada distribución geográfica. Si se considera que existen alrededor de 11 681 especies endémicas en México (CONABIO, 2008), entonces las 24 especies endémicas encontradas en esta búsqueda para México poseen potencial como fuentes de obtención de compuestos y extractos para la protección de cultivos en el país.

No obstante, Pavela (2016) plantea que para lograr que una especie vegetal sea considerada en la cadena de producción y comercialización de productos fitosanitarios, se deben considerar diversos aspectos que garanticen la constante obtención de materia prima ya sea a partir de plantaciones naturales o comerciales, así como considerar los marcos legales y apoyos gubernamentales, entre otros.

En este sentido, se hizo una selección de seis de las 24 de las especies endémicas de México reportadas en este trabajo y se sometieron a los cuestionamientos de Pavela (2016) para saber si son especies candidatas de ser usadas como fuentes de materia prima. Para completar la información, se hizo una nueva búsqueda de información a través de las plataformas del Web of Science (www.webofscience.com) y de la Red de revistas científicas de Acceso Abierto no comercial propiedad de la academia (www.redalyc.org/) en donde se colocó el nombre científico de las especies de forma separada. A continuación, se presenta la información encontrada de cada una.

Familia Arecaeae

Chamaedorea radicalis Mart.

Descripción y distribución: es una palma de hasta 1.5 m de altura, con tallos solitarios, erectos de 2.5-3 cm de diámetro. Produce de 4-8 hojas, erectas, pinnadas; con vaina de 15-25 cm de largo, gruesa y correosa y fibrosa, de color verde claro, al secarse dura y resistente, oblicua y tubular solo en la mitad de la parte baja. Las inflorescencias son interfoliarias, erectas, pedunculadas. Frutas de 12 x 9 mm, elipsoides a obovoides-globosas, de color verde amarillo y luego cambian a naranja y finalmente roja cuando está completamente madura. Habita en selvas altas, medianas, perennifolias, subperennifolias y en bosques mesófilos de los estados de Hidalgo, Nuevo León, San Luis Potosí y Tamaulipas (Quero, 2004). Sus poblaciones se desarrollan en el sotobosque y requieren de sombra para prosperar (Endress et al., 2006). Considerando los criterios de rareza propuestos por Rabinowitz (1981), *C. radicalis* presenta un rango geográfico amplio, con una amplia especificidad de hábitat y con tamaños poblacionales pequeños no dominantes.

Potencial biotecnológico: se han logrado identificar 26 compuestos químicos, como alcaloides, fenólicos y saponinas en los extractos del pericarpio de los frutos (Tabla 15), que pueden tener diferentes aplicaciones para la elaboración de extractos para la protección de cultivos (Montelongo-Ruíz et al. 2020a). Un estudio encontró que los extractos de los frutos son una fuente de inhibidores de proteasa que se dirigen a las enzimas intestinales de dos ortópteros plaga evaluados (*Schistocerca piceifrons piceifrons* Walker y *Pterophylla beltrani* Bolivar y Bolivar) y que podrían considerarse candidatos fuertes en estudios futuros para la identificación y caracterización de los inhibidores y su uso potencial en el control biológico (Montelongo-Ruíz et al., 2020b). También se han evaluado extractos de *C. radicalis* a diferentes concentraciones en el ácaro *Tetranychus merganser* Boudreaux, donde el resultado no logró causar mortalidad en etapas adultas, pero sí tuvo efectos significativos sobre la puesta de huevos, la ingesta de alimentos y los parámetros demográficos de las hembras; por lo que estos efectos requieren más estudios, ya que pueden tener implicaciones considerables para los enemigos naturales (Montelongo-Ruíz et al., 2020c).

Tabla 15

Compuestos químicos encontrados en extractos del pericarpio de frutos de C. radicalis. Tomado de Montelongo-Ruíz et al. (2020a)

No.	Compuestos		
	Alcaloides	Fenólicos	Saponinas
1	23- Acetil Soladulcidina	2'-Hidroxigenisteina 7-(6"- malonilglucosida)	Licoricesaponina E2
2	Abrina (L)	2',4'-Dihidroxi-4,6'-dimetildihidrochalcona	Polipodosaponina
3	Aniflorina	3-O- Acido Feruloilquinico	Torvosida D
4	Etamifilina	Afzelina	Torvosida J
5	Homoarecolina	Carpelastofurano	
6		Castavinol	
7		Davalliosida A	
8		Isoswertisina 2"-O-beta-arabinosido	
9		Kaempferol 3-glucosido	
10		Kaempferol 3-(6-Gmalonil neohesperidosida)	
11		Kaempferol 3- neohesperidosida	
12		Kaempferol 4'-glucosido	
13		Kaempferol 7-galactosido	
14		Ramnetina 3- galactosido -3'-ramnosido	
15		Ramnocitrina 3- rutinosido	
16		Scutellareina	
17		Ácido trans clorogénico	

Fuente: elaboración propia.

Factores para considerar: no se encuentra protegida por la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Diario Oficial de la Federación, 2010), ni en alguna categoría en la lista roja de la IUCN. Se cuenta con estudios de su biología reproductiva, efectos de la cosecha y producción de hojas, germinación de semillas, identificación de plagas y enfermedades potenciales y niveles de herbívora (Caballero-Rico et al., 2020). A nivel social, algunas comunidades de los municipios de Gómez Farías, Güémez, Hidalgo, Jaumave, Llera, El Mante, Ocampo y Victoria, del estado de Tamaulipas, han aprovechado y comercializado las hojas y semillas desde la década de los cuarenta (Gorchov y Endress, 2005); aunado a ello, existe la Asociación de Palmilleros del

Sur de Tamaulipas que con apoyos gubernamentales de la Comisión Nacional Forestal y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales han desarrollado planes y programas de manejo para la “palma camedor” en plantaciones forestales, lo que ha permitido exportar hojas a mercados de Estados Unidos, Canadá, Europa y para consumo en territorio mexicano (Ortiz-Cervantes, 2010).

Familia Lamiaceae

Agastache mexicana subsp. *xolocotziana* Bye, Linares & Ramamoorthy

Descripción y distribución: es una hierba perenne aromática de olor mentolado que mide hasta 1.5 m de alto, la forma de las hojas es ovado-lanceolado de 4.6-6.2 cm de largo y de 1.7-3 cm de ancho con margen crenado, ápice atenuado y base redonda, la corola es blanca con tricomas en su labio inferior, las semillas miden aproximadamente de 3-4 mm. Las inflorescencias terminan en ramificaciones de verticilos interrumpidos de cimbras con numerosas flores, las cuales producen néctar que colectan las abejas (Palma-Tenango et al., 2021). Habita en bosques de pino-encino de los estados de Hidalgo, México, Morelos, Puebla y en algunas alcaldías de la Ciudad de México (Santillán-Ramírez et al., 2008). Considerando los criterios de rareza propuestos por Rabinowitz (1981), *A. mexicana* subsp. *xolocotziana* presenta un rango geográfico amplio, con una amplia especificidad de hábitat y con tamaños poblacionales pequeños no dominantes.

Potencial biotecnológico: Juárez et al. (2015) estudiaron la composición química y la actividad antifúngica (MIC) de los aceites esenciales extraídos de *A. mexicana* ssp. *xolocotziana* con el fin de evaluar su eficacia como sustitutos de fungicidas químicos sintéticos. En sus resultados encontraron acetina, estragol, metil eugenol y la tilanina como los componentes principales del aceite esencial, los cuales probaron contra once cepas de hongos aisladas de granos de trigo almacenados, donde lograron tener una potente actividad antifúngica contra el panel de hongos probados, con MIC que varían de 0.3 a 30 $\mu\text{g} / \text{mL}$. Hurtado-Mariles (2016) realizó un análisis del extracto etanólico de flores, hojas y tallo de *A. mexicana* ssp. *xolocotziana*, encontrando la presencia de metabolitos de tipo alcaloides, flavonoides (auronas, chalconas, xantonas y flavonas), cumarinas, sesquiterpenlactonas, azúcares reductores, taninos (ácido gálico), glucósidos cardiacos, glucósidos cianogénicos, quinonas, saponinas (triterpenoides) y esteroides (triterpenos). Al ser una especie aromática, los análisis de aceites esenciales han encontrado alrededor de 38 compuestos, siendo los más abundantes el pulegona (80.07 %) y el metil eugenol (36.41 %) (Palma-Tenango et al., 2021).

Factores a considerar: no se encuentra protegida por la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Diario Oficial de la Federación, 2010), ni en alguna categoría en la lista roja de la IUCN. Se cuentan con estudios agronómicos, antropológicos, biología

reproductiva, epidemiológicos, etnobotánicos, de propagación, farmacológicos y fotoquímicos (Palma-Tenango et al., 2021). Existe un amplio aprovechamiento social como recurso terapéutico y de ornato. No se incluye en planes y programas gubernamentales; sin embargo, en varias comunidades lo cultivan dentro de huertos familiares con fines de comercialización (Santillán-Ramírez et al., 2008).

Familia Magnoliaceae

Magnolia dealbata Zucc.

Descripción y distribución: es un árbol de 25 m de altura con hojas caducas de 60 cm de largo y flores de color crema de 20 cm de largo; los conos miden 9.3 cm de largo x 5.5 cm de ancho y pueden llegar a producir hasta 49.5 semillas por fruto; las semillas miden 1.4 cm de largo y tienen una sarcotesta roja rica en aceites (Vázquez, 1994). Se distribuye en los bosques mesófilos de montaña de los estados de Hidalgo, Oaxaca, Querétaro, San Luis Potosí y Veracruz. Considerando los criterios de rareza propuestos por Rabinowitz (1981), *M. dealbata* presenta un rango geográfico amplio, con una restringida especificidad de hábitat y con tamaños poblacionales pequeños no dominantes.

Potencial biotecnológico: Flores-Estevez et al. (2013) usaron extractos etanólicos de *M. dealbata* y evaluaron la actividad insecticida de hojas, corteza, semillas, sarcotesta y flores contra individuos adultos de la mosca mexicana de la fruta *Anastrepha ludens* Loew. Sus resultados indican que solo el extracto de sarcotesta seca tiene actividad insecticida contra las moscas, ya que el porcentaje de supervivencia e índices de Abbott para *A. luden* expuesto a una concentración de 0.1 mg / mL fue del 3.3 ± 0.8 a los cuatro días de tratamiento, sugiriendo que los metabolitos presentes en la sarcotesta seca son tan potentes como las piretrinas naturales y representan una sustancia potencial para controlar este tipo de plagas.

Factores a considerar: se encuentra protegida por la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Diario Oficial de la Federación, 2010), y en la Lista Roja de la UICN está catalogada como en peligro de extinción bajo la clasificación EN B1ab (i,iii) (Cicuzza et al., 2007). Cuenta con estudios de biología celular y reproductiva, ecología y genética de poblaciones, germinación de semillas, demografía, conservación *in situ* y *ex situ*, análisis químicos, farmacología, etnobiología, etnobotánica y etnoecológico (Sánchez-Velásquez y Pineda-López, 2010; Vázquez-García et al., 2013; Chávez-Cortázar et al., 2021). Los habitantes locales aprovechan por sus propiedades medicinales y se usa en celebraciones religiosas, construcción de viviendas y como combustible. Sin embargo, a nivel gubernamental no es considerada dentro de algún plan o programa de conservación y/o aprovechamiento.

Magnolia tamaulipana Vázquez

Descripción y distribución: es un árbol 20 a 30 m de altura con un diámetro de altura de pecho 40 a 50 cm, florece de abril a junio y las flores son de color crema y miden de 12 a 15 cm de diámetro; los conos son ovoides y miden de 5-9 cm de largo x 2.3-4.5 cm de ancho; las semillas son subcilíndricas a triangular-prismáticas con sarcotesta rojo oscuro y miden de 9-12 mm de largo x 6-8 mm de ancho (Vázquez, 1994). A la fecha, se conocen ocho poblaciones naturales que se ubican dentro de la Reserva de la Biosfera El Cielo, en Tamaulipas. Habitan exclusivamente en el bosque mesófilo de montaña y se estima una abundancia de 12.88 árboles por hectárea (Puig y Bracho, 1987). Considerando los criterios de rareza propuestos por Rabinowitz (1981), *M. tamaulipana* presenta un rango geográfico pequeño, con una restringida especificidad de hábitat y con tamaños poblacionales pequeños no dominantes.

Potencial biotecnológico: Arredondo-Valdés et al. (2020) evaluaron la actividad antibacteriana *in vitro* del extracto etanólico de hojas de *M. tamaulipana*, encontrando inhibición en el crecimiento de bacterias fitopatógenas. La tasa de inhibición del crecimiento osciló entre 8.22 y 100 %. La concentración inhibidora, IC₅₀ (90), requerida para inhibir 50 (90 %) del crecimiento bacteriano *Pseudomonas syringae* pv. *tomate*, *Xanthomonas vesicatoria*, *Clavibacter michiganensis* subsp. *michiganensis* y *Agrobacterium tumefaciens*, fue 34.71 (39.62), 23.09 (441.88), 64.75 (176.73) y 97.72 (535.48) ppm, respectivamente. El mismo estudio detectó la presencia de varios metabolitos secundarios como flavonoides, taninos, esteroides y terpenos, saponinas, carotenoides, carbohidratos, purinas, azúcares reductores libres, almidón soluble y quinonas en las hojas de *M. tamaulipana*. De igual forma, Chacón-Hernández et al. (2019) evaluaron el extracto en polvo de *M. tamaulipana* y sus resultados muestran la inhibición en la oviposición y la ingesta de alimentos de las hembras adultas de *Tetranychus urticae* Koch, donde los efectos aumentaron según la concentración, siendo altamente efectivos entre 0.5 y 1 mg /mL.

Factores para considerar: no se encuentra protegida por la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Diario Oficial de la Federación, 2010), pero la Lista Roja de la UICN si la cataloga como en peligro de extinción bajo la clasificación EN B1ab (i,iii) (Cicuzza et al., 2007). Se han realizado estudios sobre la biología reproductiva, diversidad y estructura genética y valoración socioeconómica (García-Montes et al., 2022). Existe un aprovechamiento social debido al uso etnobotánico para tratar dolencias cardíacas y cólicos menstruales, así como el aprovechamiento de la madera para vigas de construcción y cuestiones ornamentales (Medellín-Morales et al., 2017). A nivel gubernamental, se le incluye dentro del programa de manejo de la Reserva de la Biosfera El Cielo (Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2013).

Magnolia vovidesi Zucc.

Descripción y distribución: es un árbol de 12 a 25 m de altura, con hojas caducas de 55 a 70 cm de largo y flores de color blanco cremoso de 36 cm de largo. Los conos miden 10 y 12 cm de largo y pueden tener hasta 78 semillas cada cono, las semillas son color naranja (Vázquez, 1994). Por sus características morfológicas, varios autores la consideraban como *M. dealbata*, hasta que Vázquez-García et al. (2013) determinaron que se trataba de una nueva especie endémica. A la fecha, se reconocen solo siete poblaciones y se ubican en bosques mesófilos de montaña del centro de Veracruz. En la población de Coyopolan de Ixhuatán de los Reyes, se han contabilizado hasta 180 individuos (Galván-Hernández et al., 2020). Considerando los criterios de rareza propuestos por Rabinowitz (1981), *M. vovidesi* presenta un rango geográfico pequeño, con una estrecha especificidad de hábitat y con tamaños poblacionales pequeños no dominantes.

Potencial biotecnológico: Ramírez-Reyes et al. (2018) a través de un bioensayo de un extracto crudo activo de polifolículos de *M. vovidesi* identificaron los siguientes compuestos: ácido 4-hidroxibenzoico, ácido clorogénico, ácido p-cumárico, ácido protocatecuico, ácido shikímico, ácido vanílico, astragalina, costunolida, escopoletina, escopolina, hesperidina, mexicanina, partenolida, rutina, quercetina y vainillina; los cuales se han reportado con propiedades antibacterianas, antifúngicas y alelopáticas. En el mismo estudio se condujo al aislamiento e identificación de shizukolidol, una lactona sesquiterpenoide de tipo eudesmane que mostró actividad significativa contra la bacteria fitopatogena de importancia económica *Chryseobacterium* sp. (MIC = 400 µg / mL).

Factores para considerar: no se encuentra protegida por la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Diario Oficial de la Federación, 2010), pero la Lista Roja de la UICN sí la cataloga como en peligro de extinción bajo esta clasificación EN B1 ab (iii,v) (Cicuzza et al., 2007). Dentro de los estudios que se han realizado, se encuentran la estructura y dinámica poblacional, germinación de semillas, análisis dendroecológicos, análisis de morfología foliar y su estado de conservación (Galván-Hernández et al., 2020). A nivel social, no hay un aprovechamiento por parte de los habitantes locales; a nivel gubernamental, tampoco es considerada en planes y programas.

Familia Verbenaceae

Lippia berlandieri Shauer

Descripción y distribución: es un arbusto caducifolio de hasta 2 m de alto y con diámetro de cobertura foliar de un metro, es muy ramificado, hojas aromáticas, alternas con lámina oblonga a elíptica u ovado-oblonga de 2-4 cm de largo, el margen finamente

crenado, peciolos de 5-10 mm de largo. Inflorescencia con 2-6 péndulos, en las axilas de las hojas, de 4-12 mm de largo, corola blanca, el tubo estriguloso de 3mm de largo. Frutos pequeños, secos, encerrados en el cáliz. Las semillas son de color café, de forma ovoide y de tamaño menor a 0.5 milímetros (Nash y Nee, 1984; Haidé-Quezada et al., 2011; CONAFOR, 2012). Habita en los matorrales de las zonas semidesérticas de los estados de Baja California Sur, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Nuevo León, Oaxaca, Querétaro, San Luis Potosí, Tamaulipas y Zacatecas. Considerando los criterios de rareza propuestos por Rabinowitz (1981), *L. berlandieri* presenta un rango geográfico amplio, con una amplia especificidad de hábitat y con tamaños poblacionales pequeños no dominantes.

Potencial biotecnológico: los principales compuestos químicos que se han encontrado en la especie son el carvacrol, timol, cimeno, pineno y linalol; los cuales le proporcionan actividad antibacteriana, antioxidante, antiviral, antifúngica e insecticida (Silva y Dunford, 2005). Portillo-Ruíz et al. (2005) evalúan la actividad antifúngica de *L. berlandieri* frente a 21 cepas de hongos contaminantes de los alimentos que incluían *Penicillium*, *Geotrichum*, *Aspergillus* y *Bipolaris*. Los resultados indican que el aceite esencial extraído inhibió de diferente forma a todas las cepas de hongos, pero solo en 12 cepas fue evidente un fuerte efecto inhibitorio, lo cual podría deberse a una mayor concentración de los principales compuestos fenólicos antifúngicos, como timol y carvacrol, presentes en el aceite esencial obtenido. En un estudio realizado por Ruíz-Jiménez et al. (2021), se analizan la toxicidad de extractos de hojas de *L. berlandieri* sobre el ácaro rojo de las palmas *Raoiella indica* Hirts, exponiendo a hembras adultas bajo concentraciones de 0.25, 0.50, 0.75 y 1% (v/v) para evaluar la mortalidad acumulada a las 24, 48 y 72 h después de la exposición. Las tasas de mortalidad de *R. indica* aumentaron debido al aumento de la concentración del extracto y al tiempo de exposición, llegando a alcanzar el 100% de mortalidad en la concentración al 1% y 72 h.

Factores para considerar: no se encuentra protegida por la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Diario Oficial de la Federación, 2010) ni en alguna categoría en la lista roja de la IUCN. Se cuentan con estudios agronómicos, biología reproductiva, comercialización, etnobotánicos, farmacológicos, fisiológicos, fotoquímicos, germinación de semillas, medicina tradicional, reproducción *in vitro*, tecnología de alimentos (Garnica-Flores, 1994; Pérez-Santiago et al., 2011). Desde el punto de vista social, se aprovecha como recurso terapéutico y de ornato. El Gobierno Federal, a través de la CONAFOR, tiene elaborado un paquete tecnológico para la producción de orégano (*Lippia* spp.), lo que ha permitido que en varias localidades del país existan grupos de productores que lo cultiven con fines de comercialización y exportación (Haidé-Quezada et al., 2011; CONAFOR, 2012).

De acuerdo con el análisis realizado con las seis especies endémicas, las formas de vida herbáceas y arbustivas tienen más estudios complementarios que los árboles, lo cual es importante resaltar, ya que estas formas de vida tienen ciclos más cortos y, por lo tanto, se pudiera garantizar una constante producción de materia prima. Aunado a ello, son las especies que a nivel nacional no están protegidas por la NOM-059-SEMARNAT-2010 (Diario Oficial de la Federación, 2010) y a nivel internacional tampoco figuran en la lista roja de la IUCN. Finalmente, son especies donde ya existe un aprovechamiento social.

Conclusiones

Las publicaciones de las especies endémicas vegetales reportadas a nivel mundial en el Web of Science señalan que al igual que las especies comunes, estas tienen diferentes compuestos químicos que han sido probados de forma positiva en varias especies de bacterias, hongos e insectos; lo que les permite ser consideradas especies con un potencial biotecnológico para el control de organismos plaga, enfermedades y la protección de cultivos agrícolas.

No obstante, las especies endémicas pueden tener un rango de distribución geográfico grande o pequeño, un nivel de especificidad del hábitat amplio o restringido y una abundancia poblacional local alta o baja; ya que repercutiría directamente en la cantidad de materia prima que se necesita para el aislamiento de sustancias activas con fines de producción y comercialización. Por ello, debe prevalecer el uso de formas de vida como las herbáceas y arbustos, ya que sus ciclos de vida pudieran permitir esta biomasa demandada. Como ejemplo y derivado de nuestra búsqueda, se pueden considerar a las especies endémicas de México *A. mexicana* subsp. *xolocotziana* (hierba), *C. radicalis* y *L. berlandieri* (arbustos) como modelos de producción con fines biotecnológicos.

Dichas especies han sido seleccionadas debido a que se les puede encontrar en varios tipos de hábitats y estados de la República mexicana, aunque sus abundancias poblacionales son bajas, se tiene documentado que existe un uso importante por parte de las comunidades donde se encuentran y que en varios casos ya existen formas de organización social para su producción y comercialización. Aunado a ello, estas especies no están protegidas a nivel nacional e internacional. Se deben fortalecer los estudios demográficos para tener más información sobre la obtención de frutos y su germinación en su hábitat, con el fin de garantizar la obtención de semillas y llevar a cabo plantaciones comerciales sostenibles con la mayor diversidad de germoplasma, lo que permitirá de manera paralela conservar sus poblaciones naturales.

Finalmente, en México se debe promover la realización de investigación científica y aplicada de compuestos derivados de especies endémicas en la búsqueda de alternativas de solución ante plagas y enfermedades en cultivos de interés comercial.

Referencias

- Arredondo-Váldez, R., Chacón-Hernández, J. C., Reyes-Zepeda, F., Hernández-García, F. D., Anguiano-Cabello, J. C., Heinz-Castro, R. T. Q. y Mora-Ravelo, S.G. (2020). *In vitro* antibacterial activity of *Magnolia tamaulipana* against tomato phytopathogenic bacteria. *Plant Protection Science*, 56(1), 268-274.
- Birkle, C., Pendlebury, D. A., Schnell, J., y Adams, J. (2020). Web of Science as a data source for research on scientific and scholarly activity. *Quantitative Science Studies*, 1(1), 363-376.
- Caballero-Rico, F. C., Ramírez de León, J. A. y Roque-Hernández, R. V. (2020). Análisis de la generación de conocimiento en la Reserva de la Biosfera El Cielo, México y la vinculación con su programa de manejo. *CienciaUAT*, 15(1), 24-47.
- Chacón-Hernández, J. C., Arredondo-Váldez, R., Anguiano-Cabello, J. C., Ordaz-Silva, S., Hernández-Juárez, A. y Reyes-Zepeda, F. (2019). Effect of *Magnolia tamaulipana* extract on egg laying and food intake of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). *International Journal of Acarology*, 46(2), 108-110.
- Chávez-Cortázar, A., Oyama, K., Ochoa-Zavala, M., Mata-Rosas, M., Veltjen, E., Marie-Stéphanie, S. y Quesada, M. (2021). Conservation genetics of relict tropical species of *Magnolia* (section Macrophylla). *Conservation Genetics*, 22, 259-273.
- Cicuzza, D., Newton, A. y Oldfield, S. (2007). *The Red List of Magnoliaceae*. Ed. Fauna & Flora International. Cambridge, UK.
- CONABIO. (2008). *Capital natural de México, conocimiento actual de la biodiversidad*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, D.F.
- CONAFOR. (2012). *Paquete tecnológico para la producción de oregano (Lippia spp.)*. Comisión Nacional Forestal. México, D.F. <https://www.conafor.gob.mx/biblioteca/OREGANO.pdf>
- Diario Oficial de la Federación. (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2010, Protección ambiental-especies nativas de México de flora y fauna silvestres - Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo*. Publicado el 30 de Diciembre de 2010. http://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5173091
- Endress, B. A., Gorchoy, D. L. y Berry, E. J. (2006). Sustainability of a non-timber forest product: Effects of alternative leaf harvest practices over 6 years on yield and demography of the palm *Chamaedorea radicalis*. *Forest Ecology and Management*, 234, 181-191.

- Esparza-Olguín, L. G. (2004). ¿Qué sabemos de la rareza en especies vegetales? Un enfoque genético-demográfico. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 75, 17-32. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57707502>
- Espinosa, D. y Llorente, J. (1993). *Fundamentos de biogeografías filogenéticas*. Facultad de Ciencias, UNAM, México.
- Espinosa, O. D., Aguilar, Z. C. y Escalante, E. T. (2001). Endemismo, áreas de endemismo y regionalización biogeográfica. 31-37. En Llorente, B. J. y Morrone, J. J. (eds.), *Introducción a la biogeografía en Latinoamérica: teoría, conceptos, métodos y aplicaciones*. Facultad de Ciencias, UNAM, México, D.F.
- FAO. (2020). *Versión resumida de El estado de seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo: Transformación de los sistemas alimentarios para que promuevan dietas asequibles y saludables*. FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9699es>
- Flores-Estévez, N., Vasquez-Morales, S. G., Cano-Medina, T., Sánchez-Velásquez, L. R., Noa-Carrazana, J. C. y Díaz-Fleischer, F. (2013). Insecticidal activity of raw ethanolic extracts from *Magnolia dealbata* Zucc on a tephritid pest. *Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 48(7), 582-586.
- Galván-Hernández, D. M., Octavio-Aguilar, P., Bartolo-Hernández, C. J., García-Montes, M. A., Sánchez-González, A., Ramírez-Bautista, A. y Vovides, A. (2020). Current Status of *Magnolia vovidesii* (Magnoliaceae, Magnoniales): New Data on Population Trends, Spatial Structure, and Disturbance Threats. *Tropical Conservation Science*, 13, 1-12.
- García-Montes, M. A., Cibrián-Jaramillo, A., Reyes-Zepeda, F., Chacón-Hernández, J. C., Vanoye-Eligio, V., Sánchez-González, A., & Octavio-Aguilar, P. (2022). *Magnolia tamaulipana*: genetic evaluation shows high vulnerability in a narrow distribution. *International Journal of Plant Science*, 183(2), 154-167. <https://doi.org/10.1086/717817>
- Garnica-Flores, J. G. (1994). Ensayo de predicción del rendimiento de orégano (*Lippia berlandieri* Shower) en la zona norte de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 19(76), 15-26.
- Gobierno del Estado de Tamaulipas. (2013). *Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera El Cielo*. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente, Instituto de Ecología Aplicada de la Universidad Autónoma de Tamaulipas. Cd. Victoria, Tamaulipas, México.
- Golob, P., Moss, C., Dales, M., Fidgen, A., Evans, J. y Gudrups, I. (1999). The use of spices and medicinals as bioactive protectants for grains. *FAO Agricultural Services Bulletin*, (137). Rome.

- Gorchov, D. L. y Endress B. A. (2005). La palmilla *Chamedora radicalis*. p. 273-279. En Sánchez-Ramos, G., Reyes-Castillo, P., y Dirzo, R., *Historia natural de la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México*. Universidad Autónoma de Tamaulipas. México.
- Haidé-Quezada, F., Sánchez-Ramos, G., Lara-Villalón, M., Medina-Martínez, T. y Pérez-Quilantán, L. M. (2011). Parámetros ambientales y abundancia del orégano mexicano (*Lippia graveolens*) en el estado de Tamaulipas. *Ciencia UAT*, 6(1), 25-31.
- Herrera, J. M. y García, D. (2010). Effects of forest fragmentation on seed dispersal and seedling establishment in *Ornithochorus* trees. *Conservation Biology*, 24(4), 1089-1098. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01459.x>
- Hurtado-Mariles, A. J. (2016). *Producción de extractos de Agastache mexicana spp. mexicana y Agastache mexicana spp. xolocotziana y evaluación de la actividad anticompulsiva*. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. México, D.F. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/24112/Hurtado%20Mariles%2c%20Alejandro%20Jonathan.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Jacquemyn, H., Meester, L. D., Jongejans, E. y Honnay, O. (2012). Evolutionary changes in plant reproductive traits following habitat fragmentation and their consequences for population fitness. *Journal of Ecology*, 100(1), 76-87. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01919.x>
- Juárez, Z. N., Hernández, L. R., Bach, H., Sánchez-Arreola, E., Bach, H. (2015). Antifungal activity of essential oils extracted from *Agastache mexicana* ssp. *xolocotziana* and *Porophyllum linaria* against post-harvest pathogens. *Industrial Crops and Products*, 74, 178-182. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.058>
- Lim, J. Y., Fine, P. A. V., y Mittelbach, G. G. (2015). Assessing the latitudinal gradient in herbivory. *Global Ecol. Biogeogr.* 24, 1106-1112. <https://doi.org/10.1111/geb.12336>
- Llorca, A. F. (2009). *Prospección en avances en ciencia y tecnología*. Documento de trabajo del Instituto Interuniversitario de Economía Internacional, DT. 2009-10. Universidad de Alicante, España. <https://iei.ua.es/es/materiales/eventos/economia-alicantina/plan-alicante-horizonte-2020/monografia10.pdf>
- Medellín-Morales, S. G., Barrientos-Lozano, L., Mora-Olivo, A., Sierra, P. A. y Mora-Ravelo, S. G. (2017). Diversidad de conocimiento etnobotánico tradicional en la Reserva de la Biosfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Ecología Aplicada*, 16, 49-61.
- Montelongo-Ruiz, G., Moreno-Ramírez, R. Y., Juárez-Aragón, M. C., Olazarán-Santibáñez, F. E., Niño-García, N., Torres-Acosta, R. Y. y Torres-Castillo, J. A. (2020a). Tentative identification of phytochemicals and antioxidant activities during fruit-ripening on *Chamaedorea radicalis* Mart. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 89, 361-373.
- Montelongo-Ruiz, G., Olazarán-Santibáñez, F. E., Reyes-Zepeda, F., Torres-Castillo, J. A., De la Rosa-Manzano, E., Martínez-Ávalos, J. G. y Arellano-Méndez, L. U. (2020b).

- Inhibition of intestinal proteolytic activity of *Schistocerca piceifrons piceifrons* (Walker) and *Pterophylla beltrani* (Bolívar and Bolívar) using extracts from *Chamaedorea radicalis* Mart. *Southwestern Entomologist*, 45(1), 137-146.
- Montelongo-Ruíz, G., Chacón-Hernández, J. C., Reyes-Zepeda, F., Octavio-Aguilar, P., Heinz-Castro, R. T., Juárez, L., y Ordaz-Silva, S. (2020c). The stimulatory effect of the *Chamaedorea radicalis* ethanolic extract on *Tetranychus merganster* Boudreaux (Acari: Tetranychidae). *International Journal of Acarology*, 46(5), 318-321.
- Moreira, X., Castagneyrol, B., García-Verdugo, C. y Abdala-Roberts, L. (2020). A meta-analysis of insularity effects on herbivory and plant defences. *Journal of Biogeography*, 48(2), 386-393.
- Münzbergová, Z. (2005). Determinants of species rarity: Population growth rates of species sharing the same habitat. *American Journal of Botany*, 92(12), 1987-1994. <https://doi.org/10.3732/ajb.92.12.1987>
- Nash, D. L., y Nee, M. (1984). *Flora de Veracruz. Fascículo 41: Verbenaceae*. Instituto Nacional de Investigaciones sobre Recursos Bióticos. Xalapa, Ver.
- Ortiz-Cervantes, E. (2010). Tecnología de manejo de palma comedora en plantaciones forestales. *Foro temático de palma comedora: Innovación, conservación y competitividad*. CONAFOR, SEMARNAT, México, D.F. http://www.conafor.gob.mx/biblioteca/foros/palma/TECNOLOGIA_DE_MANEJO_DE_PALMA_CAMEDOR_EN_PLANTACIONES_FORESTALES_-_COPIA.PDF
- Palma-Tenango, M., Sánchez-Fernández, R. E., y Soto-Hernández, M. A. (2021). Systematic approach to *Agastache mexicana* research: biology, agronomy, phytochemistry, and bioactivity. *Molecules*, 26, 3751.
- Pavela, R. (2016). History, presence, and perspective of using plant extracts as commercial botanical insecticides and farm products for protection against insects - a review. *Plant Protection Science*, 52(4), 229-241.
- Pérez-Santiago, G., González-Castillo, M. P., Alejandre-Iturbide, G. y González-Guereca, M. C. (2011). *El orégano mexicano: estado actual del conocimiento*. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Durango, Durango.
- Portillo-Ruíz, M. C., Viramontes-Ramos, S., Muñoz-Castellanos, L., Gástelum-Franco, M. G. y Neváres-Moorillón, G.V. (2005). Antifungal Activity of Mexican Oregano (*Lippia berlandieri* Shauer). *Journal of Food Protection*, 68(12), 2713-2717.
- Puig, H., y Bracho, R. (1987). *El bosque mesófilo de montaña de Tamaulipas*. Mexico, D.F., Instituto de Ecología.
- Quero, H. J. (2004). *Palmae. Flora del Bajío y de Regiones Adyacentes*, Fascículo 129. Instituto de Ecología, A.C. México.

- Ruiz-Jiménez, K., Osorio-Osorio, R., Hernández-Hernández, L. U., Ochoa-Flores, A., Silva-Vázquez, R., y Méndez-Zamora, G. (2021). Acaricidal activity of plant extracts against the red palm mite *Raoiella indica* (Acari: Tenuipalpidae). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 80(1), 33-39.
- Sánchez-Velásquez, L. R., y Pineda-López-Sánchez, M. R. (2010). Comparative demographic analysis in contrasting environments of *Magnolia dealbata*: an endangered species from Mexico. *Population Ecology*, 52, 203-210. <https://doi.org/10.1007/s10144-009-0161-5>
- Rabinowitz, D. (1981). Seven forms of rarity. En: Synge, H. (ed.), *The biological aspect of rare plant conservation*. John Wiley & Sons.
- Ramírez-Reyes, T., Monribot-Villanueva, J. L., Jiménez-Martínez, O. D., Aguilar-Colorado, A. S., Bonilla-Landa, I., Flores-Estévez, N., Luna-Rodríguez, M. y Guerrero-Analco, J.A. (2018). Sesquiterpene Lactones and Phenols from Polyfollicles of *Magnolia vovidesii* and their Antimicrobial Activity. *Natural Product Communications*, 13(5), 521-525.
- Ruiz-Jiménez, K. Z., Osorio-Osorio, R., Hernández-Hernández, L. U., Ochoa-Flores, A. A., Silva-Vázquez, R., y Méndez-Zamora, G. (2021). Acaricidal activity of plant extracts against the red palm mite *Raoiella indica* (Acari: Tenuipalpidae). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 80(1), 33-39. <https://doi.org/10.25085/rsea.800104>
- Santillán-Ramírez, M. A., López-Villafranco, M. E., Aguilar-Rodríguez, S., y Aguilar-Contreras, A. (2008). Estudio etnobotánico, arquitectura foliar y anatomía vegetativa de *Agastache mexicana* ssp. *mexicana* y *A. mexicana* ssp. *xolocotziana*. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 79, 513 y ss.
- Silvertown, J., Franco, M., Pisanty, I. y Mendoza, A. (1993). Comparative plant demography: relative importance of life cycle components to the finite rate of increase in woody and herbaceous perennials. *Journal of Ecology*, 81(3), 465-476. <https://doi.org/10.2307/2261525>
- Vázquez, J. A. (1994). *Magnolia* (Magnoliaceae) in Mexico and Central America: a synopsis. *Brittonia*, 46, 1-23.
- Vázquez-García, J. A., Muñiz-Castro, M. Á., Arroyo, F., Pérez, Á.J., Serna, M., Cuevas-Guzmán, R., Domínguez-Yescas, R., De Castro-Arce, E., y Gurrola-Díaz, C. M. (2013). Novelties in neotropical *Magnolia* and an addendum proposal to the IUCN Red List of Magnoliaceae. En Salcedo-Pérez E., E. Hernández-Álvarez, J. A. Vázquez-García, T. Escoto-García y N. Díaz-Echavarría N. (eds.), *Recursos forestales en el occidente de México*. Vol. 4, Tomo II. Universidad de Guadalajara (pp. 461-496). Guadalajara, México.

Capítulo V

Acaricidas botánicos: disuasores, estimuladores y repelentes¹

Julio César Chacón Hernández²
José Irving Monjarás Barrera³

Resumen

El uso irracional y desmedido de agroquímicos en la agricultura ha provocado que muchas especies de artrópodos plaga sean difíciles de controlar. Aunado a esto, la tasa reproductiva y ciclo de vida en la mayoría de las especies como en los ácaros es corta, provocando generaciones resistentes en poco tiempo. Esto ha impactado de manera positiva para el desarrollo e implementación de alternativas que coadyuvan esta situación. Una alternativa para el manejo de ácaros ha sido el uso de extractos de plantas, que prometen control eficiente en poblaciones difíciles de manejar. Los extractos de plantas son de diferentes grupos de metabolitos secundarios (MS), que juegan un papel importante en la defensa de la planta contra plagas y enfermedades. Tres principales grupos de MS han sido ampliamente evaluados para el manejo y control de ácaros tetraníquidos (Acari: Tetranychidae) de importancia económica: terpenoides, fenólicos y alcaloides. Estos compuestos provocan efectos tóxicos en diferentes especies de ácaros tetraníquidos. Sin embargo, existen efectos subletales que provocan disuasión o estimulación de alimentación y oviposición; a su vez se encuentran relacionados al efecto de repelencia evitando así, el establecimiento de las poblaciones de tetraníquidos. Este trabajo pretende dar un panorama sobre el conocimiento y uso de los extractos de las plantas, así como los efectos que estos provocan en la

¹ Citar este capítulo, como: Chacón-Hernández, J. C. y Monjarás-Barrera, J. I. (2024). Acaricidas botánicos: Disuasores, estimuladores y repelentes. En: *Perspectivas multidisciplinarias para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas*. UAT, México, pp. 133-150.

² Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Ciudad Victoria 87120, Tamaulipas, México. Autor para correspondencia: jchacon@docentes.uat.edu.mx

³ Facultad de Enología y Gastronomía, Universidad Autónoma de Baja de California, Ensenada, Baja California, México.

biología de las especies, demostrando así, su importancia en el manejo y control de ácaros de la familia Tetranychidae.

Introducción

La familia Tetranychidae comprende más de 1 300 especies de fitófagos y son un grupo clave en la agricultura. Más de un centenar de ellos pueden considerarse plagas y unos diez, como plagas importantes. La especie más conocida y cosmopolita es el ácaro de dos manchas, *Tetranychus urticae* Koch (Ferragut y Santonja, 1989; Fathipour y Maleknia, 2016; Migeon y Dorkeld, 2021). Pero también se encuentra la araña carmín, *Tetranychus cinnabarinus* Boisduval (Tello et al., 2009; Fathipour y Maleknia, 2016), *Tetranychus turkestanii* Ugarov y Nikolskii (Banihashemi et al., 2017), *Oligonychus punicae* Hirst (Humeres y Morse, 2005; Heinz-Castro et al., 2021a), *Panonychus ulmi* Koch (Lester et al., 2000; Marshal y Lester, 2001), entre otras (Fathipour y Maleknia 2016; Migeon y Dorkeld 2021; Heinz-Castro et al., 2021b).

El daño que causan los tetraníquidos a las plantas hospederas, es producto de la alimentación por medio del estilete, el cual penetra la hoja entre las células del pavimento epidérmico o a través de una abertura estomática, sin dañar la capa celular epidérmica (Bensoussan et al., 2016), provocando manchas blancas en las partes donde se alimenten. Después de algún tiempo, y bajo infestaciones severas, estas manchas pueden fusionarse, volviendo las hojas blancas (Heinz-Castro et al., 2021a, b).

La tasa reproductiva y el ciclo de vida de los tetraníquidos son cortos, lo que genera resistencia al control químico (Zhang 2003). Además, este método de control enfrenta desafíos económicos y ecológicos en todo el mundo, debido al impacto en la salud humana y en el medio ambiente (Heinz-Castro et al., 2021 a, b). Es necesario buscar alternativas para combatir la resistencia de los tetraníquidos a los pesticidas químicos (Papapostolou et al., 2021). Los extractos de plantas son opciones respetuosas con el medio ambiente y los seres humanos, y pueden ayudar a controlar a los ácaros plaga (Grbic et al., 2011; Pavela, 2016; Chacón-Hernández et al., 2019; Heinz-Castro et al., 2021 a, b).

Esta revisión se centra en el efecto de los extractos de plantas, principalmente estimuladores, disuasores -antialimentación y antioviposición- y repelentes sobre ácaros de la familia Tetranychidae. Se ofrece una descripción general de los acaricidas botánicos, desde el punto de vista químico y se clasificaron sus efectos sobre los tetraníquidos.

Antecedentes e importancia de los extractos botánicos

La utilización de extractos botánicos en la agricultura se registra en el antiguo Egipto, China, Grecia e India desde hace al menos dos milenios. Mientras que, en Europa y América del Norte, existen registros de más de 150 años, a mediados de la década de 1930 a 1950; de hecho, son utilizados antes del descubrimiento de los insecticidas químicos como los organoclorados, organofosforados, carbamatos y piretroides (Ware, 1988; Isman, 2006; El-Wakeil, 2013; Pavela, 2016).

En el 2006, en los países de primer mundo, los derivados de las plantas para el control de ácaros, insectos, nematodos, hongos y bacterias, desempeñaron un papel más importante en la producción de alimentos orgánicos que en la agricultura convencional. Los extractos botánicos tienen pocos competidores, lo que origina un incremento del 8 % y un 15 % anual en la producción orgánica en Europa y América del Norte (Isman, 2006). Sin embargo, los pesticidas botánicos están avanzando lentamente, pero fuertemente, al grado que ocupan una pequeña parte del mercado de productos a la protección de la agricultura. Para el 2015, en California, Estados Unidos, los productos botánicos constituyeron solo el 5% de participación de los plaguicidas (Isman, 2015; Olson, 2015). Para el 2025, a nivel mundial, los pesticidas botánicos pueden llegar a ocupar el 7 % del mercado, basado en un crecimiento anual de 15-20 % en las ventas equivalentes a 8.5 billones de dólares (Isman, 2015; Olson, 2015; Bioinsecticides Market, 2021).

Los pesticidas químicos son el principal método de control de ácaros plaga en la agricultura, pero tienen efectos nocivos en el ambiente, salud humana y animal. Con esta preocupación, se ha ido incrementando la concienciación sobre los alimentos libres de residuos, permitiendo un resurgimiento en el interés por los plaguicidas derivados de plantas debido a los costos mínimos de producción e impacto casi nulo en el ambiente (Pavela, 2016; Hikal et al., 2017; Bioinsecticides Market, 2021). Se han utilizado diferentes partes vegetales como hojas, tallos, semillas, raíces, bulbos, rizomas, frutos inmaduros, capullos, entre otros para la elaboración de los diferentes extractos botánicos -acuso, etanólico, metanólico, etcétera-, los cuales son eficientes y eficaces por tener un amplio espectro de actividad pesticida con un tiempo corto de actividad de residualidad, y por ende no permanecen en el medio ambiente o en tejidos grasos de animales de sangre caliente; además, son simples de procesar y utilizar (Saha et al., 2018). Cada vez hay más pruebas que los extractos botánicos tienen efectos disuasores, repelentes, estimulantes y tóxicos sobre los tetraníquidos; por lo que se han expandido rápidamente las investigaciones sobre los efectos de los pesticidas botánicos sobre estos ácaros (Roy et al., 2011; Antonious y Snyder, 2015; Pavela et al., 2017; Pavela et al., 2018; Chacón-Hernández et al., 2019; Montelongo-Ruíz et al., 2020; Heinz-Castro et al., 2021 a, b; Treviño-Barbosa et al., 2021).

Metabolitos secundarios (MS)

Los procesos metabólicos de las plantas permiten la elaboración de compuestos -metabolitos-, los cuales se clasifican en primarios y secundarios. Los primarios son esenciales para el crecimiento, fotosíntesis, expansión y reproducción de las plantas. Dentro de estos metabolitos se encuentran los azúcares, proteínas, carbohidratos, aminoácidos, glucósidos, lípidos y vitaminas, entre otros (Saha et al., 2018).

Los metabolitos secundarios (MS), también se conocen como aleloquímicos o metabolitos no nutricionales. Son compuestos de gran importancia en la parte fisiológica, simbiótica, transporte de metales, competencia e interacciones ecológicas entre la planta y su ambiente, intervienen en la defensa de la planta contra depredadores y patógenos, actuando como tóxicos, repelentes o atrayentes de animales, lo que genera un desarrollo lento o nulo de estos, resultando un factor clave en el crecimiento de las plantas (Sepúlveda-Jiménez, 2003; Saha et al., 2018).

Los MS se clasifican de acuerdo con su estructura, función y biosíntesis, y se conocen más de 2 140 000. Dentro de estos, se encuentran diferentes grupos como ésteres, terpenoides y esteroides, ácidos grasos, fenoles, cumarinas, alcaloides, aldehídos, alcoholes, compuestos acetilénicos, polipéptidos no ribosómicos, hidrocarburos, cetonas y cofactores enzimáticos (McMurry, 2015; Saha et al., 2018; Thirumurugan et al., 2018); aunque los principales metabolitos secundarios en plantas se pueden dividir en cuatro grupos químicamente distintos: terpenoides, fenólicos, alcaloides y compuestos nitrogenados (Saha et al., 2018). En previas revisiones se ha informado que los fenoles, polifenoles, alcaloides, terpenos, taninos, saponinas son sustancias químicas que realizan un efecto sobre artrópodos plaga (Leone et al., 2015; Pavela, 2016), incluyendo a los tetraníquidos. Estos producen efectos anti-alimentarios, anti-oviposición, mortalidad (Roy et al., 2011; Pavela, 2016; Pavela et al., 2017, 2018; Chacón-Hernández et al., 2019); así como, el estímulo en la oviposición (Roy et al., 2011; Christal-Catalani et al., 2016) e incremento en la ingesta de alimento (Montelongo-Ruíz et al., 2020; Treviño-Barbosa et al., 2021).

Terpenos

Los terpenoides -también llamados isoprenoides- son uno de los grupos más numerosos de los MS que representan más de 40 000 compuestos individuales, y cada año se descubren varios compuestos nuevos. La mayoría de los terpenoides son de origen vegetal (~25 000); sin embargo, también son sintetizados por otros organismos, como insectos, microbios, vertebrados y levaduras. Como parte del metabolismo primario o secundario, los terpenoides contribuyen a la fragancia de las plantas. Además, de la eficacia de los terpenos, este grupo es normalmente insoluble en agua, por lo que en medios acuosos puede limitar su biodisponibilidad

en el organismo (García y Carril, 2009; Thoppil y Bishaye, 2011; Saha et al., 2018; Thirumurugan et al., 2018; Gajger y Dar, 2021). Los terpenoides se clasifican en varias clases por el número de bloques de construcción de cinco carbonos, es decir, las unidades isoprenoides (C5), como los monoterpenos que contienen dos unidades C5, los sesquiterpenos tienen tres unidades de isopreno, los diterpenos cuatro unidades, los triterpenos seis unidades, los tetraterpenos ocho unidades y los politerpenos que contienen más de ocho unidades de isopreno (García y Carril, 2009; Thoppil y Bishaye, 2011; Kortbeek et al., 2019).

Las plantas emiten terpenos en respuesta al estrés o por daño causado por herbívoros, las cuales atraen a otros organismos como depredadores de estos herbívoros; además, las flores pueden emitir terpenoides para atraer insectos polinizadores (Thirumurugan et al., 2018; Gajger y Dar, 2021). Algunas subclases de terpenoides como los monoterpenos, diterpenos, triterpenos y sesquiterpenos tienen actividad insecticida, provocan lento crecimiento, inhibición de la fecundidad e ingesta de alimento, y toxicidad en los artrópodos incluyendo a algunas especies de tetraníquidos (García y Carril, 2009; Moraes et al., 2017; Saha et al., 2018; Kortbeek et al., 2019; Gajger y Dar, 2021).

Alcaloides

Los alcaloides -llamados purina en el pasado- se encuentran principalmente en plantas terrestres y en algunos animales. Este grupo de MS se extrae generalmente de Ranunculaceae, Papaveraceae, Solanaceae, Apocynaceae, Rutaceae, Leguminosae, Polygonaceae, Ranunculaceae, Menispermaceae y Loganiaceae, Erythroxylaceae, Convolvulaceae, Rhizophoraceae, Annonaceae, Brassicaceae y Meliaceae (Castillo-Sánchez et al., 2010; Lu et al., 2012; Chowanski et al., 2016; Liu et al., 2019). Los alcaloides son un grupo con más de 15 000 MS; todos ellos tienen tres características en común: 1) son solubles en agua, 2) contienen al menos un átomo de nitrógeno en la molécula y 3) ejerce una actividad biológica significativa (García y Carril, 2009; Chowanski et al., 2016; Liu et al., 2019). Este grupo se divide por su estructura química, como alcaloides tropano, alcaloides de piperidina, alcaloides de tropano, glicoalcloides, alcaloides de isoquinolina, pirrolizidina, alcaloides indol, alcaloides terpenoides, alcaloides esteroides y alcaloides quinolínicos (Chowanski et al., 2016; Liu et al., 2019). Algunos alcaloides como los glicoalcaloides, alcaloides de tropano ,tienen propiedades insecticidas, así como propiedades anti-alimentarias, anti-oviposición, repelencia, duración prolongada de la muda, mortalidad en adultos, reducen el desarrollo, crecimiento y peso de artrópodos (Castillo-Sánchez et al., 2010; Chowanski et al., 2016; Kortbeek et al., 2019; Gajger y Dar, 2021).

Fenoles

Los fenólicos también llamados compuestos fenólicos, polifenoles o fenilpropanoides, son moléculas con una o más estructuras de anillo de benceno hidroxilado y tienen en común al menos un anillo aromático (García y Carril, 2009; Saha et al., 2018; Kortbeek et al., 2019). Se conocen más de 8 000 estructuras fenólicas, por lo que lo hace uno de los grupos de sustancias más diversos. Estos MS se sintetizan a través de las vías del ácido shikímico y del ácido malónico en los sistemas vegetales y actúan como mecanismo de defensa contra parásitos de la planta (García y Carril, 2009; Saha et al., 2018; Thirumurugan et al., 2018).

Los taninos, flavanoides, isoflavanoides y las ligninas son los compuestos fenólicos más importantes que muestran actividades insecticidas. Los taninos son tóxicos para los artrópodos; ya que, al ingerir este compuesto, se unen a las proteínas salivales y enzimas digestivas, incluyendo tripsina y quimotripsina, y repercute en la inactivación de proteínas en los organismos, lo cual hace adelgazar al artrópodo y eventualmente le ocasiona su muerte. Por otro lado, la lignina es insoluble, rígida y casi indigerible, lo que causa que sea un obstáculo o barrera física contra el ataque de los artrópodos; mientras que los flavonoides inhiben la alimentación, oviposición, crecimiento y desarrollo de los artrópodos (Golan et al., 2017; Saha et al., 2018; Gajger y Dar, 2021).

Disuasores

Los disuasores son compuestos o sustancias que reducen la alimentación y la oviposición de insectos y ácaros. En el caso de la anti-alimentación, estas sustancias inducen a disuadir el consumo alimenticio, es decir, inhiben la alimentación o interrumpen la alimentación de los insectos y ácaros al hacer que su dieta alimentaria sea poco atractiva o desagradable (Isman, 2006; Mossa, 2016; Hikal, et al., 2017). Respecto a la anti-oviposición, está ligada a la esterilización temporal o parcial de las hembras causada por uno o varios metabolitos secundarios de las plantas (Hikal et al., 2017). En ambos casos, la disuasión de la alimentación y la oviposición afectan el comportamiento de las hembras, mediante una acción directa sobre el sistema nervioso periférico de los artrópodos incluyendo insectos y ácaros (Isman, 2006; Mossa, 2016).

Se ha reportado que las partes de la planta, el aceite y los extractos reducen la oviposición y la alimentación de los tetraníquidos (Tabla 16). Antonious y Snyder (2015) reportaron que el extracto etanólico y acuoso de *Lycopersicum hirsutum* f. *glabratum* (LA 407), también conocido como *Solanum habrochaites* (Solanaceae), inhibió la oviposición de hembras de *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae) en 68% y 67% en comparación con el control, respectivamente. Pavela et

al. (2017) encontraron que el extracto de metanol y acetato de etilo de *Tithonia diversifolia* (Asteraceae) redujeron la puesta de huevos de *T. urticae* en 62.8% y 100%, respectivamente. Pavela et al. (2018) encontraron que el extracto acuoso de raíz de *Saponaria officinalis* (Caryophyllaceae) redujo la oviposición de *T. urticae* en 72.1%. Por otro lado, Chacón-Hernández et al. (2019) encontraron que el extracto de polvo etanólico de *Magnolia tamaulipana* (Magnoliaceae) reduce la puesta de huevos de *T. urticae* a las 24, 48 y 72 h comparado al control, en 95.56 %, 95.83 % y 95.39%, respectivamente. Además, estos autores encontraron que el extracto inhibe la alimentación de las hembras en 69.89%. Sivira et al. (2011) reportaron que los extractos etanólicos de hojas de *Lippia organoides* (Verbenaceae) y *Gliricidia sepium* (Fabaceae) reducen la oviposición de *T. cinnabarinus* en 43.7 % y 57 % comparado al control. Mientras que, Ribeiro et al. (2014) documentaron que el extracto etanólico de semillas de *Annona mucosa* (Annonaceae) reduce el número de huevos por hembra de *Panonychus citri* en 93%, comparado con el control. En todos los estudios, los autores observaron un incremento de la inhibición de oviposición e ingesta de alimento concordando con el incremento a las concentraciones de los extractos.

Tabla 16

Insecticidas botánicos que causan disuasión, estimulación alimentaria y oviposición y repelencia en varias especies de tetránquidos

Familia	Especie de la planta	Nombre común	Parte de la planta	Tipo de extracto	Efecto	Especie de ácaro	Cita
Polygonaceae	<i>Polygonum hydrophyper</i> L.	Pimienta del agua	Hojas y suculentos tallos	Acuoso	Estimulación de la oviposición	<i>Oligonychus coffeae</i> (Nietner)	Roy et al. (2011)
Arecaceae	<i>Chamaedorea radialis</i> (Mart.)	Palmilla	Frutos	Etanólico	Estimulación de la oviposición	<i>Tetranychus merganser</i> (Boudreaux)	Montelongo-Ruiz et al. (2020)
Equisetaceae	<i>Equisetum arvense</i> L.	Cola de caballo	Hojas	Etanólico	Estimulación de la oviposición	<i>Tetranychus merganser</i> (Boudreaux)	Treviño-Barbosa et al. (2021)
Magnoliaceae	<i>Magnolia tanaulipana</i> Vázquez	Magnolia	Hojas	Polvo etanólico	Disuasión de la alimentación y oviposición	<i>Tetranychus urticae</i> (Koch)	Chacon-Hernández et al. (2019)
Solanaceae	<i>Lycopersicon hirsutum</i> f. <i>glabratum</i> C.H.Müll. (LA 407)	Tomate	Hojas	Acuoso y etanólico	Disuasión de la alimentación y repelencia	<i>Tetranychus urticae</i> (Koch)	Antonious y Snyder (2015)
Asteraceae	<i>Tithonia diversifolia</i> (Hemsl.) A. Gray	Girasol mexicano	Hojas	Metanólico y Acetato de etilo	Disuasión de la oviposición	<i>Tetranychus urticae</i> (Koch)	Pavela et al. (2017)
Caryophyllaceae	<i>Saponaria officinalis</i> L.	Jaboncillo	Raíz	Acuoso	Disuasión de la oviposición	<i>Tetranychus urticae</i> (Koch)	Pavela (2017)
Santalaceae	<i>Santalum austrocaledonicum</i>	Árbol Tíbo	Madera	Aceite esencial	Disuasión de la oviposición	<i>Tetranychus urticae</i> (Koch)	Roh et al. (2011)
Poaceae	<i>Cymbopogon citratus</i> (Dc.) Stapf	Zacate limón	Hojas	Aceite esencial	Disuasión de la oviposición	<i>Tetranychus urticae</i> (Koch)	Elhalawany y Dewidar (2017)
Lamiaceae	<i>Mentha viridis</i> L.	Hierbabuena	Hojas	Aceite esencial	Disuasión de la oviposición	<i>Tetranychus urticae</i> (Koch)	Elhalawany y Dewidar (2017)
Lamiaceae	<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	Romero	Hojas	Accite esencial	Disuasión de la oviposición	<i>Tetranychus urticae</i> (Koch)	Elhalawany y Dewidar (2017)

Familia	Especie de la planta	Nombre común	Parte de la planta	Tipo de extracto	Efecto	Especie de ácido	Cita
Lamiaceae	<i>Origanum majorana</i> L.	Mejorana	Hojas	Aceite esencial	Disuasión de la oviposición	<i>Tetraphys urticae</i> (Koch)	Elhalawany y Dewidar (2017)
Apiaceae	<i>Foeniculum vulgare</i> Mill.	Hinojo	Hojas	Aceite esencial	Disuasión de la oviposición	<i>Tetraphys urticae</i> (Koch)	Elhalawany y Dewidar (2017)
Apiaceae	<i>Coriandrum sativum</i> L.	Cilantro	Hojas	Aceite esencial	Disuasión de la oviposición	<i>Tetraphys urticae</i> (Koch)	Elhalawany y Dewidar (2017)
Asteraceae	<i>Matricaria recutita</i> L.	Manzanilla	Flor	Aceite esencial	Disuasión de la oviposición	<i>Tetraphys urticae</i> (Koch)	Elhalawany y Dewidar (2017)
Combrataceae	<i>Terminalia chebula</i> Retz.	Chebulic	Fruto	Acuoso	Disuasión de la oviposición	<i>Oligonychus coffeae</i> (Nietner)	Roy et al. (2014)
Leguminosae (Fabaceae)	<i>Pongamia pinnata</i> L. Pierre (=Milletia pinnata)	Pongam	Semilla	Acuoso	Disuasión de la oviposición	<i>Oligonychus coffeae</i> (Nietner)	Roobakkumar et al. (2010)
Amaryllidaceae	<i>Allium sativum</i> L.	Ajo	Fruto	Acuoso	Disuasión de la oviposición	<i>Oligonychus coffeae</i> (Nietner)	Roobakkumar et al. (2010)
Meliaceae	<i>Azadirachta indica</i> A.Juss.	Nem	Semilla	Acuoso	Disuasión de la oviposición	<i>Oligonychus coffeae</i> (Nietner)	Roobakkumar et al. (2010)
Fabaceae	<i>Derris indica</i> Lamk. Bennet	Comercial	Semilla	Acuoso	Disuasión de la oviposición	<i>Oligonychus coffeae</i> (Nietner)	Roobakkumar et al. (2010)
Meliaceae	<i>Melia azedarach</i> L.	Cinamomo	Semilla	Acuoso	Disuasión de la oviposición	<i>Oligonychus coffeae</i> (Nietner)	Roy y Mukhopadhyay (2012)
Verbenaceae	<i>Lippia organoides</i> Kunth.	Orégano	Hojas	Etanólico	Disuasión de la oviposición	<i>Tetraphys cimabarinus</i> (Boisduval)	Sivira et al. (2011)
Fabaceae	<i>Girardinia septium</i> (Jacq.) Kunth ex Walp.	Gliciridia	Hojas	Etanólico	Disuasión de la oviposición	<i>Tetraphys cimabarinus</i> (Boisduval)	Sivira et al. (2011)
Annonaceae	<i>Annona mucosa</i> Jacq.	Anona	Semillas	Etanólico	Disuasión de la oviposición	<i>Panonychus citri</i> (McGregor)	Ribeiro et al. (2014)
Lauraceae	<i>Ocotea dickelii</i> Vattimo	Louro pimienta	Hojas	Acuoso	Mortalidad	<i>Tetraphys urticae</i> Koch	Moraes et al. (2017)
Lauraceae	<i>Ocotea glomerata</i> (Ness) Mez	caneleira	Hojas	Acuoso	Mortalidad	<i>Tetraphys urticae</i> Koch	Moraes et al. (2017)

Familia	Especie de la planta	Nombre común	Parte de la planta	Tipo de extracto	Efecto	Especie de ácido	Cita
Rosaceae	<i>Prunus laurocerasus</i> L.	Laurel cerezo	Semillas	Actuosa	Repelencia	<i>Tetranjchus urticae</i> Koch	Akyazi et al. (2015)
Labiatae	<i>Thymbra spicata</i> L.	Tomillo	Tallos, flores y hojas	Accite esencial	Repelencia	<i>Tetranjchus urticae</i> Koch	Yeşilayer (2018)
Lauraceae	<i>Laurus nobilis</i> L.	Laurel	Tallos, flores y hojas	Accite esencial	Repelencia	<i>Tetranjchus urticae</i> Koch	Yeşilayer (2018)
Myrtaceae	<i>Myrtus communis</i> L.	Mirto	Tallos, flores y hojas	Accite esencial	Repelencia	<i>Tetranjchus urticae</i> Koch	Yeşilayer (2018)
Blechnaceae	<i>Blechnum cordatum</i> (Desv.) Hieron.	Helecho costilla de vaca	Hojas	Metanólico	Repelencia y antialimentaria	<i>Tetranjchus urticae</i> Koch	Hincapié et al. (2019)

Fuente: elaboración propia.

Estimuladores

Los MS de las plantas ejercen un incremento en la oviposición de los tetránquidos (Roy et al., 2011; Catalani et al., 2016). La oviposición puede ser mejorada a través del estímulo de las células neurosecretoras cerebrales; las cuales producen una hormona que induce y mejora la ovulación o la oviposición -una miotropina- (Gillott, 2018). Aunque existen factores que estresan a los ácaros tetránquidos, por ejemplo, las bajas concentraciones de insecticidas botánicos, pueden mejorar la oviposición (Roy et al., 2011; Montelongo-Ruíz et al., 2020; Treviño-Barbosa et al., 2021). Algunos autores mencionan que los MS de las plantas pueden favorecer a genes que desempeñan funciones fundamentales en la reproducción, incluidos los datos sobre el equilibrio hormonal asociado con el desarrollo de los ovarios, la formación de la yema de huevo -vitelogenina- y la formación y puesta de huevos (Cohen, 2006).

Se ha reportado que extractos botánicos de partes de la planta y aceites botánicos estimulan la oviposición e ingesta de alimento de los tetránquidos (Tabla 16). Treviño-Barbosa et al. (2021) encontraron que el extracto etanólico de hojas de *Equisetum arvense* (Equisetaceae) estimula la oviposición de *T. merganser* en 19.87 %, 22.53 % y 21.22 % comparado al control, a las 24, 48 y 72 h, respectivamente. Mientras que, Montelongo-Ruíz et al. (2020) documentaron que el extracto etanólico de frutos maduros de *Chamaedorea radicalis* (Arecaceae) aumentó el número de huevos puestos por hembras de *T. merganser* en 11.12 % comparado al control. Los mismos autores reportaron que el extracto incrementó la ingesta de alimento en 20.55 %, en comparación al control. Roy et al. (2011) encontraron que diferentes concentraciones de extracto acuoso de *Polygonum hydropiper* (Polygonaceae) estimularon la oviposición sobre hembras de *Oligonychus coffeae* en 22 % comparado con el control. En todos los estudios, los autores observaron un incremento en la oviposición e ingesta de alimento concordando con el incremento de las concentraciones de los extractos.

Repelente

Un plaguicida botánico tiene una propiedad repelente, ya que estimula los receptores olfativos del insecto o ácaro plaga; por lo cual disuaden directamente a los artrópodos de asentarse en la planta, causando un impacto mínimo en el ecosistema (Isman, 2006; Hikal et al., 2017; Gajger y Dar, 2021).

La repelencia a menudo está relacionada con la anti-oviposición, ya que tales sustancias disuaden a las hembras de asentarse en plantas nutritivas y al mismo tiempo previenen la oviposición. Sin embargo, la anti-oviposición no siempre tiene que estar relacionada con la repelencia. Puede estar relacionado con la anti-alimentación: ya que, al instalarse en la planta, la hembra descubre que la planta no puede proporcionar alimento de buena calidad o aceptable para sus descendientes,

por lo que se aleja en busca de una planta más adecuada. El grupo de sustancias con efecto anti-oviposición incluye una amplia gama de productos químicos, desde terpenos aromáticos simples, fenoles o alcaloides hasta moléculas que pertenecen al grupo de polifenoles o limonoides (Koul, 2005; Pavela, 2011).

Algunos terpenoides y fitoecdisteroides han demostrado una acción antialimentaria en *T. urticae* dada por el efecto de inanición ocasionada por un efecto de repelencia (Hincapié et al., 2019). Antonious y Snyder (2015) encontraron que los extractos etanólicos y acuosos de hojas de *Lycopersicon hirsutum* f. *glabratum* Mull, demostraron tener un efecto de repelencia contra *T. urticae* durante todo su ensayo, lo cual asociaron a la presencia de metil cetonas. Por otra parte, Akyazi et al. (2015) encontraron una repelencia de hasta un 100 % en extractos de semilla de *Prunus laurocerasus* L., los investigadores asocian estos resultados al contenido de cianuro presente en las semillas de esta planta, uno de los principales compuestos presentes en ellas. Mientras que, Yeşilayer (2018) encontró que diferentes concentraciones (0.1 a 2 ml/L) de aceite de *Laurus nobilis* L. *Myrtus communis* L. y *Thymbra spicata* L. presentaron actividad repelente sobre *T. urticae*. Se observó un incremento de la repelencia causada por los aceites esenciales sobre los ácaros adultos con el tiempo (2, 24 y 48 h) dependiente del nivel de concentración (0.1 a 2 ml/L). El efecto repelente que pueden tener los aceites esenciales, sobre todo en la familia Lamiaceae, es prometedor y seguro, debido a que no se han observado efectos de fitotoxicidad (Yeşilayer, 2018).

Conclusiones

Los extractos vegetales se han estudiado ampliamente por poseer compuestos químicos (metabolitos secundarios) que alteran el comportamiento de las plagas. Los efectos más estudiados en los extractos de plantas han sido la mortalidad, disuasión (oviposición y alimentación) y repelencia, provocados por tres principales grupos de metabolitos secundarios: Terpenos, Alcaloides y Fenoles. Sin embargo, algunos compuestos han mostrado tener un efecto positivo en los tetraníquidos, estimulando la oviposición y alimentación, por ende, es importante caracterizar químicamente a los metabolitos secundarios; así como establecer dosis de aplicación; con el fin de establecer su función y cambios en la biología de las especies, para determinar su éxito en el manejo y control de ácaros tetraníquidos.

Aunado a esto, la composición y diversificación de metabolitos secundarios en los extractos de plantas permite establecer alternativas al uso de acaricidas convencionales, ya que son inofensivos con la fauna benéfica, no resisten sus compuestos y no causan daños al cultivo. Así, pueden integrarse en planes de manejo que permitan mantener el cultivo protegido por más tiempo sin representar daños a la salud o al medio ambiente.

Referencias

- Akyazi, R., Soysal, M., y Hassan, E. (2015). Toxic and repellent effects of *Prunus laurocerasus* L. (Rosaceae) extracts against *Tetranychus urticae* Koch (Acari: Tetranychidae). *Turkish Journal of Entomology*, 39(4), 367-380.
- Antonious, G. F., y Snyder, J. C. (2015). Repellency and oviposition deterrence of wild tomato leaf extracts to spider mites, *Tetranychus urticae* Koch. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 50, 667-673.
- Banihashemi, A. S., Seraj, A. A., Yarahmadi, F., y Rajabpour, A. (2017). Effect of host plants on predation, prey preference and switching behaviour of *Orius albidipennis* on *Bemisia tabaci* and *Tetranychus turkestani*. *International Journal of Tropical Insect Science*, 37(3), 176-182.
- Bioinsecticides Market. (2021). *Biopesticides Market by Type (Bioinsecticides, Biofungicides, Bioherbicides, and Bioherbicides), Source (Microbials, Biochemicals, and Beneficial Insects), Mode of Application, Formulation, Crop Application, and Region - Global Forecast to 2025*. <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/biopesticides-267.html> (Accessed 25/06/2021)
- Bensoussan, N., Santamaria, M. E., Zhurov, V., Diaz, I., Grbíc, M., y Grbíc, V. (2016). Plant herbivore interaction: Dissection of the cellular pattern of *Tetranychus urticae* feeding on the host plant. *Frontiers Plant Science*, 7, 1105. <http://doi.org/10.3389/fpls.2016.01105>
- Castillo-Sánchez, L. E., Jiménez-Osornio, J. J., y Delgado-Herrera, M. A. (2010). Secondary metabolites of the Annonaceae, Solanaceae and Meliaceae families used as biological control of insects. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 12(3), 445-462.
- Cohen, E. (2006). Pesticide-mediated homeostatic modulation in arthropods. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 85, 21-27.
- Chacón-Hernández, J. C., Arredondo-Valdés, R., Anguiano-Cabello, J. C., Ordaz-Silva, S., Hernández-Juárez, A., y Reyes-Zepeda, F. (2019). Effect of *Magnolia tamaulipana* extract on egg laying and food intake of *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). *International Journal of Acarology*, 46, 108-110. <https://doi.org/10.1080/01647954.2019.1702097>
- Christal-Catalani, G., Vieira, M. R., Santos-de-Camargos, L., Pires-Bomfim, N. C., y Agustini, J. A. (2016). Effects of potassium silicate application on papaya plants in the twospotted spider mite population. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 39, 1-9.
- Chowanski, S., Adamski, Z., Marciniak, P., Rosinski, G., Büyüküzcel, E., Büyüküzcel, K., Falabella, P., Scrano, L., Ventrella, E., Lelario, F., y Bufo, S. A. (2016). Review of bioinsecticidal activity of Solanaceae Alkaloids. *Toxins*, 8:60. <https://doi.org/10.3390/toxins8030060>
- El-Wakeil, N. E. (2013). Botanical pesticides and their mode of action. *Gesunde Pflanzen*, 65, 125-149.

- Elhalawany, A. S., y Dewidar, A. A. (2017). Efficiency of some plant essential oils against the two-spotted spider mite, *Tetranychus urticae* Koch and the two predatory mites *Phytoseiulus persimilis* (A.-H.), and *Neoseiulus californicus* (McGregor). *Egyptian Academic Journal of Biological Sciences*, 10(7), 135-147.
- Fathipour, Y., y Maleknia, B. (2016). Mite Predators. En Omkar (ed.), *Ecofriendly Pest Management for Food Security*. (pp. 329-366). Elsevier, Academic Press. London, UK. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803265-7.00011-7>
- Ferragut, F., y Santonja, M. C. (1989). Taxonomía y distribución de los ácaros del género *Tetranychus* Dufour 1832 (Acari: Tetranychidae), en España. *Boletín de Sanidad Vegetal. Plagas*, 15(3), 271-281.
- Gajger, I. T., y Dar, S. A. (2021). Plant Allelochemicals as Sources of Insecticides. *Insects*, 12, 189. <https://doi.org/10.3390/insects12030189>
- García, A. A., y Carril, E. P. U. (2009). Metabolismo Secundario de Plantas. Reduca (Biología). *Serie Fisiología Vegetal*, 2(3), 119-145.
- Gillott, C. (2018). Insect male mating systems. En Leather S. R., y Hardie J. (eds.), *Insect Reproduction*. pp. 33-55). CRC Press Taylor y Francis, Boca Raton, FL.
- Grbic, M., Leeuwen, T. V., Clark, R. M., et al. (2011). The genome of *Tetranychus urticae* reveals herbivorous pest adaptations. *Nature*, 479, 487-492. <https://doi.org/10.1038/nature10640>
- Heinz-Castro, R. T. Q., Arredondo-Valdés, R., Ordaz-Silva, S., Méndez-Cortés, H., Hernández-Juárez, A., y Chacón-Hernández, J. C. (2021a). Evaluation of ethanol extract of *Moringa oleifera* Lam. as acaricide against *Oligonychus punicea* Hirst (Trombidiformes: Tetranychidae). *Insects*, 12, 476, <http://doi.org/10.3390/insects12050476>
- Heinz-Castro, R. T. Q., Arredondo-Valdés, R., Ordaz-Silva, S., Méndez-Cortés, H., Hernández-Juárez, A., y Chacón-Hernández, J. C. (2021b). Bioacaricidal potential of *Moringa oleifera* ethanol extract for *Tetranychus merganser* Boudreaux (Acari: Tetranychidae) control. *Plants*, 10,1034. <http://doi.org/10.3390/plants10061034>
- Hincapié, C. A., Alarcón, J., Monsalve, Z. I., y Céspedes. C. L. (2019). Actividad acaricida y repelencia de *Blechnum cordatum* (Blechnaceae) contra *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). *Revista Colombiana de Entomología*, 45(2), e7975 <http://doi.org/1025100/socolen.v45i2.7975>
- Hikal, W. M., Baeshen, R. S., y Said-Al Ahl, H. A. H. (2017). Botanical insecticide as simple extractives for pest control. *Cogent Biology*, 3(1), 1404274. <http://doi.org/10.1080/23312025.2017.1404274>
- Humeres, E. C., y Morse, J. G. (2005). Baseline susceptibility of perseas mite (Acari: Tetranychidae) to abamectin and milbemectin in avocadogroves in Southern California. *Experimental and Applied Acarology*, 36(1-2), 51-59. <http://doi.org/10.1007/s10493-005-1545-7>

- Isman, M. B. (2006). Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. *Annual Review Entomology*, 51, 45-66. <http://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151146>
- Golan, K., Sempruch, C., Górska-Drabik, E., Czerniewicz, P., Łagowska, B., Kot, I., Kmiec, K., Magierowicz, K., y Leszczyński, B. (2017). Accumulation of amino acids and phenolic compounds in biochemical plants responses to feeding of two different herbivorous arthropod pests. *Arthropod-Plant Interactions*, 11, 675-682. <https://doi.org/10.1007/s11829-017-9522-8>
- Kortbeek, R. W.J., van der Gragt, M., y Bleeker, P. M. (2019). Endogenous plant metabolites against insects. *European Journal of Plant Pathology*, 154, 67-90.
- Koul, O. (2005). *Insect Antifeedants*. CRC Press, Bota Racon, USA.
- Liu, C., Yang, S., Wang, K., Bao, X., Liu, Y., Zhou, S., Liu, H., Qiu, Y., Wang, T., y Yu, H. (2019). Alkaloids from Traditional Chinese Medicine against hepatocellular carcinoma. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 120(109543),1-15. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2019.109543>
- Lester, P. J., Thistlewood H. M. A., y Harmsen, R. (2000). Some effects of pre-release hostplant on the biological control of *Panonychus ulmi* by the predatory mite *Amblyseius fallacis*. *Experimental and Applied Acarology*, 24, 19-33. <https://doi.org/10.1023/A:1006345119387>
- Lu, J. J., Bao, J.-L., Chen, X.-P., Huang, M., y Wan, Y.-T. (2012). Alkaloids isolated from natural herbs as anticancer agents. *Hindawi Publishing Corporation*, 485042, 1-12. <http://doi.org/10.1155/2012/485042>
- Marshal, D. B., y Lester, P. J. (2001). The transfer of *Typhlodromus pyri* on grape leaves for biological control of *Panonychus ulmi* (Acari: Phytoseiidae, Tetranychidae) in vineyards in Ontario, Canada. *Biological Control*, 20, 228-235. <https://doi.org/10.1006/bcon.2000.0906>
- McMurry, J. E. (2015). Organic chemistry with biological applications. En: *Secondary Metabolites: An Introduction to Natural Products Chemistry* (pp. 1016-1046). Stamford, USA: Cengage Learning Ltd.
- Migeon, A., y Dorkeld, F. (2021). *Spider Mites Web: a comprehensive database for the Tetranychidae*. <http://www1.montpellier.inra.fr/CBGP/spmweb> (Accessed 25/06/2021)
- Montelongo-Ruiz, G., Chacón-Hernández, J. C., ReyesZepeda, F., Octavio-Aguilar, P., Heinz-Castro, R. T. Q., Juárez, L., y Ordaz-Silva, S. (2020). The stimulatory effect of *Chamaedorea radicalis* ethanolic extract on *Tetranychus merganser* Boudreaux (Acari: Tetranychidae). *International Journal of Acarology*, 46(5), 318-321. <http://doi.org/10.1080/01647954.2020.1802511>
- Moraes, M. M., Camara, C., y Silva, M. (2017). Comparative toxicity of essential oil and blends of selected terpenes of *Ocotea* species from Pernambuco, Brazil, against

- Tetranychus urticae* Koch. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 89(3), 1417-1429. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201720170139>
- Mossa, H. (2016). Green pesticides: Essential oils as biopesticides in insect-pest management. *Journal of Environmental Science and Technology*, <http://dx.doi.org/10.3923/jest.2016.354.378>
- Olson, S. (2015). An analysis of the biopesticide market now and where it is going. *Outlook on Pest Management*, 26(5), 203-206. http://dx.doi.org/10.1564/v26_oct_04
- Papapostolou, K. M., Riga, M., Charamis, J., Skoufa, E., Souchlas, V., Ilias, A., Dermauw, W., Ioannidis, P., Van Leeuwen, T., y Vontas, J. (2021). Identification and characterization of striking multiple-insecticide resistance in a *Tetranychus urticae* field population from Greece. *Pest Management Science*, 77(2), 666-676. <http://dx.doi.org/10.1002/ps.6136>
- Pavela, R. (2011). Natural Products as Allelochemicals in Pest Management. En N. K. Dubey, (ed.), *Natural Products in Plant Pest Management* (pp. 134-148). CABI. Preston, UK.
- _____. (2017). Extract from the roots of *Saponaria officinalis* as a potential acaricide against *Tetranychus urticae*. *Journal of Pest Science*, 90, 683-692. <http://doi.org/10.1007/s10340-016-0828-6>
- _____. (2016). History, presence, and perspective of using plant extracts as commercial botanical insecticides and farm products for protection against insects - A Review. *Plant Protection Science*, 52, 229-241. <https://doi.org/10.17221/31/2016-PPS>
- Pavela, R., Dall'Acqua, S., Sut, S., Baldan, V., Ngahang, S. L., Biapa, P. C., Cappellacci, L., Petrelli, R., Nicoletti, M., Canale, A., Maggic, F., y Benelli, G. (2018). Oviposition inhibitory activity of the Mexican sunflower *Tithonia diversifolia* (Asteraceae) polar extracts against the twospotted spider mite *Tetranychus urticae* (Tetranychidae). *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 101, 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.pmp.2016.11.002>
- Pavela, R., Murugan, K., Canale, A., y Benellic, G. (2017). *Saponaria officinalis* - Synthesized silver nanocrystals as effective biopesticides and oviposition inhibitors against *Tetranychus urticae* Koch. *Industrial Crops and Products*, 97, 338-344. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.046>
- Ribeiro, L. P., Zanardi, O. Z., Vendramim, J. D., y Yamamoto, P. T. (2014). Comparative toxicity of an acetogenin-based extract and commercial pesticides against citrus red mite. *Experimental and Applied Acarology*, 64, 87-98. <http://doi.org/10.1007/s10493-014-9810-2>
- Roy, S., Gurusubramanian, G., y Nachimuthu S. K. (2011). Anti-mite activity of *Polygonum hydropiper* L. (Polygonaceae) extracts against tea red spider mite, *Oligonychus coffeae* Nietner (Tetranychidae: Acarina). *International Journal of Acarology*, 37(6), 561-566. <https://doi.org/10.1080/01647954.2010.531764>

- Roy, S., Rahman, A., Phukan, A. K., y Muraleedharan, N. N. (2014). *Terminalia chebula* Retz. (Combretaceae): source of a botanical acaricide against *Oligonychus coffeae* Nietner (Acarina: Tetranychidae). *International Journal of Acarology*, 40(2), 138-144, <http://doi.org/10.1080/01647954.2014.888095>
- Roy, S., y Mukhopadhyay, A. (2012). Bioefficacy assessment of *Melia azedarach* (L.) seed extract on tea red spider mite, *Oligonychus coffeae* (Nietner) (Acari: Tetranychidae). *International Journal of Acarology*, 38(1), 79-86. <http://doi.org/10.1080/01647954.2011.594811>
- Roobakkumar, A., Subramaniam, M. S. R., Babu, A., y Muraleedharan, N. (2010). Bioefficacy of certain plant extracts against the red spider mite, *Oligonychus coffeae* (Nietner) (Acarina: Tetranychidae) infesting tea in Tamil Nadu, India. *International Journal of Acarology*, 36(3), 255-258. <https://doi.org/10.1080/01647951003652592>
- Saha, T., Chandran, N., y Sha, S. (2018). Role of phytochemicals in insect pest management. In Md. A. Ansari (ed.), *Biopesticides and bioagents: novel tools for pest management* (pp. 372-391). Apple Academic Press. Waretown, NJ.
- Sepúlveda-Jiménez, G., Porta-Ducoin, H., y Rocha-Sosa, M. (2003). La participación de los metabolitos secundarios en la defensa de las plantas. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 21(3), 355-363.
- Sepúlveda-Vázquez, J., Torres-Acosta J. F., Sandoval-Castro, C. A., Martínez-Puc, J. F., y Chan-Pérez, J. I. (2018). The importance of secondary metabolites in the control of gastrointestinal nematodes in sheep with emphasis on Yucatán, Mexico. *Journal of the Selva Andina Animal Science*, 5(2), 79-95.
- Sivira A., Sanabria, M. E., Valera, N., y Vásquez, C. (2011). Toxicity of ethanolic extracts from *Lippia origanoides* and *Glicicidia sepium* to *Tetranychus cinnabarinus* (Boisduval) (Acari: Tetranychidae). *Neotropical Entomology*, 40(3), 375-379.
- Tello, V., Vargas, R., y Araya, J. (2009). Parámetros de vida de *Tetranychus cinnabarinus* (Acari: Tetranychidae) sobre hojas de clavel, *Dianthus caryophyllus*. *Revista Colombiana de Entomología*, 35(1), 47-51.
- Thirumurugan, D., Cholarajan, A., Raja, S. S. S., y Vijayakumar, R. (2018). An Introductory Chapter: Secondary Metabolites. En Vijayakumar, R., y Raja, S. S. S (eds.). *Secondary Metabolites - Sources and Applications* (pp. 1-22). IntechOpen, <http://doi.org/10.5772/intechopen.79766>.
- Thoppil, R. J., y Bishay, A. (2011). Terpenoids as potential chemopreventive and therapeutic agents in liver cancer. *World Journal Hepatology*, 3(9), 228-249.
- Treviño-Barbosa, G., Montelongo-Ruiz, G., Heinz-Castro, R. T. Q., Olazarán-Santibáñez, F. E., Méndez-Cortés, H., & Chacón-Hernández, J. C. (2021). Effects of *Equisetum arvense* ethanolic extract on biological parameters of *Tetranychus merganser* Boudreaux. *Southwestern Entomologist*, 46(1), 95-102. <https://doi.org/10.3958/059.046.0109>

- Ware, G. W. (1988). *The pesticide book*. Thomson Publication, USA.
- Yeşilayer, A. (2018). The repellency effects of three plant essential oils against the two-spotted spider mite *Tetranychus urticae*. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(5), 6001-6006.
- Zhang, Z. Q. (2003). *Mites of Greenhouses: Identification, Biology and Control*. CABI Publishing. London, UK.

Capítulo VI

Influencia de las toxinas de *Bacillus thuringiensis* sobre la entomofauna no blanco en cultivos genéticamente modificados¹

Agustín Hernández Juárez²
Miriam Sánchez Vega²

Resumen

Se pensó que el futuro agrícola y, en última instancia, también los ecosistemas naturales se verían afectados por la introducción de cultivos genéticamente modificados para control de insectos; por el desconocimiento de los efectos en los organismos no objetivo a las toxinas Cry insecticidas producida por *Bacillus thuringiensis* Berliner. En el agroecosistema, se presenta toda una red trófica de interacciones y los cultivos Bt no son la excepción, los organismos no blanco que interactúan en estos cultivos pueden entrar en contacto con la endotoxina, al consumir el tejido vegetal de manera directa o indirectamente mediante redes tróficas estando expuestos a la acción de la toxina. Se revisaron riesgos sobre su afectación en la diversidad de especies dentro de los sistemas agrícolas modificados con *B. thuringiensis*. A medida que la adopción y uso de cultivos Bt crece en diversas localidades del mundo, hay un consenso generalizado sobre las evaluaciones de riesgo de las toxinas Cry, quedando demostrado que los efectos de cultivos Bt en campo parecen prácticamente inexistentes, concluyendo que las toxinas Cry no ejercen un efecto negativo sobre los artrópodos no objetivo, con excepciones

¹ Citar este capítulo, como: Hernández-Juárez, A. y Sánchez-Vega, M. (2024). Influencia de las toxinas de *Bacillus thuringiensis* sobre la entomofauna no blanco en cultivos Genéticamente Modificados. En: *Perspectivas multidisciplinarias para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas*. UAT, México, pp. 151-188.

² Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Departamento de Parasitología. Calzada Antonio Narro # 1923, C.P. 25315, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Autor para correspondencia: chinoahj14@hotmail.com

en algunos enemigos naturales selectivos donde se observaron efectos indirectos de Bt, debido a la ausencia de presas (plaga objetivo de Bt) y/o calidad de esta, ocasionando una baja poblacional, aunque se sugiere que estos efectos no son significativos, y su autorregulación es rápida. El análisis general indica que el uso racional de esta tecnología tiene un potencial considerable para reducir impactos negativos al ambiente al disminuir los insumos de productos químicos.

Introducción

Los organismos genéticamente modificados -OGM- son plantas, animales o microorganismos que han sido sometidos a la incorporación o modificación de genes, por lo que la transformación genética implica, identificar, aislar y extraer un gen específico para una característica de interés de otra especie y transferirlo a otra para adquirir una combinación genética novedosa (LBOGM, 2005). Algunos cultivos han sido modificados con potentes técnicas y surgieron como una alternativa de la producción agrícola con la finalidad de incrementar el rendimiento y proveer resistencia a plagas y enfermedades y/o tolerancia a herbicidas (Tsatsakis et al., 2017).

El ADN recombinante para la obtención de OGMs permite incorporar genes y mantener el genoma original, ampliando las posibilidades más allá de las restricciones aplicadas con técnicas convencionales y la polinización cruzada, reduciendo considerablemente el tiempo para el mejoramiento de vegetales. Dentro de las principales necesidades que dieron origen a la modificación genética en cultivos, fue por el manejo de plagas y enfermedades, debido a que adquieren rápidamente resistencia a las medidas de control, sobre todo con plaguicidas de origen químico, y han generado serios problemas ecológicos e incrementado los costos de producción (Fraire, 2006).

Los cultivos *genéticamente modificados* -GM- con resistencia a plagas incorporan genes que codifican toxinas Cry producidas por *Bacillus thuringiensis* (Bt) Berliner (Bacillaceae), que son tóxicas selectivamente para el control de insectos, principalmente de Lepidoptera, Coleoptera o Diptera. A las plantas transgénicas que contienen estos genes se les denomina plantas Bt (Bruck et al., 2006) y son consideradas una opción para manejar plagas agrícolas (Fernandes et al., 2007). Los cultivos Bt simbolizan la primera generación de cultivos transgénicos con efecto insecticida (Sisterson et al., 2007), sembrados por vez primera en 1996, cuyos beneficios socioeconómicos y ecológicos han llevado a un sinnúmero de agricultores de todo el mundo a seguir incrementando la superficie agrícola (ISAAA, 2022). La introducción y uso de cultivos GM en la agricultura, también ha motivado diversas preocupaciones, debates e inquietudes sobre los posibles efectos negativos que se

puedan tener al ambiente y dentro del agroecosistema, por lo que no se descarta que por el uso desmedido y mal manejo de esta tecnología, también se establezcan plagas resistentes, tal como sucede con los plaguicidas químicos (Vázquez, 2009; Álvarez, 2009).

En este sentido, a pesar de que se han llevado a cabo varios trabajos que comprueban el efecto de los cultivos Bt en el ambiente y sus interacciones; aún se investigan los efectos de las toxinas Cry de Bt en los campos, debido a la alta presión de selección que se ha ejercido a través de los años, por lo que las investigaciones continúan en el sentido del estudio de la transferencia de genes Cry a plantas silvestres emparentadas con el cultivo, sobre la duración o persistencia que puedan tener en los terrenos de cultivo o en el ambiente, el desarrollo de la resistencia a estas toxinas y efectos sobre las interacciones biológicas -principalmente entre artrópodos-, los efectos de la proteínas Cry sobre los organismos no plaga y no objetivo de la tecnología Bt, comúnmente conocidos como organismos no blanco (Vázquez, 2009; Andow y Lövei, 2012; Shelton et al., 2012; Arshad et al., 2018).

Los efectos negativos sobre enemigos naturales, como depredadores y parasitoides no blanco con cultivos Bt en campo, parecen prácticamente inexistentes. En general, los efectos negativos de los cultivos Bt en los enemigos naturales son considerados bajos en comparación con los insecticidas convencionales, sin embargo, es fundamental realizar evaluaciones de riesgo adecuadas antes de la introducción de variedades transgénicas en el campo, y se deben considerar los posibles efectos sobre la comunidad de enemigos naturales (Dively y Rose, 2002) importantes en la regulación de plagas y considerados de gran valor ecológico (Dutton et al., 2003; Obrist et al., 2006b) alterando de esa manera las cadenas tróficas y biodiversidad de un ecosistema (Xia et al., 2001; Arshad et al., 2018).

Por estas razones, se presenta como objetivo central de este capítulo revisar y explicar los probables riesgos sobre las poblaciones de artrópodos, la afectación en las relaciones tróficas y sobre la diversidad de especies dentro de los sistemas agrícolas modificados con *B. thuringiensis*, a través del tiempo.

Cultivos genéticamente modificados con *Bacillus thuringiensis*

La ingeniería genética ha permitido avances significativos en la modificación de características en las plantas. Uno de los métodos utilizados es la inserción de genes exógenos, provenientes de organismos diferentes, para conferir a las plantas ciertas cualidades deseables, como resistencia a plagas.

No obstante, también es posible realizar modificaciones genéticas sin necesidad de insertar genes ajenos; en ocasiones se introducen cambios en la misma organización genética de la planta. Lo innovador es identificar genes con

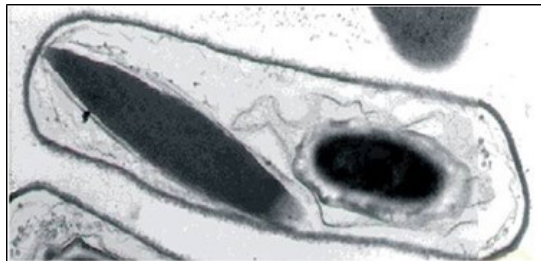
la información deseada y poder insertarlos en organismos para lograr nuevas combinaciones genéticas que jamás se hubieran dado naturalmente; en el caso de *B. thuringiensis*, se ha identificado y utilizado un gen que codifica una toxina insecticida específica (Massieu et al., 2000).

Bacillus thuringiensis y sus características

Es una bacteria que se encuentra ampliamente distribuida en la naturaleza, que mide de 3 a 5 μm de largo por 1 a 1.2 μm de ancho, cuyo metabolismo es aerobia estricta (Figura 3). Es considerada ubicua, y se encuentra en una variedad de ecosistemas, como agua, suelo, hojas de plantas, insectos muertos, telarañas, entre otros. Pertenece al grupo I de Bacilos Gram positivos formadores de endosporas y presenta flagelación peritrica. El ciclo de desarrollo presenta dos fases principales: el crecimiento vegetativo y la esporulación. Durante el crecimiento vegetativo, las bacterias se multiplican mediante bipartición. La esporulación es un proceso de diferenciación en el que la bacteria se transforma en espora. Durante la esporulación, *B. thuringiensis* produce un cuerpo de inclusión paraesporal conocido como cristal (Cry) de naturaleza proteica, con propiedades insecticidas selectivas con bajo impacto al medio ambiente (Joung y Côté, 2000; Iriarte y Caballero, 2001; Soberón y Bravo, 2008). Los cristales de *B. thuringiensis* presentan una gran diversidad de formas, que van desde bipiramidales, rectangulares, triangulares, cúbicos, romboidales, esféricos e irregulares y también varían en tamaño (Iriarte y Caballero 2001).

Figura 3

Bacillus thuringiensis vista al microscopio electrónico de transmisión, espora en proceso y cristal proteico con forma romboide que produce toxinas Cry



Fuente: Soberón y Bravo (2008).

Las proteínas Cry son δ -endotoxinas (Kati et al., 2007; Soberón y Bravo, 2008) que han sido clonadas y secuenciadas en más de 200 genes que se agrupan en al menos 50 grupos diferentes y además de varios subgrupos, cada grupo de proteínas Cry tiende a tener especificidad particular hacia ciertos tipos de insectos (Soberón y Bravo, 2008). El cristal se compone de subunidades polipeptídicas (protoxina) con diferente peso molecular que van desde 27 hasta 140 kilodaltons (kDa), lo que le da al cristal su forma característica. La fracción tóxica se encuentra en la región N-terminal de la proteína y tiene un peso molecular aproximado de 60 a 68 kDa (Arsov et al., 2023). La masa molecular de la protoxina y de la toxina activa puede variar dependiendo de la cepa y del procedimiento utilizado para la activación proteolítica (Hofmann et al., 1988).

La importancia de *B. thuringiensis* radica en la δ -endotoxina para controlar plagas, la cual es tóxica selectiva para larvas de insectos de diversos órdenes como Lepidoptera, Coleoptera, Diptera, Hymenoptera y otros invertebrados como nematodos, gusanos planos y protozoarios (Soberón y Bravo, 2008). A partir de su utilización como bioinsecticida se aislaron y clonaron gran cantidad de genes (Schnepf y Whiteley, 1981) y se creó una clasificación de las δ -endotoxinas basada en la similitud de la secuencia primaria (aminoácidos) y los grados de divergencia filogenética (Crickmore et al., 2021), seguida de la designación jerárquica por letras y números después de la palabra Cry y ordenada por filas, la primera fila que corresponde hasta el 45 % de identidad designada por un número arábigo (Cry1, Cry2), la segunda fila cataloga a las proteínas con una letra mayúscula y corresponde a identidades de 45-78 % (Cry1A, Cry1B), la tercera fila asigna una letra minúscula y corresponde a identidades de 78 a 95 % (Cry1Aa, Cry1Ab, Cry1Ac) y la última fila incluye un número arábigo al final de la nomenclatura indicando más de 95 % de identidad (Cry1Aa1, Cry1Aa2) (Crickmore et al., 2021). Los genes que codifican para las proteínas insecticidas relacionadas con la familia Cry se dividen en cuatro clases principales, cada una con diferentes especificidades estructurales y propiedades insecticidas: clase I específica para el orden Lepidoptera, clase II para Lepidoptera y Diptera, clase III para Coleoptera y clase IV para Diptera (Joung y Côté, 2000). Esta bacteria no es perjudicial para aves, peces ni mamíferos debido a la falta de receptores para la δ -endotoxina en sus sistemas digestivos; que son capaces de degradar la toxina en un corto periodo, aproximadamente en 20 segundos (Crickmore, 2006; Pigott y Ellar, 2007; Pérez et al., 2012).

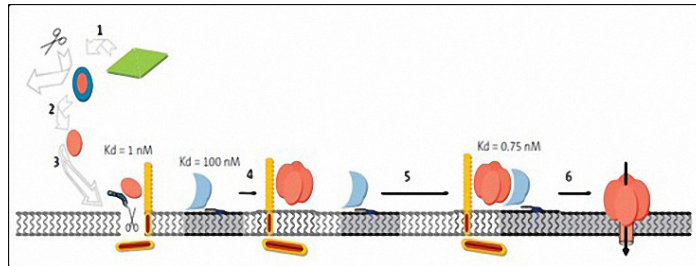
Mecanismo de acción de *Bacillus thuringiensis*

Bacillus thuringiensis es una bacteria que produce una proteína cristalina, cuyo mecanismo de acción se activa cuando las larvas de insectos ingieren el complejo espora-cristal. Esta bacteria sin la proteína cristal no puede invadir al huésped, sin embargo, la capacidad para ser tóxica y específica hacia los insectos está asociada con la solubilización y activación de la toxina Cry en un ambiente ligeramente básico, medio alcalino o alcalino (pH 8.0 o entre 9 a 12) presente en el intestino medio del insecto. Una vez que las protoxinas se disuelven en el intestino del insecto, son sometidas a proteólisis por enzimas llamadas proteasas. En este proceso, la proteólisis de la protoxina resulta en la formación de una toxina más pequeña, que es resistente a la acción de la proteasa (Arsov et al., 2023). Esta toxina activa se conoce como δ -endotoxina y comprende la región N-terminal de la proteína. La especificidad de la toxina activa δ -endotoxina se debe a la estructura tridimensional de la proteína para acoplarse a un componente glicoproteico de la membrana de las células epiteliales del insecto (Shimada et al., 2006; Ibarra 2007; Ba et al., 2018).

La unión de la toxina Cry a los receptores de la cadherina en el intestino medio desencadena una serie de eventos que conducen a la oligomerización de la toxina (Rausell et al., 2004). Una vez que la toxina se ha oligomerizado, se une al receptor aminopeptidasa en la membrana apical de las células epiteliales del intestino medio. Esta unión activa la toxina y desencadena la formación de poros en la membrana celular, canales iónicos o poros líticos. Estos poros permiten el flujo descontrolado de iones a través de la membrana, lo que altera el equilibrio iónico en las células. En particular, se produce una pérdida de iones de potasio (K^+), lo que altera la presión osmótica en las células del epitelio que revisten el epitelio intestinal una vez que las toxinas se insertan a la membrana, seguidos de agua (Figura 4). Además, la entrada excesiva de agua en el citoplasma de las células epiteliales puede desencadenar una distensión excesiva de los organelos membranosos y de la célula en su totalidad, hasta que esta estalla (Joung y Côté, 2000; Kati et al., 2007; Roh et al., 2007; Soberón y Bravo, 2008). El paso crucial en la activación de las proteínas cristalinas es la escisión de las toxinas, que puede variar en las distintas especies de insectos (Perlak et al., 2001). Además de esto, los monómeros de la toxina Cry también parecen promover la muerte celular en los insectos a través de un mecanismo que involucra una vía de señalización de adenilil ciclasa/PKA. Sin embargo, a pesar de este potencial entomopatógeno, ha surgido controversia respecto al estilo de vida del patógeno *B. thuringiensis*, se afirma que requiere la cooperación de otras bacterias comensales dentro del intestino del insecto para ser completamente patógena (De Maagd, 2003; Kiliç y Akay, 2008).

Figura 4

Modo de acción de la proteína Cry de *Bacillus thuringiensis*. 1. Solubilización, 2. Rompimiento de la protoxina, 3. Unión al receptor cadherina, 4. Formación de Pre-poro, 5. Unión receptor aminopeptidasa, 6. Inserción toxina



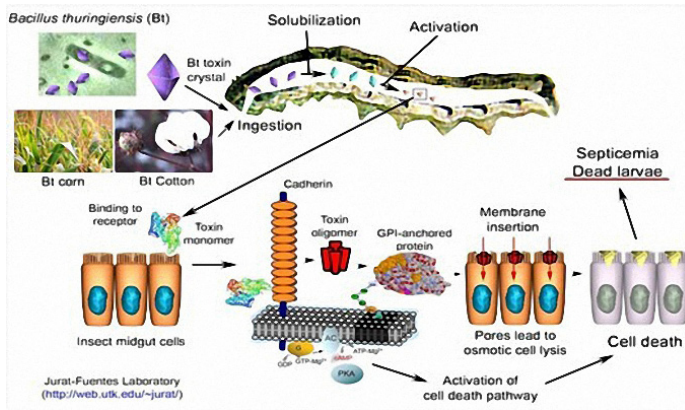
Fuente: Soberón y Bravo (2008).

Cuando unas pocas células del intestino se dañan, pueden ser reemplazadas rápido por células nuevas sin consecuencias fatales. Sin embargo, cuando se produce una exposición masiva a la δ -endotoxina, esta toxina puede destruir amplias áreas del revestimiento del intestino, creando huecos a través de los cuales el contenido alcalino del intestino se filtra hacia la hemolinfa, y viceversa, la hemolinfa puede filtrarse hacia el lumen del intestino.

Estos dos fenómenos dañan al insecto. En primer lugar, el pH estomacal baja por compensación al aumentar el pH de la hemolinfa y la conducción nerviosa cesa. Esta disminución del pH en el estómago del insecto puede interrumpir la función digestiva y paralizar el sistema digestivo. Además, las células epiteliales del intestino se lisan, lo que provoca la evacuación del contenido intestinal. La larva se vuelve flácida y no puede alimentarse adecuadamente. Por otro lado, la disminución del pH en el intestino crea un ambiente favorable para la germinación de las esporas bacterianas que pueden haber sido ingeridas junto con los cristales, iniciando la proliferación de las bacterias en el individuo paralizado y la larva muere por septicemia e inanición después de dos a tres días posteriores a la exposición (Figura 5) (Pigott y Ellar, 2007; Soberón y Bravo, 2008). La muerte de las larvas puede variar según la especie de insecto, la edad y la cantidad de toxina ingerida (Pigott y Ellar, 2007). Sin embargo, incluso si las larvas mueren poco después de la exposición, el cese inmediato de la alimentación ayuda a frenar el daño causado por la larva (Sarwar, 2015).

Figura 5

Modo de acción de la δ -endotoxina de *Bacillus thuringiensis*



Fuente: Jurat-Fuentes (2013).

Las proteínas insecticidas derivadas de *B. thuringiensis* son selectivas y específicas para ciertos organismos y esencialmente no representan un peligro para los organismos no lepidópteros, pocas especies poseen en su aparato digestivo el sitio de unión que reconoce la proteína; por lo tanto, otros organismos digerirán la proteína del mismo modo que digieren cualquier otra. Esto otorga una altísima selectividad a la acción tóxica de Bt, aunque no son completamente específicas especialmente si tienen cierta similitud en los receptores o en los mecanismos de sensibilidad a las proteínas Bt, pero, en general se argumenta que los cultivos Bt no poseen efectos tóxicos sobre organismos no blanco (Ba et al., 2018).

Bacillus thuringiensis, su importancia para el desarrollo de plantas genéticamente modificadas

La viabilidad de las endosporas de *B. thuringiensis* y su patogenicidad puede ser afectada por varios factores ambientales, como la radiación solar, la temperatura de las hojas y el déficit de presión de vapor (Leong et al., 1980), además pueden sobrevivir durante varios años en condiciones adecuadas, aunque la toxicidad de las endosporas disminuye con el tiempo. La presencia y actividad biológica en el suelo pueden mantenerse activas hasta por tres años en suelos estériles. Sin embargo, en suelos no estériles se pierde hasta el 50 % de actividad en los primeros siete días (Schnepf et al., 1998). Las δ -endotoxinas son generalmente resistentes a los diferentes ambientes edáficos, sin embargo, se ha observado que en suelos con un pH de 4.8 estas toxinas no se desarrollan adecuadamente (Joung y Côté, 2000). Debido a la

inestabilidad de la bacteria como un potente insecticida en campo, los avances en ingeniería genética permitieron desarrollar plantas GM para expresar las toxinas Cry de Bt, que confieren resistencia al ataque de insectos, con el objetivo de que la planta transformada exprese cantidad constante de la proteína Cry en diferentes partes de la planta donde los plaguicidas químicos y biológicos no son capaces de llegar, otorgando así un control más efectivo (Permingeat y Margarit, 2005).

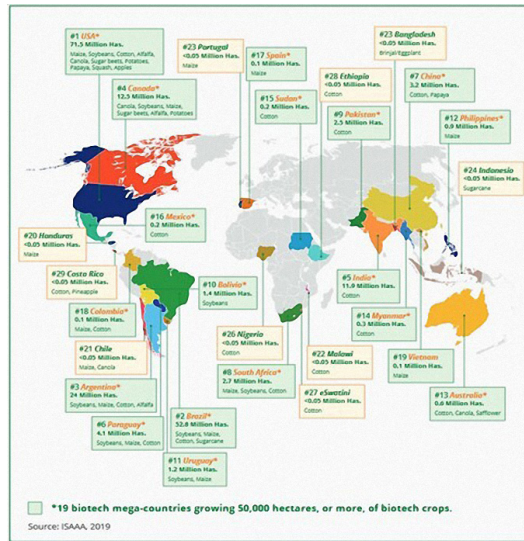
Adopción y eventos Bt de cultivos genéticamente modificados

Pasando de 1.7 millones de hectáreas en 1996 a 190.4 millones de hectáreas de cultivos biotecnológicos en 2019, los cultivos GM son la tecnología de más rápida adopción en la agricultura moderna, con 29 países alrededor del mundo, de los cuales 21 están en vías de desarrollo y 8 son industrializados (Figura 6) y otros 44 que han concedido las aprobaciones regulatorias para cultivos GM para el consumo, ya sea como alimento humano o animal y para su liberación al medio ambiente de manera comercial. Un total de 4 485 autorizaciones regulatorias se han expedido para 403 eventos biotecnológicos en 29 cultivos en 72 países, de las cuales 2 115 son para uso alimenticio -uso directo o procesado-, 1 514 para la alimentación animal -uso directo o procesado- y 856 para la siembra o liberación al medio ambiente. De los países con aprobaciones regulatorias, Estados Unidos tiene el mayor número de eventos GM aprobados con 539, seguidos de Japón (493), Canadá (429), Brasil (328), Corea del Sur (305), Filipinas (244) y México (231). Los principales productores de cultivos genéticamente modificados son Estados Unidos, con 71.5 millones de hectáreas, seguido de Brasil con 52.8 millones de hectáreas, Argentina, Canadá y la India con 24.0, 12.5 y 11.9 millones de hectáreas, respectivamente; México ocupa el lugar 16 con 0.2 millones de hectáreas (Figura 6) (ISAAA, 2022).

El maíz es el cultivo con mayor adopción global, este cuenta con el mayor número de eventos GM aprobados para su siembra y/o experimentación, con 146 en 35 países; seguido por el algodón (66 eventos en 27 países), la papa (49 eventos en 13 países), la soya (38 eventos en 31 países) y la canola (38 eventos en 15 países). De 644 eventos GM registrados para diversos cultivos y características, solo el 33.4% presentan la característica de control de insectos. En México, desde 1996-2019 se aprobaron para su liberación en fase de experimentación, piloto o comercial, 188 eventos en nueve cultivos, de estos, 110 eventos presentan resistencia a insectos en cuatro cultivos, 70 para maíz, seguido del algodón con 21, papa con 13 y soya con 6 eventos (ISAAA, 2022).

Figura 6

Mapa global de países y mega-países con cultivos biotecnológicos en 2019



Nota: *19 mega-países agro-biotecnológicos con un mínimo de 50 000 hectáreas.

Fuente: ISAAA (2022).

Diversidad de la entomofauna en cultivos modificados con *Bacillus thuringiensis* (Bt)

Los insectos, después de las plantas, son el grupo de organismos más abundante y diverso en la mayoría de los ecosistemas (Trautwein et al., 2012; Basset et al., 2013; Nyman et al., 2013). Se estima que en el mundo hay entre 75 mil y un millón de especies de insectos conocidas y cerca de 10 millones aún desconocidas. Se calcula que alrededor del 10% de las especies de insectos conocidos se encuentran en México (Bautista-Zúñiga et al., 2011).

Los artrópodos desempeñan un papel crucial en el ambiente y los ecosistemas, (Whitfield et al., 2012), y los insectos son una parte importante de este Phylum, abundantes en diversos ecosistemas. Algunas especies son nocivas para la salud humana y la agricultura; sin embargo, no se puede generalizar esta característica a todos los insectos, los insectos desempeñan diversas funciones ecológicas importantes, destacando como polinizadores, además también actúan como degradadores en materia orgánica animal y vegetal y desempeñan un papel como depredadores dentro de los ecosistemas, incluyendo a los agroecosistemas y áreas verdes urbanas (Ruiz-Montoya et al., 2014). Los sistemas agrícolas sustentan

gran diversidad de artrópodos tanto fitófagos, como aquellos que proveen servicios ecosistémicos (Vázquez, 2009). Los cultivos Bt, albergan una rica diversidad de plagas insectiles, depredadores y parasitoides. Se han informado alrededor de 145 plagas de insectos y ácaros en los cultivos Bt (Arshad et al., 2015). Pero algunos estudios no han encontrado diferencias significativas en las plagas insectiles entre cultivos Bt y no Bt (Shudong et al., 2003; Abro et al., 2004; Hofs et al., 2004; Sharma y Pampapathy, 2006).

Los cultivos que expresan toxinas de la bacteria *B. thuringiensis*, desarrollados para controlar lepidópteros y/o coleópteros plaga, tienen la oportunidad de ejercer un posible efecto sobre aquellas especies emparentadas con las especies objetivo del cultivo Bt, así como también en aquellos fitófagos no emparentados, enemigos naturales, artrópodos que sirven como agentes útiles en la polinización entre plantas y aquellos que son parte de la cadena alimenticia como los saprófagos o descomponedores. Desde la adopción de los cultivos Bt, estudios han descrito investigaciones con la finalidad de evaluar el impacto y/o efectos de las toxinas Cry sobre la diversidad entomofaunística, mediante bioensayos en condiciones de laboratorio e invernadero, que permiten evaluar el efecto de las toxinas en diferentes parámetros como la mortalidad, el desarrollo, la longevidad y la supervivencia de los insectos objetivo y no blanco. En campo, se han estudiado las interacciones tróficas (planta-fitófago-enemigo natural), y se ha comparado la abundancia y diversidad de artrópodos en campo en los cultivos Bt y su contraparte convencional, estos estudios pueden abarcar un ciclo de cultivo o periodos más largos, como 2-3 años, y siguen las prácticas agronómicas comunes en la región de investigación. Además de los enfoques tradicionales, se han realizado estudios con técnicas moleculares como análisis de ADN y pruebas de ELISA, para investigar las interacciones a nivel molecular dentro de las redes alimenticias y se han hecho recopilaciones y discusiones de estos estudios mediante meta-análisis (Vázquez, 2009).

Impacto de los cultivos genéticamente modificados en artrópodos no blanco

De las principales preocupaciones sobre el impacto ecológico de los cultivos GM, destaca la posible pérdida o reducción de la diversidad genética asociada a estos cultivos, especialmente por el impacto que pueden causar estas plantas; la preocupación se centra en el alcance de la hibridación de los cultivos GM, ya que estas pueden invadir a otras especies a través de ciclos repetitivos de hibridación causando su contaminación genética (Singh et al., 2006). Otro riesgo ecológico importante de la liberación de los cultivos GM es el posible efecto negativo sobre los organismos que no son plaga (Wisniewsky et al., 2002; Singh et al., 2006).

Existen datos limitados disponibles para una revisión integral del impacto de sustentabilidad de los cultivos GM bajo diversas condiciones; sin embargo, estudios previos reportan, que no existen efectos negativos sobre la diversidad y abundancia de la artropofauna asociada a cultivos GM (Gatehouse, 2008; Arshad et al., 2014; FAO, 2015; Arshad et al., 2015; Arshad et al., 2018; Hernández-Juárez et al., 2018; Hernández-Juárez et al., 2019; Aguirre et al., 2021; Sánchez-Vega et al., 2021).

Las toxinas Cry de Bt actúan de forma permanente sobre las poblaciones de la plaga y de otros lepidópteros, lo que incrementa la presión de selección y la presencia de resistencia de los insectos (Arshad et al., 2018). En este sentido, se perdería la efectividad de los cultivos Bt, así como la posibilidad de utilizarlos como bioplaguicidas (Gould, 1998). Pero en el caso de los artrópodos no blanco u objetivo, las posibles vías de exposición de las toxinas Cry son: alimentarse de material vegetal y productos vegetales transgénicos, y estar en contacto con los exudados de la planta, de las flores o de los cadáveres de larvas jóvenes infectadas; la transferencia de toxinas Bt a niveles tróficos más altos a lo largo de la red alimentaria, puede generar efectos indirectos por presión de selección. Por el contrario, algunas de las especies, al no tener una asociación directa con la planta, no se verían afectadas (Andow y Zwahlen, 2006; Romeis et al., 2009; Lang y Otto, 2010). El riesgo para los organismos no objetivo está en función de la exposición a las toxinas Cry y la toxicidad de estas (Romeis et al., 2009).

Aunque el objetivo de los cultivos Bt es controlar a lepidópteros plaga principalmente, se han realizado estudios para determinar los efectos sobre las poblaciones de otros lepidópteros que no se consideran plaga o que no son insectos blanco a esta tecnología, por lo que hay un grupo de lepidópteros considerados no objetivo, que pueden tener alto riesgo a los eventos de los cultivos Bt. Los resultados de estos estudios mostraron que el cultivo Bt a gran escala no produce gran riesgo para este tipo de lepidópteros, por lo que, desde el punto de vista de la conservación de la naturaleza, las especies de lepidópteros que son plagas secundarias pueden no ser tan valiosas como otros lepidópteros (protegidos) no objetivo en una evaluación de riesgos ambientales de cultivos Bt (Angharad et al., 2002; Lang y Otto, 2010).

Se ha estudiado el efecto de las toxinas Cry sobre organismos no blanco que incluye a las plagas secundarias; Ba et al. (2018) hacen un análisis de varios reportes en los que se menciona la influencia de las toxinas Cry (Cry1Ab y Cry2A), sin embargo, no encontraron expresión o efectos tóxicos en ninguno de los casos, para los organismos puestos a prueba en los experimentos. Por ejemplo, los posibles efectos tóxicos de Cry1Ab y Cry2Ab en las abejas se han estudiado exhaustivamente y se ha llegado a la conclusión de que no hay efectos negativos a ningún nivel por las toxinas Cry (OECD, 2007) (Tabla 17).

Tabla 17

Efecto de las proteínas Cry 1Ab y Cry 2A en especies seleccionadas de insectos no objetivo (traducido de Ba et al., 2018)

Orden	Especies no blanco	Tipo de proteína Cry	Dosis	Variable respuesta	Referencia
Coleoptera	<i>Propylea japonica</i> (Thunberg, 1781)	Cry 2Ab Proporcionado en dieta artificial	500 µg·mL ⁻¹	Desarrollo ninfal	Zhao et al., 2016
Coleoptera	<i>Hippodamia convergens</i> (Guérin-Ménéville, 1842)	Cry 1Ab Dosis única	NOEL>20 ppm	Mortalidad	CERA, 2011
Hemiptera	<i>Orius majusculus</i> (Reuter, 1879)	Cry 1Ab suministrado por hojas, polen o insectos fitófagos	Sin especificar	Supervivencia, desarrollo, fecundidad y fertilidad	Lumbierres et al., 2012
Hemiptera	<i>Orius tantulus</i> (Motschulsky, 1863)	Trips alimentados con arroz Cry 1Ab y polen de arroz Cry 1Ab.	Sin especificar	Duración de las ninfas, longevidad de los adultos y fecundidad de las hembras	Raen et al., 2016
Hemiptera	<i>Orius insidiosus</i> (Say, 1832)	El depredador <i>Thrips tabaci</i> (Lindeman, 1889) fue alimentado con hojas de algodón Cry 2Ab.	43.637 ng·mg ⁻¹	Desarrollo ninfal	Kumar et al., 2014
Homoptera	<i>Aphis gossypii</i> (Glover, 1877)	Cry 2Ab Proporcionado en dieta artificial	500 µg·mL ⁻¹	Desarrollo ninfal	Zhao et al., 2016
Hymenoptera	<i>Apis mellifera</i> (Linnaeus, 1758)	Se proporcionó polen de algodón con genes apilados Cry1Ac/ Cry2Ab	Hasta 92 ng·g ⁻¹	Desarrollo ninfal	Niu et al., 2013
Hymenoptera	<i>Apis mellifera</i> (Linnaeus, 1758)	Cry1Ab/Sin especificar	Sin especificar	Mortalidad de adultos y larvas	Duan et al., 2008a
Hymenoptera	<i>Apis mellifera</i> (Linnaeus, 1758)	Cry1Ab/Sin especificar	20 ppm	Mortalidad de adultos y larvas	Duan et al., 2008a
Hymenoptera	<i>Apis mellifera</i> (Linnaeus, 1758)	Cry2A/Sin especificar	50 µg·mL ⁻¹	Mortalidad de adultos y larvas	Duan et al., 2008a
Hymenoptera	<i>Brachymeria intermedia</i> (Ness, 1834)	Cry 1Ab Dosis única en la dieta	NOEL>20 ppm	Mortalidad en adultos	CERA, 2011
Diptera	<i>Exorista civilis</i> (Rondani, 1859)	Se utilizaron larvas de <i>Mythimna separata</i> (Walker, 1865) alimentadas con 25 µg·g ⁻¹ de Cry1Ab, las cuales fueron proporcionadas al parasitoide	Sin especificar	Parasitismo y desarrollo del parasitoide	Jiang et al., 2016

Orden	Especies no blanco	Tipo de proteína Cry	Dosis	Variable respuesta	Referencia
Lepidoptera	<i>Bombyx mori</i> (Linnaeus, 1758)	Se proporcionó polen de algodón con genes apilados Cry1Ac/Cry2Ab	9.2 ng·g ⁻¹	Desarrollo ninfal	Niu et al., 2013
Neuroptera	<i>Chrysoperla carnea</i> (Stephens, 1836)	Polen de maíz Bt que expresa Cry 1Ab	5 ng·mL ⁻¹	Supervivencia de adultos y fecundidad de hembras	Li et al., 2008
Neuroptera	<i>Chrysoperla carnea</i> (Stephens, 1836)	Polen de maíz Bt que expresa Cry 1Ab	Sin especificar	Supervivencia de adultos y fecundidad de hembras	Romeis et al., 2014a, b
Neuroptera	<i>Chrysoperla rufilabris</i> (Burmeister, 1839)	Suministrado con larvas de <i>Trichoplusia ni</i> (Hübner, 1800–1803) y <i>Spodoptera frugiperda</i> (J. E. Smith, 1797) alimentados con algodón Bt, que expresa las toxinas Cry1Ac/Cry2Ab	Sin especificar	Supervivencia de adultos y larvas, y fecundidad de hembras	Tian et al., 2013

Nota: *NOEL: nivel sin efecto (adverso) observado, o la dosis más alta que no produce efecto tóxico.
Fuente: Ba et al. (2018).

Se ha concluido que los efectos de los cultivos Bt son menores expresados a largo plazo, ya que la presión de selección y el manejo contribuirán a que se manifiesten desequilibrios en las poblaciones de los insectos blanco, en primera instancia, y en los agroecosistemas, posteriormente, pero de forma lenta; para ello se requiere que en la producción de cultivos Bt, exista un enfoque integrado y diferenciado para la gestión agrícola, asociado a numerosos beneficios para la productividad y resiliencia (FAO, 2015).

Con base en la evaluación de riesgos de los cultivos transgénicos que expresan Bt, es poco probable que los artrópodos que se alimentan del floema, por ejemplo, estén expuestos a las proteínas Bt, independientemente de su toxicidad inherente, ya que no hay evidencia de que las proteínas Bt se transporten en la savia del floema de los cultivos que expresan Bt (Lawo et al., 2009; Romeis et al., 2009; Huesing et al., 2011). En consecuencia, es poco probable que los depredadores de los artrópodos que se alimentan del floema estén en riesgo porque la exposición es insignificante. Del mismo modo, no habría exposición de las toxinas Cry a los parasitoides de huevos, ya que no se ha encontrado que los huevos de insectos contengan proteínas Cry (Romeis et al., 2013). Por lo tanto, solo los depredadores o

parasitoides que consumen directamente material vegetal o que atacan a herbívoros que se han alimentado de tejido vegetal probablemente estén expuestos a las proteínas insecticidas (Ba et al., 2018).

Estudios de caso sobre diversidad de gremios de artrópodos en cultivos Bt

Fitófagos no blancos

Del análisis hecho en los estudios de cultivos Bt con la inserción de alguna toxina Cry, se detectó un primer caso controversial respecto a los efectos de las toxinas Cry, sobre organismos no blanco. Losey et al. (1999) observaron que el polen del maíz Bt depositado sobre otras plantas cerca de los campos de producción podía ser ingerido por organismos no objetivo que consumen estas plantas; realizaron ensayos en laboratorio con larvas de mariposa monarca *Danaus plexippus* L. (Lepidoptera: Danaidae), alimentadas con hojas de *Asclepias curassavica* L. espolvoreadas con polen de maíz Bt (N4640 =176), ajustado la densidad de granos de polen a los campos de maíz, registrando supervivencia y peso, encontraron que las larvas alimentadas sobre hojas espolvoreadas de polen Bt presentaban una supervivencia del 56%, significativamente menor a las alimentadas con polen no Bt o en las hojas sin polen, además de menor crecimiento y peso larval. Al respecto, concluyeron que estos resultados tenían potencial implicación para la conservación de la mariposa monarca, pues esta se alimenta exclusivamente en *Asclepias*, que generalmente crecen en los bordes de los campos de maíz y agregaron que era imperativo reunir datos necesarios para evaluar los riesgos asociados con esta tecnología.

Wraight et al. (2000) realizaron estudios con polen del evento MON810 que expresa la toxina Cry1Ab sobre el papilionide negro *Papilio polyxenes* F. (Papilionidae) y comparó los resultados con el evento 176 que expresa la misma toxina, encontraron que el segundo evento (176) presentó un efecto adverso en las larvas de *P. polyxenes*, debido a que contenía 40 veces más endotoxina que el MON810. Al respecto mencionaron que, si bien existe un potencial de impacto no deseado sobre especies emparentadas al objetivo de la tecnología Bt, tal impacto en campo puede ser manejado mediante el uso de constructos con expresión limitada en los tejidos y con selección de eventos, dentro de sus conclusiones indicaron que el polen Bt presenta baja concentración de toxinas y que es improbable que afecte las poblaciones silvestres de *P. polyxenes*; además, indicaron que se debe investigar más este campo y comparar estos riesgos con los ocasionados por los plaguicidas convencionales y otras tácticas de control de plagas, pues los agroquímicos constituyen un importante problema para el medio ambiente.

Wraight et al. (2000) coincidieron con Hansen y Obrycki (2000) al evaluar las toxinas del maíz Bt, presentaron evidencia de que el polen depositado en plantas de *Asclepias syriaca* L. en campo provocaba mortalidades significativas en larvas de la mariposa monarca *D. plexippus*, y para las larvas sobrevivientes no hubo efectos sub-letales sobre los adultos, por lo que mencionaron que los efectos ecológicos de los cultivos Bt deben ser evaluados a fondo, antes de ser plantados en áreas extensas.

Zangerl et al. (2001) retomaron estos estudios, para esto evaluaron el evento 176 de maíz Bt que expresa la toxina Cry1Ab sobre larvas de la mariposa monarca usando *A. syriaca* para el experimento y la mariposa de cola larga *P. polyxenes*, usando *Pastinaca sativa* L. para la prueba, y se confirmó lo encontrado por Wraight et al. (2000) para este evento, sugiriendo que este maíz puede tener efectos adversos sobre los lepidópteros debido a la alta expresión de la endotoxina, lo que lo hace muy tóxico, lo cual se puede manejar con selección de otros eventos. Al respecto, Sears et al. (2001) mencionan que los estudios previos sobre la mariposa monarca son insuficientes para evaluar el riesgo, ya que la asignación de riesgo solo se puede lograr cuando la probabilidad de respuesta tóxica puede ser adecuadamente expresada y la probabilidad de exposición estimada a través de observaciones necesarias, motivo por el cual durante dos años estudiaron el impacto del polen de híbridos comerciales de maíz Bt sobre poblaciones de la mariposa monarca, encontraron que el potencial de riesgo para esta mariposa se limitaba al maíz Bt (evento 176) que expresa la Cry1Ab en un nivel suficiente para mostrar efectos mensurables, concordando con Wraight et al. (2000) y Zangerl et al. (2001). Excluyendo de esto a los eventos MON810 y Bt11, que también expresan la toxina Cry1Ab, y a los eventos Dbt418, Cbh351 y Tc1507, que expresan la proteína Cry1Ac, Cry9c y Cry1F, respectivamente, y que presentan menos toxicidad para la monarca; aclarando que el impacto a la mariposa monarca seguirá siendo bajo o insignificante, ya que la exposición general de las larvas de monarca al polen Bt es baja, resultados corroborados por Hellmich et al. (2001) en pruebas de laboratorio con polen de maíz Bt (evento 176, MON810, Bt11, Dbt418, Cbh351 y Tc1507) y las toxinas purificadas Cry1Ab, Cry1Ac, Cry9c y Cry1F con tres métodos de evaluación sobre la monarca, usando *A. curassavica* para la prueba.

Hellmich et al. (2001) observaron que las toxinas purificadas Cry9c y Cry1F son relativamente poco tóxicas al primer estadio de la monarca, mientras que son sensibles a las toxinas Cry1Ab y Cry1Ac; por otro lado, el ensayo con polen de maíz solo presentó un efecto negativo en el evento 176 y el análisis del resto de los genotipos de maíz sugieren que el polen de maíz con la Cry1Ab, Cry1F y Cry9c no presenta efectos agudos sobre la mariposa monarca en campo, por lo que

sugirieren que los contaminantes de polen, también pueden influir drásticamente en la supervivencia de las larvas y producir falsos resultados.

En estudios con artrópodos asociados al cultivo de maíz, Dutton et al. (2002) encontraron que, debido a la ingestión de la toxina Cry1Ab de maíz Bt por *Tetranychus urticae* Koch, *Rhopalosiphum padi* L. y *Spodoptera littoralis* Boisduval, esta solo afectó la tasa de mortalidad y ocasionó un retraso en el desarrollo de *S. littoralis*, este último el más emparentado con la plaga objetivo de este cultivo, siendo consistente con los resultados de Lewandowski y Górecka (2008) en su estudio de la influencia del maíz Bt MON810 sobre el desarrollo del pulgón *R. padi*, sin diferencia entre el número de pulgones que se desarrollaron en maíz Bt y con maíz convencional.

Pons et al. (2005) estudiaron durante tres años las fases del ciclo de vida, los daños asociados y la abundancia de pulgones (*R. padi*, *Sitobion avenae* Fabricius, *Metopolophium dirhodum* Walker, *Macrosiphum euphorbiae* Thomas, *Sipha maydis* Passerini, *Schizaphis graminum* Rondani, *A. gossypii*, *Aphis fabae* Scopoli y *Hyalopterus amygdali* Blanchard), chicharritas (*Zyginidia scutellaris* Herrich-Schaffer), gusanos cortadores (*Agrotis segetum* Denis & Schiffermüller) y gusanos de alambre (*Agriotes lineatus* L.), plagas que no son el objetivo del maíz Bt (Cry1Ab), encontrando diferencias en cada grupo estudiado, y concluyeron que el maíz Bt no tiene un impacto negativo sobre la biocenosis no blanco e incluso en algunas especies como *Z. scutellaris*, muy abundante en el maíz Bt, la modificación genética favorece a las chicharritas, correlacionada con mayor abundancia de biomasa vegetal. La abundancia de la plaga secundaria *Chaetocnema pulicaria* (Melsheimer) durante el desarrollo de tres híbridos de maíz Bt y convencionales no difirió entre parcelas, demostrando que el maíz transgénico que expresa toxinas Bt no afecta negativamente la abundancia de *C. pulicaria* (Hernández-Juárez et al., 2018).

Lang y Otto (2010) realizaron un análisis sobre los efectos reportados de las toxinas Cry sobre lepidópteros no blanco, tanto para estudios de laboratorio, como de campo. En casi la mitad de todas las observaciones en laboratorio, se encontraron efectos adversos en diferentes proporciones en las larvas de lepidópteros no blanco. El comportamiento de las larvas y todos los parámetros para las etapas adultas pueden ser afectados negativamente, pero estas variables rara vez se midieron, debido a que el número de observaciones fue bastante bajo para los parámetros de la etapa adulta, la mayoría de los experimentos terminaron antes de la eclosión de las pupas. En general, los experimentos de laboratorio que detectaron efectos adversos sobre lepidópteros no blanco tuvieron más repeticiones por tratamiento, estudiaron más larvas tanto por tratamiento como de forma general, las larvas estuvieron expuestas por más tiempo a Bt y los experimentos duraron más, sin embargo, a pesar de ello no presentaron diferencias estadísticas entre los tratamientos, solo una tendencia con

respecto al tiempo de exposición a las toxinas Cry. Los efectos sobre el tiempo de desarrollo de las larvas se asociaron con la duración de la pupa y no por los efectos causados por la dieta con toxinas Cry y estos fueron correlacionados con los efectos sobre el tamaño adulto. En experimentos de campo se registró un efecto adverso sobre las larvas de lepidóptero no blanco en el 21 % de todas las observaciones. Se encontraron efectos adversos en todas las categorías de datos con la excepción de la tasa del consumo de las larvas, el tamaño de los adultos y la proporción de sexos de adultos. Sin embargo, para la proporción de sexos de adultos, los valores sesgados en cuanto a la presencia de machos se consideraron perjudiciales, pero la ausencia de efectos fue el resultado de la disminución en tamaños, de datos supervivencia / mortalidad, masa corporal y algún aspecto del tiempo de desarrollo de las larvas que se registraron con mayor frecuencia. El comportamiento de las larvas no se estudió en ningún experimento de campo. Concluyeron que los estudios disponibles hasta el momento son escasos como para evaluar el riesgo de casos raros; en vista de las 160 000 descritas o medio millón de especies de lepidópteros en todo el mundo, evidentemente, solo una parte de la fauna de lepidópteros estaría expuesta a los cultivos Bt.

Enemigos naturales no blanco

Dentro de las preocupaciones de los cultivos Bt, está el efecto que pudieran causar en los enemigos naturales. El cultivo Bt puede actuar como un refugio para los depredadores de insectos y las arañas en la producción a gran escala, donde el cultivo como el algodón no Bt puede ser rociado con insecticidas (Armstrong et al., 2000).

El análisis de artrópodos específicos o especies de interés particular en el que se ha hecho mayor estudio es sin duda la crisopa verde *C. carnea* y la chinche pirata *Orius* spp.

De las primeras investigaciones sobre la oviposición del barrenador europeo del maíz *Ostrinia nubilalis* Hbn. y el impacto del maíz transgénico con la toxina Cry1Ab sobre la depredación y parasitismo de enemigos naturales fue llevada a cabo por Orr y Landis (1997), quienes indicaron que la distribución y el tamaño de masas del fitófago se vio afectada por el maíz Bt, mientras que la depredación y el parasitismo de masas de huevos no presentó diferencias entre parcelas de maíz Bt y convencional. Pilcher et al. (1997), Orr y Landis (1997) y Candolfi et al. (2004) reportaron para el depredador *C. carnea* no haber encontrado efecto negativo sobre la abundancia de crisópidos en maíz Bt (Cry1Ab), bajo condiciones de campo, y Pilcher et al. (1997) al alimentar a este depredador directamente con polen Bt y polen convencional bajo condiciones de laboratorio no encontraron diferencias en el desarrollo y supervivencia entre materiales.

Hilbeck et al. (1998) estudiaron el desarrollo de *C. carnea* sobre dos presas (*O. nubilalis* y *S. littoralis*) alimentadas con plantas de maíz Bt (Cry1Ab) e híbridos convencionales; encontraron una mayor mortalidad de este depredador alimentado con presas desarrolladas en tejidos Bt y una prolongación en el tiempo de desarrollo del depredador cuando se alimentó con *O. nubilalis* alimentada con tejido Bt, pero no con *S. littoralis*; esto debido a que *O. nubilalis* es el blanco de esta variedad de maíz y que al estar enfermas, presentaron deficiencias nutricionales, causando un mal desarrollo en el depredador.

Posteriormente, en otro estudio similar, Hilbeck et al. (1999), de nueva cuenta alimentaron a *C. carnea* con larvas de *S. littoralis* para estudiar los efectos de la toxina de la Cry1Ab y las protoxinas de Cry1Ab y Cry2A; indicaron que hubo mayor mortalidad y retraso del desarrollo de los inmaduros de *C. carnea* al ser alimentados con *S. littoralis*, asumiendo que se debió a un aumento en la intoxicación de las larvas del lepidóptero. Estos hallazgos demuestran que los estudios de niveles tritróficos son necesarios para evaluar la compatibilidad a largo plazo de las plantas insecticidas con importantes enemigos naturales.

Al respecto, Obrist et al. (2006b) mencionan que en este tipo de estudios es importante verificar la exposición real del depredador, es decir, la presencia de la toxina biológicamente activa en la presa fitófaga, por consiguiente investigaron la absorción de la toxina Cry1Ab por las larvas de *C. carnea* después de consumir dos fitófagos alimentados con maíz Bt (*T. urticae* y *S. littoralis*). Por medio de una prueba inmunológica (ELISA), confirmaron la ingestión de la toxina Bt por larvas de *C. carnea*, a través de las presas alimentadas con maíz Bt, demostrando que la actividad biológica de la toxina se mantiene después de la ingestión por las especies fitófagas estudiadas.

Dutton et al. (2002) encontraron que la ingestión de la toxina Cry1Ab de maíz Bt a través de *T. urticae* y *R. padi* no afectaban el desarrollo del depredador *C. carnea*, sino que aumentaban la mortalidad. El retraso en el desarrollo se observó cuando las crispas se alimentaron con larvas de *S. littoralis* criadas en maíz Bt. Aunque los riesgos ecológicos del maíz Bt sobre *C. carnea* son muy discutidos, se aprecia una combinada interacción entre la calidad de presa al estar intoxicada con la toxina Cry1Ab, no contando con los requerimientos nutricionales necesarios para el desarrollo del depredador.

Aunque se sabe que los cultivos Bt son eficaces contra las plagas objetivo y no tiene una influencia directa sobre los enemigos naturales (Akhurst et al., 2003), existen opciones de que la población de enemigos naturales puede verse indirectamente influenciada por el cambio de comportamiento de los organismos no objetivo o por la eliminación de sus presas / huéspedes (Schuler et al., 2001; Dutton

et al., 2002; Sisterson et al., 2007). Algunos estudios de laboratorio han informado efectos indirectos sobre la población de enemigos naturales a través de presas / huéspedes no saludables, pero al mismo tiempo la población puede aumentar debido al incremento del parasitismo de presas / huéspedes no saludables debido a la toxina Bt (Schuler et al., 2001; Arshad et al., 2018).

Dutton et al. (2003) diseñaron un protocolo más detallado para evaluar los efectos del maíz Bt que expresa la proteína Cry1Ab, tomando como ejemplo a *C. carnea*, generando evidencia de que este maíz no representa ningún tipo de riesgo para este depredador. Debido a estudios previos que demostraron que las larvas de *C. carnea* se veían afectadas negativamente al depredar larvas de lepidópteros que habían sido alimentados con maíz transgénico que expresa la toxina Cry1Ab.

Romeis et al. (2004) desarrollaron un bioensayo que les permitió alimentar con altas concentraciones de la toxina (10 000 veces mayor y que se había demostrado que impactaba negativamente al depredador), directamente al depredador; no observaron ningún efecto tóxico directo de la toxina Cry1Ab, sugiriendo que las larvas de *C. carnea* no son sensibles a la Cry1Ab y que los efectos negativos del maíz Bt reportados anteriormente fueron producto de la calidad de la presa y no de un efecto tóxico directo y consideraron que las larvas de lepidópteros objetivo del maíz Bt no son una presa importante para *C. carnea* en campo, concluyendo que este maíz que expresa la toxina Cry1Ab no representa un riesgo para el depredador.

Lo anterior, apoya los resultados de Dutton et al. (2002), y dan respuesta a los resultados de Meir y Hilbeck (2001), quienes encontraron en un estudio tritrofico de preferencia entre *C. carnea* y las presas *S. littoralis* y *R. padi* alimentadas con maíz Bt (Cry1Ab) y su línea isogénica convencional, resaltando que ambas presas no fueron afectadas por la toxina Cry1Ab expresada en el maíz, y que el depredador en el tercer estadio presentó una preferencia significativa por *S. littoralis* alimentada con maíz convencional, y aunque no es significativo, el segundo estadio presentó la misma tendencia, mientras que para *R. padi* el depredador no presentó preferencia al ser alimentado tanto en maíz Bt como convencional, proponiendo que esto es debido a la ausencia de la proteína Bt en el floema, mientras que, prefirió *R. padi* que *S. littoralis*, independientemente del maíz Bt y convencional.

Lewandowski y Górecka (2008), al estudiar la influencia del maíz Bt MON810 sobre el desarrollo de *C. carnea* alimentada con áfidos de la especie *R. padi* criada en el maíz Bt, no observaron efectos secundarios de la toxina sobre el depredador; indicando que es necesario el diseño de experimentos para comprobar la fecundidad y las condiciones de su progenie.

Lövei et al. (2009) revisaron el impacto de los cultivos GM sobre los enemigos naturales no blanco bajo condiciones de laboratorio a través de un meta-análisis,

declarando que el 75 % de las comparaciones de grupos de enemigos naturales y las respuestas dadas, no presentaron efectos neutrales debido a la toxina Cry y a los inhibidores de proteínasa. Se presentó un sesgo continuo hacia pocas especies de depredadores, especialmente *C. carnea* y los parasitoides resultaron más susceptibles que los depredadores con mayor número de efectos negativos que positivos. Los autores declararon que faltaban estudios, ya que solo había datos de 48 especies de enemigos naturales y la base de datos aún estaba lejos de ser suficiente para predecir el efecto de una toxina Bt en los enemigos naturales, por lo que era prematuro sugerir que los resultados de unos pocos estudios se podían generalizar para todas las toxinas Bt (Cry1Ab, Cry1Ac, Cry2A, Cry3Aa, Cry3Bb y Cry9c).

Al respecto, Shelton et al. (2009a), preocupados por este análisis, por los métodos inadecuados utilizados y la falta de contexto ecológico, mencionan que un estudio experimental debe formular correctamente una hipótesis, diseño experimental y método de prueba para tener credibilidad en la interpretación de resultados, factores que no aborda el análisis de Lövei et al. (2009), sino que su metodología implica que todos los estudios son igualmente válidos y deben recibir igual peso, proporcionando a cada estudio un análisis estadístico, concluyendo que el papel de Lövei et al. (2009) con una interpretación sesgada y errónea de datos publicados sobre los efectos en no blancos, no sirven a las comunidades científicas o reglamentarias, debido a cuestiones de tipo metodológico e interpretación, considerando que algunos efectos sobre artrópodos son por efecto de la toxina Cry, haciendo referencia a una mala interpretación de los resultados y análisis metodológico-estadístico y con la consideración de que dichos efectos son insignificantes y que en dado caso estos efectos deben considerarse como indirectos por una mala calidad de la presa, la cual es objetivo de la toxina (Andow et al., 2009; Shelton et al., 2009b; Andow y Lövei, 2012).

Al respecto, Shelton et al. (2012) agregan que Lövei et al. (2009), Andow et al. (2009) y Andow y Lövei (2012) no proporcionan ninguna base para su propuesta de que las pruebas de toxicidad bajo condiciones de laboratorio no son apropiadas para evaluar el riesgo de artrópodos no blanco, concordando en esto con Tian et al. (2012), quienes mencionaron que la mayoría de los estudios no han mostrado efectos en los enemigos naturales, y algunos estudios de laboratorio han sido erróneamente interpretados como un efecto directo a la toxicidad de Bt y no como un efecto en la calidad de la presa.

Duan et al. (2008a), en su meta-análisis de estudios de los efectos de los cultivos Bt en los organismos no blanco, apoyaron los estudios de laboratorio afirmando que los cultivos Bt insecticidas muestran efectos que son muy compatibles con o más consistentes que los estudios de campo, con la ventaja de

que los estudios de laboratorio exploran todas las vías ecológicamente relevantes de exposición.

Otro organismo con mayor representación de los que se ha hecho una gran diversidad de estudios es la chinche pirata del género *Orius*, al respecto, Zwahlen et al. (2000) evaluaron los efectos del maíz Bt que expresa la toxina Cry1Ab sobre *O. majusculus*, a través de las presas *Anaphothrips obscurus* (Müller) y tisanópteros plaga del maíz, alimentados con este maíz Bt e isogénico convencional. En este estudio no encontraron diferencias significativas en la mortalidad ni desarrollo de *O. majusculus* alimentado con ambas presas criadas en maíz Bt, y dada la baja mortalidad en general, confirman que la metodología fue adecuada y la proponen como una prueba estandarizada eficiente de los efectos secundarios de las plantas transgénicas sobre depredadores pequeños como *Orius* spp.

De la Poza et al. (2005) evaluaron el impacto del maíz Bt (Cry1Ac) sobre la abundancia de depredadores; usando trampas *pitfall* y observaciones visuales encontraron a Anthocoridae, Coccinellidae, Araneae y Carabidae con mayor representación, y dejaron en claro que no hay tendencia de un efecto negativo del maíz Bt, sugiriendo que este maíz es compatible con los depredadores naturales del agroecosistema. Obrist et al. (2006a), en campos de maíz Bt (evento 176), evaluaron el impacto de la toxina Cry1Ab sobre depredadores; a su vez, verificaron la transmisión de la toxina en la cadena alimenticia, mediante fitófagos, muestras de tejido vegetal y de depredadores, usando a *O. majusculus* para evaluar la absorción de la toxina Bt y su persistencia después de alimentarse de varias fuentes. El contenido de la toxina en áfidos, trips y saltamontes fue insignificante, en comparación con la araña roja que contenía tres veces más toxina que los niveles de las hojas de maíz, confirmando que la toxina puede ser transferida a *Orius* spp, *Chrysoperla* spp y *Stethorus* sp, y solo aplica para el caso del acaro cuando está disponible. De igual forma, confirmaron la transferencia a *O. majusculus* a través de la fuente de alimento, en contraste otros depredadores en campo como hemerobidos, *Nabis* sp., *Hippodamia* sp., *Demetrias* sp, no contenían niveles de toxina, incluso al alimentarse de ácaros, dejando con este estudio una visión de la ecología alimentaria de los artrópodos en el sistema maíz.

Duan et al. (2008b) evaluaron en un bioensayo los riesgos del maíz Bt (MON863) que expresa la proteína Cry3Bb1 para control de gusanos de las raíces *Diabrotica* spp (Chrysomelidae) en artrópodos no blanco, usando para este ensayo a *O. insidiosus* expuesto a una dosis máxima de la toxina Cry3Bb1 de 930 µg/g de dieta, dosis de riesgo 10 veces mayor que la más alta concentración en campo prevista para esta toxina en el maíz MON863. El análisis reveló que la proteína no interfiere en el desarrollo de las ninfas al estado adulto y no ejerce ningún efecto adverso en la sobrevivencia de las ninfas. En contraste, todas las ninfas que se alimentaron con

polen de abeja con una dosis de inhibidor de la proteasa E64 o arsenato de potasio, murieron sin llegar a la etapa adulto, demostrando que el maíz Bt (MON863) no representa un riesgo para *O. insidiosus*.

Se han investigado los efectos del maíz Bt en la familia Coccinellidae, por su importancia depredadora de plagas. Los estudios de Pilcher et al. (1997) reportaron no haber encontrado efectos perjudiciales sobre el desarrollo y supervivencia de *Coleomegilla maculata* De Geer y *O. insidiosus* al ser alimentados con polen de maíz Bt, que expresa la toxina Cry1Ab durante dos años de evaluación, sugiriendo que el polen antes, durante y después de la liberación de la polinización no afecta el movimiento del enemigo natural, concluyendo que se necesitan efectos crónicos y reproductivos durante varias generaciones antes de concluir que el polen de maíz Bt no tiene efecto sobre los insectos depredadores.

Lundgren y Wiedenmann (2005) examinaron el efecto en la interacción tritrófica en diversos parámetros de desarrollo del depredador *C. maculata* (duración larval, sobrevivencia a la pupación, peso seco *postmortem* adulto, movilidad de adultos y fecundidad) a través de su presa el pulgón *Rhopalosiphum maidis* (Fitch) alimentado con maíz Bt MON863 (Cry3Bb1), encontrando que los parámetros de desarrollo de *C. maculata* fueron similares al ser alimentado con la presa criada en maíz Bt y convencional, a pesar de una reducción en el peso de la presa criada en el MON863 de 33 %; aunque no se discutió la razón de esto, demostraron que esta reducción no era suficiente para tener un impacto en *C. maculata* y mediante el uso de pruebas de *ImmunoStrip* detectaron la toxina del MON863 en la planta Bt, pero no en los pulgones o en *C. maculata* alimentados en maíz Bt a través de la interacción; concluyendo que el maíz Bt con la Cry3Bb1 no causa degradaciones agudas o crónicas en particular en *C. maculata*, sugiriendo que este resultado no necesariamente se aplica a otros enemigos naturales.

Durante dos años, Al-Deeb y Wilde (2003), en un estudio con maíz Bt (Cry3Bb1) para control de *Diabrotica virgifera virgifera* LeConte, no encontraron diferencias en el número de *C. maculata*, *O. insidiosus*, *H. convergens* y *Scymnus* spp., llegando a concluir que el maíz Bt para control de gusano de la raíz no tiene efectos nocivos sobre los artrópodos benéficos.

Al-Deeb y Wilde (2003) coinciden con Ahmad et al. (2006), quienes mediante estudios de campo y laboratorio determinaron el efecto del maíz Bt (Yieldgard) que expresa la proteína Cry3Bb1 sobre depredadores no blanco del suelo. Al respecto, no se encontraron diferencias significativas en la abundancia entre el maíz Bt y convencional de *O. insidiosus*, *C. maculata*, *H. convergens* y *Scymnus* spp, y no se observaron diferencias en la tasa de depredación entre masticadores y chupadores. En laboratorio, el estudio con *C. maculata* alimentada con polen Bt,

polen convencional y áfidos verdes *S. graminum*, para evaluar la duración de la larva, pupa, el tiempo de desarrollo de la eclosión de huevos hasta emergencia de adultos, el porcentaje de sobrevivencia y longitud de élitros, no se observaron diferencias significativas en el desarrollo de los dos primeros instares; sin embargo, el tercer estadio se prolongó un día y el cuarto dos días cuando se alimentó solamente con áfidos, el resto de los parámetros no presentó diferencias entre los tratamientos. Además, se realizó un estudio con los carábidos *Harpalus caliginosus* F. y *Harpalus pensylvanicus* De Geer, alimentados con comida para perro rociado con polen de maíz Bt y no Bt, no observándose diferencias entre tratamientos, sugiriendo que este híbrido podría utilizarse en un sistema integrado de plagas.

Li y Romeis (2010) evaluaron los efectos del maíz Bt (MON88017) diseñado para expresar la toxina Cry3Bb1 para resistencia a gusanos de la raíz *D. virgifera* virgifera sobre la catarina *Stethorus punctillum* (Weise), mediado por su presa *T. urticae*, especie reconocida que acumula altas concentraciones de toxina Bt, encontrando que el desarrollo y reproducción de los parámetros poblacionales del ácaro no difirieron al alimentarse en maíz Bt y convencional isogénico, obteniendo el mismo resultado con el depredador, no encontrando diferencias en la sobrevivencia y desarrollo de larvas, sobrevivencia y peso de adultos al ser alimentado por más de dos meses con *T. urticae* en maíz Bt e isogénico, mientras que la hembra de *S. punctillum* presentó un corto periodo de pre-oviposición, y un aumento en la fertilidad y fecundidad alimentadas con ácaros de maíz Bt, no aclarando este resultado, concluyendo que el depredador *S. punctillum* no presenta un efecto adverso por la alimentación de ácaros que contienen la toxina Cry3Bb1.

Álvarez-Alfageme et al. (2011) realizaron un estudio de toxicidad bajo condiciones de laboratorio con la versión purificada de las toxinas Cry1Ab y Cry3Bb1 insertadas en maíz Bt, en los eventos MON810 y MON88017 respectivamente, y el maíz Bt. En primera instancia, este estudio correspondió a la alimentación de larvas de la catarina *Adalia bipunctata* L. con *T. urticae* alimentados en las plantas de maíz MON810 y MON88017, y una segunda sección consistió en alimentar directamente las larvas de *A. bipunctata* con las proteínas Cry purificadas en una concentración 10 veces mayor a la detectada en los ácaros alimentados con maíz Bt. El análisis de resultados exhibió que la ingestión de las proteínas a través de los fitófagos por *A. bipunctata* no afectó la mortalidad, peso o el tiempo de desarrollo, confirmando estos resultados cuando el depredador fue alimentado directamente con una solución sacarosa con las toxinas purificadas, concluyendo este estudio no haber encontrado ninguna prueba de que las larvas de *A. bipunctata* sean sensibles a las toxinas Cry1Ab y Cry3Bb o que el maíz que expresa estas toxinas afecten negativamente a este depredador.

Tian et al. (2012) realizaron un estudio alimentando a la catarina *C. maculata* con larvas de *S. frugiperda* desarrolladas en maíz Bt, que expresa la toxina Cry1F y su línea isogénica convencional, para evaluar su potencial depredador por más de dos generaciones; además, analizaron mediante pruebas de ELISA en los insectos la presencia de la proteína Cry1F, encontrando que la duración de las larvas y pupa, peso de adulto y fecundidad de la hembra de *C. maculata* no presentaron diferencias entre presas alimentadas con los dos tipos de maíz (Bt y no Bt) y que la proteína no causa ningún efecto sobre las larvas del depredador a pesar de contener 20-32 ng de Cry1F g^{-1} de peso fresco del insecto, demostrando que la proteína Cry1F del maíz Bt no afecta a este depredador y que la proteína no se acumula, sino que se diluye cuando se transfiere durante la interacción trófica.

Pilcher et al. (2005) investigaron el efecto del maíz Bt (evento 176 y Bt11) que expresa la toxina Cry1Ab en la abundancia de los depredadores *C. maculata*, *Cycloneda munda* Say, *O. insidiosus*, *C. carnea* y el parasitoides *Macrocentrus cingulum* Brischke; hubo pocas diferencias en la abundancia de los depredadores mencionados entre los campos de maíz Bt y los campos de maíz convencional. Sin embargo, se observó un impacto significativo en la abundancia del parasitoides *M. cingulum* especialista en el barrenador europeo del maíz por la presencia del maíz Bt, concluyendo que los efectos en la abundancia de estos enemigos naturales no fueron inesperados, debido a sus diferentes comportamientos de forrajeo y dependencia de la presencia del barrenador europeo del maíz como fuente de alimento u hospedero de *M. cingulum*.

Fernandes et al. (2007) investigaron el efecto de los híbridos de maíz Bt (7590-Bt11 y Avant-ICP4), que contienen genes que codifican las proteínas Cry1Ab y VIP3A, sobre una amplia diversidad de depredadores y parasitoides asociados al maíz. Los investigadores no encontraron ningún efecto negativo en las poblaciones de *Doru luteipes* Scudder, un depredador común del maíz, ni en el Orden Hemiptera que incluye las familias Reduviidae, Lygaeidae, Pentatomidae y Anthocoridae, con una predominancia en abundancia de *O. insidiosus*. Tampoco se observaron efectos negativos en las poblaciones de catarinas (Coccinellidae), arañas (Araneae), escarabajos de tierra (Carabidae) y escarabajos tigre (Cicindelidae). Además del estudio de los depredadores, los investigadores evaluaron el efecto de los híbridos de maíz GM y sus contrapartes isogénicas no transgénicas en los parasitoides, no encontrando un efecto negativo en el parasitismo de huevos de *Helicoverpa zea* Boddie por *Trichogramma* sp. (Trichogrammatidae), concluyendo que los híbridos de maíz Bt, que expresa las proteínas insecticidas Cry1Ab y VIP3A, no causan una reducción en los principales depredadores y parasitoides asociados al maíz.

Balog et al. (2010) investigaron durante tres años el mecanismo de los patrones subyacentes -abundancia, riqueza de especies, diversidad y similitud- de escarabajos estafilínidos en maíz Bt (MON810), que expresa la proteína Cry1Ab, y maíz convencional isogénico. Reportaron que este maíz Bt no influye sobre la estructura de la comunidad en general, tanto de estafilínidos depredadores de áfidos de la especie *R. padi* y parasitoides, encontrando numéricamente más depredadores de áfidos *R. padi* en maíz isogénico, no presentando diferencias significativas para los depredadores en ambos tipos de maíz.

Peterson et al. (2011) en su meta-análisis encontraron que la abundancia de arañas en el follaje no se ve afectada en el maíz Bt, al estar expuesta a la toxina Cry a través de múltiples vías, incluyendo fitófaga, polen, el consumo de la toxina de Bt que contiene la presa y exudados del suelo en la red alimenticia de detritos. Hubo un mayor número de arañas tanto en el follaje como epigeas en el maíz Bt en comparación de híbridos tratados con insecticidas.

Conclusión

Se pensó que los ecosistemas naturales se verían afectados por la introducción a gran escala de genes totalmente nuevos y productos génicos en nuevas combinaciones, debido a que se desconocían los efectos en los organismos no objetivo de la proteína insecticida de Bt, aunque si bien los cultivos transgénicos han demostrado beneficios agrícolas significativos, es importante continuar con las evaluaciones de riesgos y los estudios de impacto ambiental para comprender mejor los posibles efectos en los organismos no objetivo y en los ecosistemas naturales. Esto ayuda a garantizar que se minimicen los riesgos y se puedan aprovechar de manera responsable los beneficios de la ingeniería genética en la agricultura.

La recopilación de literatura indica que cada situación es muy diversa, y que además los factores a tomar en cuenta son distintos, durante el análisis del efecto de las toxinas Bt sobre artrópodos no blanco; una de ellas es la expresión de la diversidad de toxinas insertadas en el germoplasma y las condiciones medioambientales en las que está presente el cultivo, otra de las consideraciones es el diseño de la investigación, la biología y ecología de alimentación de cada artrópodo evaluado. Tomando en cuenta estos parámetros, y a medida que la adopción y uso de cultivos Bt crece en diversas localidades del mundo, existe un consenso generalizado en la comunidad científica sobre las evaluaciones de riesgo de las proteínas Cry insertadas en los cultivos Bt, concluyendo que las proteínas Cry son toxinas específicas para ciertos insectos plaga y no ejercen un efecto significativo sobre los artrópodos no blanco; además, se ha demostrado que el uso racional de la tecnología de cultivos Bt y el cuidado adecuado de los cultivos pueden tener

un potencial considerable para reducir los impactos no deseados en términos generales. Al utilizar cultivos Bt, los agricultores pueden reducir la necesidad de aplicar insecticidas químicos convencionales, lo que resulta en una disminución de los insumos de productos químicos y, en consecuencia, en una reducción de los impactos ambientales asociados con su uso.

Los cultivos transgénicos Bt pueden contribuir a preservar la biodiversidad del agroecosistema en relación con otras opciones de manejo de plagas, al ofrecer una alternativa más sostenible para el manejo de plagas. Sin embargo, si se presentara un posible impacto del cultivo Bt en los artrópodos no blanco, se debería enfatizar exactamente lo sucedido, analizando caso por caso, ya que hay impactos no deseados en cualquier tipo de enfoque de control de plagas; por lo tanto, los riesgos y beneficios del cultivo GM deben ser balanceados y tomados en cuenta como una herramienta y no como un todo, buscando el beneficio de la salud humana, el bienestar social y el cuidado del medio ambiente.

Una situación consistente es que se presentan mayores interrupciones al medio ambiente en general por efecto de la aplicación de insecticidas, tema de comparación con los cultivos Bt y del cual muchos autores hicieran referencia como punto de partida, sugiriendo que estos pueden causar más daño a los artrópodos no blanco que el cultivo Bt, puesto que comunidades de artrópodos no blanco afectados por la toxina Bt mostraron cierta recuperación, cuestión que no sucedió con la aplicación de insecticidas químicos convencionales. En algunos taxones se observaron efectos indirectos por efecto del Bt, debido a que estos ejercen un control satisfactorio de la plaga para la que están diseñados, ocasionando la ausencia de presas y por ende a sus enemigos naturales, sobre todo aquellos que son selectivos, como es el caso de los parasitoides que sufren una baja en su densidad poblacional. Sin embargo, dos hipótesis resaltan: la primera es que presentan un proceso de autorregulación, muy común en estos organismos y la segunda es que su abundancia se ve reducida por efecto indirecto del cultivo Bt debido a la ausencia de la presa y/o a la calidad de la misma, aunque se sugiere que estos efectos no deseados suceden de igual forma con la aplicación de ingredientes químicos y este último además ocasiona un mayor daño a otras taxas de insectos ya sea benéficos o fitófagos no blanco.

Se presentó gran consistencia en diversos estudios sobre el efecto negativo del caso del maíz Bt evento 176 que expresa la toxina Cry1Ab sobre la artropodofauna, corroborándose que este evento de maíz expresaba una gran cantidad de toxina -40 veces más que otros eventos no perjudiciales-. De acuerdo con la base de datos revisada en abril de 2022 del International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications (ISAAA, 2022), este evento en la actualidad solo está autorizado para su siembra y su uso en Estados Unidos, Canadá, Argentina y Japón

desde 1995, 1996, 1998 y 2007, respectivamente; además en Australia, China, la Unión Europea, Nueva Zelanda, Filipinas, Sudáfrica, Corea del Sur, Suiza, Taiwán y Zambia se emplea directamente en alimentos procesados.

Referencias

- Abro, G. H., Syed, T. S., Tunio, G. M. y Khuhro, M. A. (2004). Performance of transgenic Bt cotton against insect pest infestation. *Journal of Biotechnology*, 3, 75-81.
- Aguirre, L. A., Hernández-Juárez, A., Cerna, E., Flores, M., Frías, G. A. y Ochoa, Y. M. (2021). Diversity, abundance, and effect of genetically modified maize over nontarget predators in Sinaloa, Mexico. *Journal of Entomological Science*, 56(4), 541-555.
- Ahmad, A., Wilde, G. E., Whitworth, R. J. y Zolnerowich, G. (2006). Effect of corn hybrids expressing the coleopteran specific Cry3Bb1 protein for corn rootworm control on aboveground insect predators. *Journal of Economic Entomology*, 99(4), 1085-1095.
- Akhurst, R. J., James, W., Bird, L. J. y Beard, C. (2003). Resistance to the Cry1Ac delta-endotoxin of *Bacillus thuringiensis* in the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Economic Entomology*, 96, 1290-1299.
- Al-Deeb, M. A. y Wilde, G. E. (2003). Effect of Bt Corn Expressing the Cry3Bb1 Toxin for Corn Rootworm Control on Aboveground Nontarget Arthropods. *Environmental Entomology*, 32(5), 1164-1170.
- Álvarez-Alfageme, F., Bigler, F. y Romeis, J. (2011). Laboratory toxicity studies demonstrate no adverse effects of Cry1Ab and Cry3Bb1 to larvae of *Adalia bipunctata* (Coleoptera: Coccinellidae): the importance of study design. *Transgenic Research*, 20, 467-479.
- Álvarez, E. R. (2009). *Aspectos ecológicos, biológicos y de agrobiodiversidad de los impactos del maíz transgénico*, Laboratorio de Genética Molecular, Desarrollo y Evolución de Plantas, Instituto de Ecología, UNAM. www.cec.org
- Andow, D. A. y Lövei, G. (2012). Cry toxins in transgenic plants have direct effects on natural enemies in the laboratory. *Environmental Entomology*, 41(5), 1045-1047.
- Andow, D. A. y Zwahlen, C. (2006). Assessing environmental risks of transgenic plants. *Ecology Letters*, 9, 196-214.
- Angharad, M. R., Gatehouse, J., Ferry, N., Romaan, J. M. y Raemaekers, A. (2002). The case of the monarch butterfly: a verdict is returned. *Trends in Genetics*, 18, 249-251.
- Armstrong, J. S., Leser, J. y Kraemer, G. (2000). An inventory of the key predators of cotton pests on Bt and non-Bt cotton in West Texas. En: *Proceedings of Beltwide Cotton Conference* (pp. 1030-1033). San Antonio, USA.
- Arshad, M., Arif, M. J., Gogi, M. D., Abdu-ur-Rehman, M., Zain-ul-Abdin, Wakil, W. y Saeed, N. A. (2014). Seasonal abundance of non-target natural enemies in transgenic Bt and conventional cotton. *Pakistan Entomologist*, 36, 37-40

- Arshad, M., Khan, R. R., Aslam, A. y Akbar, W. (2018). Transgenic Bt cotton: effects on target and non-target insect diversity. En *Past, present, and future trends in cotton breeding*, 155-174.
- Arshad, M., Zain-ul-Abdin, Gogi, M. D., Arif, M. J. y Khan, R. R. (2015). Seasonal pattern of infestation by spotted bollworm, *Earias insulana* (Boisd.) and pink bollworm, *Pectinophora gossypiella* (Saund.) in field plots of transgenic Bt and non-Bt cottons. *Pakistan Journal of Zoology*, 47, 177-186
- Arsov, A., Gerginova, M., Paunova-Krasteva, T., Petrov, K., y Petrova, P. (2023). Multiple cry Genes in *Bacillus thuringiensis* Strain BTG Suggest a Broad-Spectrum Insecticidal Activity. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(13), 11137.
- Ba, M. N., Huesing, J. E., Tamò, M., Higgins, T. J., Pittendrigh, B. R. y Murdock, L. L. (2018). An assessment of the risk of Bt-cowpea to non-target organisms in West Africa. *Journal of Pest Science*, 91(4), 1165-1179.
- Balog, A., Kiss, J., Szekeres, D., Szénási, A. y Markó, V. (2010). Rove beetle (Coleoptera: Staphylinidae) communities in transgenic Bt (MON810) y near isogenic maize. *Crop Protection*, 29, 567-572
- Basset, Y., Cizek, L., Cuénoud, P., Diham, R. K., Gillhaumon, F., Missa, O. y Novotny, V. (2013). Arthropod diversity in a tropical forest. *Science*, 338, 1481-1484.
- Bautista-Zúñiga, F., Palacio-Prieto, J. L. y Delfin-Gonzales, H. (2011). *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (2da ed.). México, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Bruck, J. D., Lopez, M. D., Lewis L. C., Prasifka J. R. y Gunnarson, R. D. (2006). Effects of Transgenic *Bacillus thuringiensis* Corn and Permethrin on Nontarget Arthropods. *Journal of Agricultural and Urban Entomology*, 23(3), 111-124.
- Candolfi, M. P., Brown, K., Grimm, C., Reber, B. y Schmidli, H. (2004). A Faunistic Approach to Assess Potential Side-Effects of Genetically Modified Bt-Corn on Non-Target Arthropods Under Field Conditions. *Biocontrol Science and Technology*, 14(2), 129-170.
- CERA. (2011). *A review of the environmental safety of the Cry1Ab Protein*. Center for Environmental Risk Assessment. ILSI Research Foundation, 1-17.
- Crickmore, N. (2006). Beyond the spore-past and future developments of *Bacillus thuringiensis* as a biopesticide. *Journal of Applied Microbiology*, 101, 616-619.
- Crickmore, N., Berry, C., Panneerselvam, S., Mishra, R., Connor, T. R., y Bonning, B. C. (2021). A structure-based nomenclature for *Bacillus thuringiensis* and other bacteria-derived pesticidal proteins. *Journal of Invertebrate Pathology*, 186:107438. <https://doi.org/10.1016/j.jip.2020.107438>
- De la Poza, M., Pons, X., Farinós, G. P., López, C., Ortego, F., Eizaguirre, M., Castañera, P. y Albajes, R. (2005). Impact of farm-scale Bt maize on abundance of predatory arthropods in Spain. *Crop Protection*, 24, 677-684.

- De Maagd, R. A., Bravo, A., Berry, C., Crickmore, N. y Schnepf, H. E. (2003). Structure, diversity, and evolution of protein toxins from spore forming entomopathogenic bacteria. *Annual Review of Genetics*, 37, 409-433.
- Dively, G. P. y Rose, R. (2002). Effects of Bt transgenic and conventional insecticide control on the non-target natural enemy community in sweet corn. *1st International Symposium on Biological Control of Arthropods*. Forest Health Technology Enterprise Team. United States.
- Duan, J. J., Marvier, M., Huesing, J. E., Dively, G. y Huang, Z. Y. (2008a). A metaanalysis of effects of Bt crops on honeybees (Hymenoptera: Apidae). PLoS One. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001415>
- Duan, J. J., Teixeira, D., Huesing, J. E. y Jiang, C. (2008b). Assessing the Risk to Nontarget Organisms from *Bt* Corn Resistant to Corn Rootworms (Coleoptera: Chrysomelidae): Tier-I Testing with *Orius insidiosus* (Heteroptera: Anthracoridae). *Environmental Entomology*, 37(3), 838-844.
- Dutton, A., Klein, H., Romeis, J. y Bigler, F. (2002). Uptake of Bt-toxin by herbivores feeding on transgenic maize and consequences for the predator *Chrysoperla carnea*. *Ecological Entomology*, 27(4), 441-447.
- Dutton, A., Romeis, J. y Bigler, F. (2003). Assessing the risks of insect resistant transgenic plants on entomophagous arthropods: Bt-maize expressing Cry1Ab as a case study. *BioControl*, 48, 611-636.
- FAO. (2015). *Measuring Sustainability in Cotton Farming Systems Towards a Guidance Framework*. Food and Agriculture Organization of the United Nations International Cotton Advisory Committee. Rome, Italia. www.fao.org/publications.
- Fernandes, O. A., Faria, M., Martinelli, S., Schmidt, F., Ferreira, C. V. y Moro, E. G. (2007). Short-term assessment of Bt maize on non-target arthropods in Brazil. *Scientia Agricola*, 64(3), 249-255.
- Fraire, V. S. (2006). Un panorama del tema de los organismos genéticamente modificados: bondades y riesgos con las plantas transgénicas. *Revista de Investigación Científica*, 2(2), 1-20. www.uaz.edu.mx/revistainvestigacion
- Gatehouse, J. (2008). Biotechnological prospects for engineering insectresistant plants. *Plant Physiology*, 146, 881-887.
- Gould, F. (1998). Sustainability of Transgenic Insecticidal Cultivars: Integrating Pest Genetics and Ecology. *Annual Review of Entomology*, 43, 701-726.
- Hansen J., L. C. y Obyrcki, J. J. (2000). Field deposition of Bt transgenic corn pollen: lethal effects on the monarch butterfly. *Oecologia*, 125, 241-248.
- Hellmich, R. L., Siegfried, B. D., Sears, M. K., Stanley-Horn, D. E., Daniels, M. J., Mattila, H. R., Spencer, T., Bidne, K. G. y Lewis, L. C. (2001). Monarch larvae sensitivity to *Bacillus thuringiensis* purified proteins and pollen. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(21), 11925-11930.

- Hernández-Juárez, A., Aguirre, L. A., Cerna, E., Flores, M., Frías, G. A., Landeros, J. y Ochoa, Y. M. (2019). Abundance of Non-Target Predators in Genetically Modified Corn. *Florida Entomologist*, 102(1), 96-100.
- Hernández-Juárez, A., Aguirre, L. A., Cerna, E., Landeros, J., Frías, G. A., Flores, M. y Ochoa, Y. M. (2018). Effect of Transgenic Maize on Abundance of the Corn Flea Beetle, *Chaetocnema pulicaria* Melsheimer, as a non-Target Pest. *Southwestern Entomologist*, 43(4), 841-846.
- Hilbeck, A. (2001). Implications of transgenic, insecticidal plants for insect and plant biodiversity. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 4, 43-61.
- Hilbeck, A., Baumgartner, M., Fried, P. M. y Bigler, F. (1998). Effects of transgenic *Bacillus thuringiensis* corn-fed prey on mortality and development time of immature *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae). *Environmental Entomology*, 27(2), 480-487.
- Hilbeck, A., Moar, W. J., Pusztai-Carey, M., Filippini, A. y Bigler, F. (1999). Prey-mediated effects of Cry1Ab toxin and protoxin and Cry2A protoxin on the predator *Chrysoperla carnea*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 91, 305-316.
- Hofmann, C., Lüthy, P., Hütter, R. y Pliska, V. (1988). Binding of the delta endotoxin from *Bacillus thuringiensis* to brush-border membrane vesicles of the cabbage butterfly (*Pieris brassicae*). *European Journal of Biochemistry*, 173, 85-91.
- Hofs, J. L., Schoeman, A. y Vaissayre, M. (2004). Effect of Bt cotton on arthropod biodiversity in south African cotton fields. *Communications on agricultural and applied. Biological Sciences*, 69, 191-194.
- Huesing, J., Romeis, J. y Ellstrand, N. (2011). Regulatory considerations surrounding the deployment of Bt-expressing cowpea in Africa: report of the deliberations of an expert panel. *GM Crops Journal of Pest Science*, 2, 211-224.
- Ibarra, J. E. (2007). Uso de bacterias en el control biológico. En Rodríguez-del-Bosque, L. A. y H. C. Arredondo-Bernal (eds.), *Teoría y Aplicación del Control Biológico* (pp. 144-159). México: Sociedad Mexicana de Control Biológico.
- Iriarte, J. y Caballero, P. (2001). Biología y Ecología de *Bacillus thuringiensis*. En: Caballero, P. y Ferre J. (eds.), *Bioinsecticidas: Fundamentos y aplicaciones de Bacillus thuringiensis en el Control Integrado de Plagas* (pp. 15-44). PHITOMA-España, Navarra, España.
- International Service for the Acquisition of Agri-Biotech Applications -ISAAA-. (2022). *Brief No. 55: Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2019. Executive Summary. Biotech Crops Drive Socio-Economic Development and Sustainable Environment in the New Frontier*. ISAAA: Ithaca, NY. <https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/55/executivesummary/default.asp>
- Jiang, X. F., Zhang, L., Yang, H., Sappington, T. H., Cheng, Y. y Luo, L. Z. (2016). Biocontrol of the oriental armyworm, *Mythimna separata* by the tachinid fly *Exorista*

- civilis* is synergized by Cry1Ab protoxin. *Scientific Reports*, 6, 26873. <https://doi.org/10.1038/srep26873>
- Joung, K. B. y Côté, J. C. (2000). A review of the environmental impacts of the microbial insecticide *Bacillus thuringiensis*. *Technical Bulletin Canada*, 29, 1-16.
- Jurat-Fuentes, J. L. (2013). *Characterization of Cry toxin mode of action*. Department of Entomology and Plant Pathology. The University of Tennessee. Knoxville, Tennessee. En: <http://web.utk.edu/~jurat/Btresearchtable.html>.
- Kati, H., Sezen, K., Nalcacioglu, R. y Demirbag, Z. (2007). A Highly Pathogenic Strain of *Bacillus thuringiensis* serovar kurstaki in Lepidopteran Pests. *Journal of Microbiology*, 45(6), 553-557.
- Kiliç, A. y Akay, M. T. (2008). A three-generation study with genetically modified Bt corn in rats: Biochemical and histopathological investigation. *Food and Chemical Toxicology*, 46(3), 1164-1170.
- Kumar, R., Tian, J. C., Naranjo, S. E. y Shelton, A. M. (2014). Effects of Bt cotton on *Thrips tabaci* (Thysanoptera: Thripidae) and its predator, *Orius insidiosus* (Hemiptera: Anthocoridae). *Journal of Economic Entomology*, 107, 927-932.
- Lang, A. y Otto, M. (2010). A synthesis of laboratory and field studies on the effects of transgenic *Bacillus thuringiensis* (Bt) maize on non-target Lepidoptera. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 135(2), 121-134.
- Lawo, N. C., Wäckers, F. L. y Romeis J. (2009). Indian Bt Cotton varieties do not affect the performance of cotton Aphids. *PLoS One*, 4:e4804. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004804>
- Leong, K. L. H., Cano, R. J. y Kubinski, A. M. (1980). Factors Affecting *Bacillus Thuringiensis* Total Field Persistence. *Environmental Entomology*, 9(5), 593-599.
- Lewandowski, A. y Górecka, J. (2008). Effect of transgenic maize MON810 on selected non-target organisms: the bird cherry-oat Aphid (*Rhopalosiphum padi* L.) and its predator - green lacewing (*Chrysoperla carnea* Steph.). *Vegetable Crops Research Bulletin*, 69, 21-30
- Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados (LBOGM). (2005). En: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LBOGM.pdf>
- Li, Y. y Romeis, J. (2010). Bt maize expressing Cry3Bb1 does not harm the spider mite, *Tetranychus urticae*, or its ladybird beetle predator, *Stethorus punctillum*. *Biological Control*, 53, 337-344.
- Li, Y., Meissle, M. y Romeis, J. (2008). Consumption of Bt maize pollen expressing Cry1Ab or Cry3Bb1 does not harm adult green lacewings, *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae). *PLoS One*, 3(8), e2909. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002909>
- Losey, J. E., Rayor, L. S. y Carter, M. E. (1999). Transgenic Pollen Harms Monarch Larvae. *Nature*, 39, 214.

- Lumbierres, B., Albajes, R. y Pons, X. (2012). Positive effect of Cry1Ab-expressing Bt maize on the development and reproduction of the predator *Orius majusculus* under laboratory conditions. *Biological Control*, 63, 150-156.
- Lövei, G. L., Andow, D. A. y Arpaia, S. (2009). Transgenic Insecticidal Crops and Natural Enemies: A Detailed Review of Laboratory Studies. *Environmental Entomology*, 38(2), 293-306.
- Lundgren, J. G. y Wiedenmann, R. N. (2005). Tritrophic Interactions Among Bt (Cry3Bb1) Corn, Aphid Prey, and the Predator *Coleomegilla maculata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Environmental Entomology*, 34(6), 1621-1625.
- Meir, M. S. y Hilbeck, A. (2001). Influence of transgenic *Bacillus thuringiensis* corn-fed prey on prey preference of immature *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae). *Basic and Applied Ecology*, 2(1), 35-44.
- Niu, L., Ma, Y., Mannakkara, A., Zhao, Y., Ma, W., Lei, C. y Chen, L. (2013). Impact of single and stacked insect-resistant Bt-cotton on the honeybee and silkworm. *PLoS One*, 8(9), e72988. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072988>
- Nyman, T., Linder, H. P., Peña, C., Malm, T. y Wahlber, N. (2013). Climate driven diversity dynamics in plants and plant-feeding insects. *Ecology Letters*, 15, 889-898.
- Obrist, L. B., Dutton, A., Albajes, R. y Bigler, F. (2006a). Exposure of arthropod predators to Cry1Ab toxin in Bt maize fields. *Ecological Entomology*, 31, 143-154.
- Obrist, L. B., Dutton, A., Romeis, J. y Bigler, F. (2006b). Biological Activity of Cry1Ab Toxin Expressed by Bt Maize Following Ingestion by Herbivorous Arthropods and Exposure of the Predator *Chrysoperla carnea*. *BioControl*, 51, 31-48.
- OECD. (2007). *Consensus document on safety information on transgenic plants expressing Bacillus thuringiensis*. OECD Environment, Health, and Safety Publications Series on Harmonization of Regulatory Oversight in Biotechnology. ENV/JM/MONO, 14.
- Orr, D. B. y Landis, D. A. (1997). Oviposition of European corn borer (Lepidoptera: Pyralidae) and impact of natural enemy population in transgenic versus isogenic corn. *Journal of Economic Entomology*, 90(4), 905-909.
- Pérez G., S., Aldebis, H. K. y Vargas-Osuna, E. (2012). Toxicity of six *Bacillus thuringiensis* Cry proteins against the olive moth *Prays oleae*. *Bulletin of Insectology*, 65, 119-122.
- Perlak, F. J., Oppenhuizen, M., Gustafson, K., Voth, R., Sivasupramaniam, S., Heering, D., Carey, B., Ihrig, R. A. y Roberts, J. K. (2001). Development and commercial use of Bollgard® cotton in the USA - early promises versus today's reality. *The Plant Journal*, 27, 489-501.
- Permingeat, H. y Margarit, E. (2005). Impacto ambiental de los cultivos genéticamente modificados: El caso de Maíz Bt. *Revista Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 7, 33-44.

- Peterson, J. A., Lundgren, J. G. y Harwood, J. D. (2011). Interactions of transgenic *Bacillus thuringiensis* insecticidal crops with spiders (Araneae). *Journal of Arachnology*, 39(1), 1-21.
- Piggott, C. R. y Ellar, D. J. (2007). Role of receptors in *Bacillus thuringiensis* crystal toxin activity. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 71, 255-281.
- Pilcher, C. D., Obrycki, J. J., Rice, M. E. y Lewis, L. C. (1997). Preimaginal development, survival, and field abundance of insect predators on transgenic *Bacillus thuringiensis* corn. *Environmental Entomology*, 26(2), 446-454.
- Pilcher, C. D., Rice, M. E. y Obrycki, J. J. (2005). Impact of Transgenic *Bacillus thuringiensis* Corn and Crop Phenology on Five Nontarget Arthropods. *Environmental Entomology*, 34(5), 1302-1316.
- Pons, X., Lumbierres, B., López, C. y Albajes, R. (2005). Abundance of non-target pests in transgenic Bt-maize: A farm scale study. *European Journal of Entomology*, 102, 73-79.
- Raen, A. Z., Dang, C., Wang, F., Peng, Y. F. y Ye, G. Y. (2016). Thrips-mediated impacts from transgenic rice expressing Cry1Ab on ecological fitness of non-target predator *Orius tantillus* (Hemiptera: Anthocoridae). *Journal of Integrative Agriculture*, 15, 2059-2069.
- Rausell, C., Muñoz-Garay, C., Miranda-CassoLuengo, R., Gómez, I., Rudino-Pinera, E., Soberon, M. y Bravo, A. (2004). Tryptophan spectroscopy studies and black lipid bilayer analysis indicate that the oligomeric structure of Cry1Ab toxin from *Bacillus thuringiensis* is the membrane-insertion intermediate. *Biochemistry*, 43, 166-74.
- Roh, J. Y., Choi, J. Y., Li, M. S., Jin, B. R. y Je, Y. H. (2007). *Bacillus thuringiensis* as a specific, safe, and effective tool for insect pest control. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 17, 547-559.
- Romeis, J., Dutton, A. y Bigler, F. (2004). *Bacillus thuringiensis* toxin (Cry1Ab) has no direct effect on larvae of the green lacewing *Chrysoperla carnea* (Stephens) (Neuroptera: Chrysopidae). *Journal of Insect Physiology*, 50, 175-183.
- Romeis, J., Lawo, N. C. y Raybould, A. (2009). Making effective use of existing data for case-by-case risk assessments of genetically engineered crops. *Journal of Applied Entomology*, 133, 571-583.
- Romeis, J., Meissle, M., Alvarez-Alfageme, F., Bigler, F., Bohan, D. A., Devos, Y., Malone, L. A., Pons, X. y Rauschen, S. (2014a). Potential use of an arthropod database to support the non-target risk assessment and monitoring of transgenic plants. *Transgenic Research*, 23, 995-1013.
- Romeis, J., Meissle, M., Naranjo, S. E., Li, Y. y Bigler, F. (2014b). The end of a myth- Bt (Cry1Ab) maize does not harm green lacewings. *Frontiers in Plant Science*, 5, 391. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00391>
- Romeis, J., Raybould, A., Bigler, F., Candolf, M., Hellmich, R., Huesing, J. y Shelton, A. (2013). Deriving criteria to select arthropod species for laboratory tests to assess the ecological risks from cultivating transgenic crops. *Chemosphere*, 90, 901-909.

- Ruiz-Montoya, L., Alias-Vázquez, L. A., Alias-Vázquez, M. J., Guillén-Díaz, T. A. y De la Mora-Estrada, L. F. (2014). Diversidad y distribución de familias de insectos en el Cerrito de San Cristóbal. En: L. Ruiz-Montoya (coord.), *Diversidad biológica y enriquecimiento florístico del Cerrito de San Cristóbal* (pp. 39-55). San Cristóbal, Chiapas. El Colegio de la Frontera Sur.
- Sánchez-Vega, M., Aguirre-Uribe, L. A., Flores-Dávila, M., Cerna-Chávez, E., Ochoa-Fuentes, Y. M., Hernández-Juárez, A. y Méndez-López, A. (2021). Diversity of Phytophagous Insects with Potential to Become Key Pests in Genetically Modified Bt Cotton. *Southwestern Entomologist*, 46(2), 317-330.
- Sarwar, M. (2015). Biopesticides: an effective and environmental friendly insect-pests inhibitor line of action. *International Journal of Engineering and Advanced Research Technology*, 1(2), 10-15.
- Schnepf, E. y Whiteley, H. R. (1981). Cloning and expression of the *Bacillus thuringiensis* crystal protein gene in *Escherichia coli*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 78(5), 2893-2897.
- Schnepf, E., Crickmore, N., Van Rie, J., Lereclus, D., Baum, J., Feitelson, J., Zeigler, D. R. y Dean, D. H. (1998). *Bacillus thuringiensis* and Its Pesticidal Crystal Proteins. *Microbiol. Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 62(3), 775-806.
- Schuler, T. H., Potting, R. P.J., Denholm, I. y Poppy, G. M. (2001). Parasitoid behavior and Bt plants. *Nature (London)*, 401, 825-826.
- Sharma, H. C. y Pampapathy, G. (2006). Influence of transgenic cotton on the relative abundance and damage by target and non-target insect pests under different protection regimes in India. *Crop Protection*, 25, 800-813.
- Shelton, A. M., Naranjo, S. E., Romeis, J. y Hellmich, R. L. (2012). Errors in Logic and Statistics Plague a Meta-Analysis (response to Andow and Lövei 2012). *Environmental Entomology*, 41(5), 1047-1049.
- Shelton, A. M., Naranjo, S. E., Romeis, J., Hellmich, R. L., Wolt, J. D., Federici, B. A., Albajes, R., Bigler, F., Burgess, E. P.J., Dively, G. P., Gatehouse, A. M. R., Malone, L. A., Roush, R., Sears, M. y Sehnal, F. (2009a). Setting the record straight: a rebuttal to an erroneous analysis on transgenic insecticidal crops and natural enemies. *Transgenic Research*, 18, 317-322.
- Shelton, A. M., Naranjo, S. E., Romeis, J., Hellmich, R. L., Wolt, J. D., Federici, B. A., Albajes, R., Bigler, F., Burgess, E. P.J., Dively, G. P., Gatehouse, A. M. R., Malone, L. A., Roush, R., Sears, M., Sehnal, F., Ferry, N. y Howard, A. B. (2009b). Appropriate analytical methods are necessary to assess nontarget effects of insecticidal proteins in GM crops through meta-analysis (response to Andow et al., 2009). *Environmental Entomology*, 38(6), 1533-1538.

- Shudong, D., Jing, X., Qingwen, Z., Shiwen, Z. y Guanjun, X. (2003). Effect of transgenic Bt cotton on population dynamics of the non-target pests and natural enemies of pests. *Kun Chong Xue Bao. Acta Entomologica Sinica*, 46(1), 1-5.
- Singh, O. V., Ghai, S., Paul, D. y Jain, R. D. (2006). Genetically modified crops: success, safety assessment, and public concern. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 71, 598-607.
- Sisterson, M. S., Carrière, Y., Dennehy, T. J. y Tabashnik, B. E. (2007). Nontarget Effects of Transgenic Insecticidal Crops: Implications of Source-Sink Population Dynamics. *Environmental Entomology*, 36(1), 121-127.
- Soberón, M. y Bravo, A. (2008). Las toxinas Cry de *Bacillus thuringiensis*: modo de acción y consecuencias de su aplicación. En: Rebolledo, F. y Lopez-Munguia, A. (rds.). *Una ventana al quehacer científico* (pp. 303-314). Instituto de Biotecnología de la UNAM. México, D.F. UNAM.
- Tian, J. C., Collins, H. L., Romeis, J., Naranjo, S. E., Hellmich, R. L. y Shelton, A. M. (2012). Using field-evolved resistance to Cry1F maize in a lepidopteran pest to demonstrate no adverse effects of Cry1F on one of its major predators. *Transgenic Research*, 21(6), 1303-1310.
- Trautwein, M. D., Wiegmann, B. M., Beutel, R., Mjer, K. M. y Yeates, D. K. (2012). Advances in insect phylogeny at the Dawn of the postenomic era. *Annual Review of Entomology*, 57, 449-468.
- Tsatsakis, A. M., Nawaz, M. A., Tutelyan, V. A., Golokhvast, K. S., Kalantzi, O. I., Chung, D. H., ... y Chung, G. (2017). Impact on environment, ecosystem, diversity, and health from culturing and using GMOs as feed and food. *Food and Chemical Toxicology*, 107, 108-121.
- Vázquez, L. L. (2009). *Una visión entomológica de la introducción del maíz transgénico FR Bt 1 en Cuba. Transgénicos. ¿Qué se gana?, ¿qué se pierde?* Editorial Acuario, Cuba.
- Wraight, C. L., Zangerl, A. R., Carroll, M. J. y Berenbaum, M. R. (2000). Absence of toxicity of *Bacillus thuringiensis* pollen to black swallowtails under field conditions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(14), 7700-7703.
- Wisniewsky, J. P., Fragn, E. N., Massonneau, A. y Dumas, C. (2002). Between myth and reality: genetically modified maize, an example of a sizeable scientific controversy. *Biochimie*, 84, 1095-1103.
- Whitfield, T. J. S., Novotny, V., Miller, S. E., Hrcek, J., Klimes, P. y Wiblen, G. (2012). Predicting tropical insect herbivore abundance from host plant traits and phylogeny. *Ecology*, 93, S211-S223.
- Xia, J. Y., Cui, J. J. y Dong, S. L. (2001). Resistance of transgenic Bt cotton to *Helicoverpa armigera* Hubner (Lepidoptera: Noctuidae) and its effects on other insects in China. *Genetic Improvement of Cotton*, 203-225.

- Zangerl, A. R., McKenna, A. D., Wraight, C. L., Carroll, M., Ficarelo, P., Warner, R. y Berenbaum, M. R. (2001). Effects of exposure to event 176 *Bacillus thuringiensis* corn pollen on monarch and black swallowtail caterpillars under field conditions. *PNAS*, *98*(21), 11908-11912.
- Zhao, Y., Zhan, S., Luo, J. Y., Wang, C. Y., Lu, L. M., Wang, X. P., Cui, J. J. y Lei, C. L. (2016). Bt proteins Cry1Ah and Cry2Ab do not affect cotton aphid *Aphis gossypii* and ladybeetle *Propylea japonica*. *Scientific Reports*, *6*, 20368. <https://doi.org/10.1038/srep20368>
- Zwahlen, C., Nentwig, W., Bigler, F. y Hilbeck, A. (2000). Tritrophic Interactions of Transgenic *Bacillus thuringiensis* Corn, *Anaphothrips obscurus* (Thysanoptera: Thripidae), and the predator *Orius majusculus* (Heteroptera: Anthocoridae). *Environmental Entomology*, *29*(4), 846-850.

Capítulo VII

Alternativas de biorremediación en aguas, lodos y suelo, para su reutilización en la agricultura¹

Sandra Grisell Mora Ravelo²
Amparo Mauricio Gutiérrez³

Resumen

El agua y el suelo son recursos esenciales para la existencia en el planeta, sin embargo, se han afectado negativamente por la presencia de compuestos xenobióticos que conllevan riesgos en cuanto al manejo sustentable. Para atenuar la toxicidad de contaminantes orgánicos y generar productos menos dañinos, o remover o estabilizar contaminantes inorgánicos, es necesario aplicar herramientas biotecnológicas como la biorremediación, que emplea las capacidades metabólicas de algunos organismos como plantas, hongos y bacterias. Los procesos de biorremediación implicados en el tratamiento de aguas residuales, lodos residuales y suelos agrícolas presentan bajos costos de operación, reciclaje de nutrientes y beneficios ambientales. Diferentes organismos y microorganismos han sido aplicados para la descontaminación, por ejemplo, el aprovechamiento de la microalga *Chlorella vulgaris* Beyerinck CLV2 para remover algunos elementos potencialmente tóxicos (EPT) como Mn, As y Pb en aguas residuales; la fitorremediación por *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. de EPT como Fe, As y Cu en lodos residuales; y la versatilidad metabólica

¹ Citar este capítulo, como: Mora-Ravelo, S. G. y Mauricio-Gutiérrez, A. (2024). Alternativas de biorremediación en aguas, lodos y suelo, para su reutilización en la agricultura. En *Perspectivas multidisciplinares para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas*. UAT, México, pp. 189-211.

² Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas. Centro Universitario, Campus, 87149. Ciudad Victoria, Tamaulipas, México. Autor para correspondencia: sgmora@docentes.uat.edu.mx

³ Conacyt-Instituto de Ciencias, Posgrado en Ciencias Ambientales, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

en la degradación de hidrocarburos por diferentes géneros bacterianos: *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Paenibacillus* aislados de un suelo agrícola.

La aplicación de procesos de biorremediación es importante para preservar estos recursos, ya que aportan diversos servicios ambientales, como la producción de alimentos y biomasa en general, y hábitat para muchas especies.

Introducción

La remediación biológica, es una técnica utilizada en la depuración de aguas, suelos o lodos, que consiste en el aprovechamiento de organismos vivos como microorganismos, plantas, para la mineralización o transformación parcial de contaminantes por procesos metabólicos. La biorremediación se puede realizar de manera intrínseca, *in-situ* o *ex-situ* (Cuautle Hernández et al., 2021).

La eficiencia de la biorremediación depende de diversos factores al momento de elegir un tratamiento de remediación con microorganismos o plantas. Inicialmente se deben considerar las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes, ya que de esto dependerá su biodisponibilidad y biodegradabilidad, y los efectos secundarios que esto pueda traer para el espacio a descontaminar. Los microorganismos que participan en la biorremediación deben ser los apropiados ya sea porque existen en el ambiente o son introducidos para bioaumentar la eficacia en el tratamiento de los contaminantes. Finalmente, la biodisponibilidad de los contaminantes y las condiciones del medio contaminado deben ser las apropiadas, para que los microorganismos puedan realizar los procesos de descontaminación. Si las condiciones del entorno no son adecuadas se pueden modificar con bioestimulación, la cual consiste en la introducción de modificaciones en el medio, mediante el aporte de nutrientes, aireación y otros procesos (Cuautle Hernández et al. 2021). Por otro lado, es importante conocer las diferentes técnicas de biorremediación y seleccionar la más apta para solucionar el problema.

Agua

El uso eficiente de los recursos naturales como el agua y el suelo son factores fundamentales para garantizar la producción alimentaria a nivel mundial. El agua es primordial para la vida y la seguridad de las personas. Actualmente ha pasado a ser un recurso natural “restrictivo” para el desarrollo económico y social (Melián-Navarro y Fernández- Zamudio, 2015).

De acuerdo con el Banco Mundial, el agua utilizada por el sector agrícola corresponde al 70 % del agua que se extrae en el planeta. La FAO señala que, en el 2021, el agua subterránea proporciona alrededor del 50 % de toda el agua potable, y el 43 % de todo el riego agrícola (FAO, 2021).

La demanda del agua se ha incrementado en todo el mundo debido a que la población hace un uso mucho más intensivo de ella; lo que ha ocasionado la escasez natural del recurso, aunado a esto, los problemas de contaminación y las dificultades en los tratamientos que obstaculizan la disponibilidad de agua hacen necesaria la búsqueda de alternativas que garanticen la reutilización de este recurso (Mora-Ravelo et al., 2017).

El procesamiento y el reúso del agua son fundamentales en la distribución y manejo de este recurso a nivel global. Uno de los reúsos más comunes es el aprovechamiento del agua tratada para áreas verdes. Otra alternativa es aprovechar el agua residual generada tanto por la población urbana como por las industrias, a través de la biorremediación para uso en riegos agrícola (Lara y Hernández 2003).

Aguas residuales en México

Actualmente, a nivel mundial existe una gran preocupación por la demanda y la calidad del agua de riego (Sierra, 2011). Esto genera conflictos por la poca disponibilidad de agua potable y por la mala administración de las aguas residuales; lo cual ocasiona problemas económicos, sociales y ambientales (Martínez-Austuria, 2019; Peña, 2013).

En México, CONAGUA (Comisión Nacional del Agua) reportó que, en el 2016, el 76.3 % de toda el agua se utilizó en la agricultura, y que el 19.2 % de todos los acuíferos ya están sobreexplotados; por lo que existe la necesidad de sustituir el agua de primer uso por aguas residuales tratadas en este sector (CONAGUA, 2017a).

A nivel nacional, los datos registrados por CONAGUA en el 2019 señalan que la generación de aguas residuales municipales fue de $250.48 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, en 2 642 plantas de tratamiento en operación en las que se trataron $141.48 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. De estas plantas de tratamiento solo 23 utilizan tratamientos secundarios con procesos biológicos, con un caudal tratado de $0.847 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (SINA, 2019).

Ante la demanda y la necesidad cada vez mayor, es imperante utilizar procesos o técnicas de bajo costo, que permitan la reutilización del agua residual, fomentando el intercambio por agua de primer uso en sectores como el agrícola donde la demanda es mayor. A nivel mundial, el reúso de las aguas residuales tratadas en agricultura es una alternativa que se está estudiando y adoptando cada vez más en regiones con carencia de agua y donde la población ha incrementado (Jaramillo y Restrepo, 2017).

El desarrollo histórico en el procesamiento de aguas residuales, especialmente para el tratamiento de origen municipal, reside en sencillos pasos físicos/mecánicos en combinación con etapas de tratamiento microbiológico

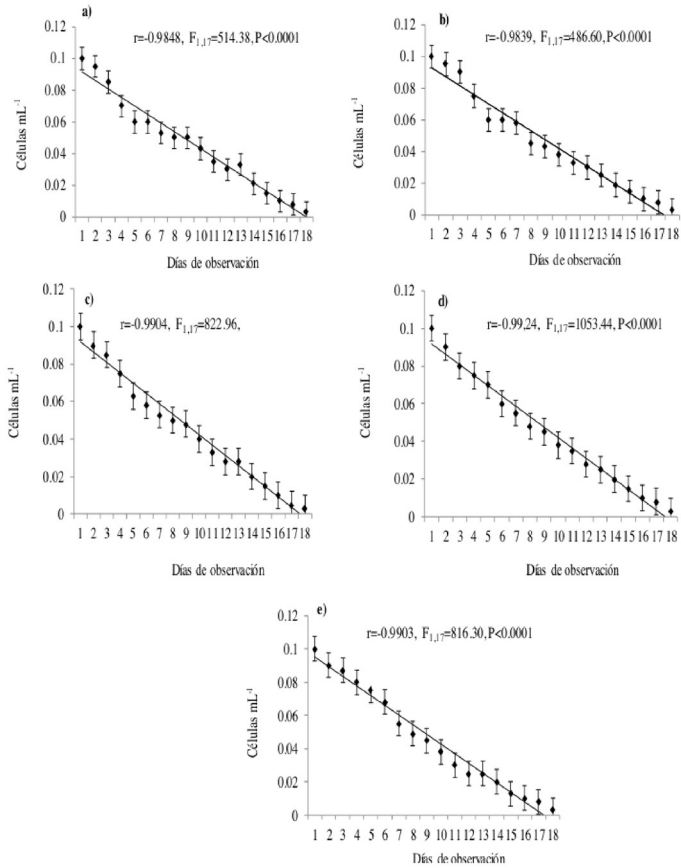
(Ramalho, 2021). El tratamiento secundario y post-tratamientos de las aguas residuales utilizan básicamente bacterias para la degradación de la materia orgánica en sustancias más sencillas (CONAGUA, 2017b). En México, de acuerdo con el Inventario Nacional de Plantas Tratadoras de Agua Residual, se utilizan más procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales a través de humedales, filtros biológicos, discos biológicos o biodiscos, sistemas anaeróbicos y aeróbicos (CONAGUA, 2017b). En la ciudad de Tampico, Tamaulipas, solo se cuenta con una laguna de estabilización y la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) “Morelos”, la cual trabaja con lodos activados, con una capacidad para tratar 300 L s^{-1} ; sin embargo, el caudal tratado es de 180 L s^{-1} , una vez tratada el agua es devuelta a la Laguna del Chairel (CONAGUA, 2011). Los principales beneficios que tiene la reutilización de aguas residuales tratadas por procesos de biorremediación son los bajos costos por separar, transmisión, procesamiento y distribución de agua dulce; ahorro del costo y uso de fertilizantes químicos debido al contenido de nutrientes como N, P y materia orgánica en aguas residuales; y beneficios ambientales (Mora-Ravelo et al., 2017; Winpenny et al., 2013).

Chorella vulgaris Beyerinck CLV2 para el tratamiento de aguas residuales

En las últimas décadas, la biorremediación con microalgas ha sido considerada como una de las principales formas para descontaminar aguas residuales, esto debido a que pueden agotar el N, P, y remover algunos EPT (Oscanoa et al., 2021; Vitola et al., 2022). El uso de *Chlorella* sp. para la descontaminación de agua residual de origen municipal se debe a su capacidad de remover metales pesados o elementos potencialmente tóxicos, ya que uno de los factores primordiales para reducir la concentración de los metales en el agua residual es su disponibilidad biológica o su estado químico de los EPT que los hace susceptibles de ser adsorbidos en la superficie de las células o de ser acumulados intracelularmente en la microalga (García-Pérez et al., 2014; Anastopoulos y Kyzas, 2015). Tal es el caso de *Chorella vulgaris* Beyerinck CLV2, que presenta la capacidad de remover As, Mn y Pb de agua residual procedente de la ciudad de Tampico, Tamaulipas. La cinética de crecimiento de *C. vulgaris* Beyerinck CLV2 en los tratamientos con agua residual y en el tratamiento control, fue decreciente. La Figura 7 señala que los valores del coeficiente de correlación (r) en cada tratamiento son cercanos a 1, lo que indica que hay una relación negativa entre el tratamiento *vs* tiempo. Es decir, que conforme transcurre el tiempo, el abatimiento de nutrientes hace que el crecimiento de *C. vulgaris* Beyerinck CLV2 descienda (Ramos y Pizarro, 2018).

Figura 7

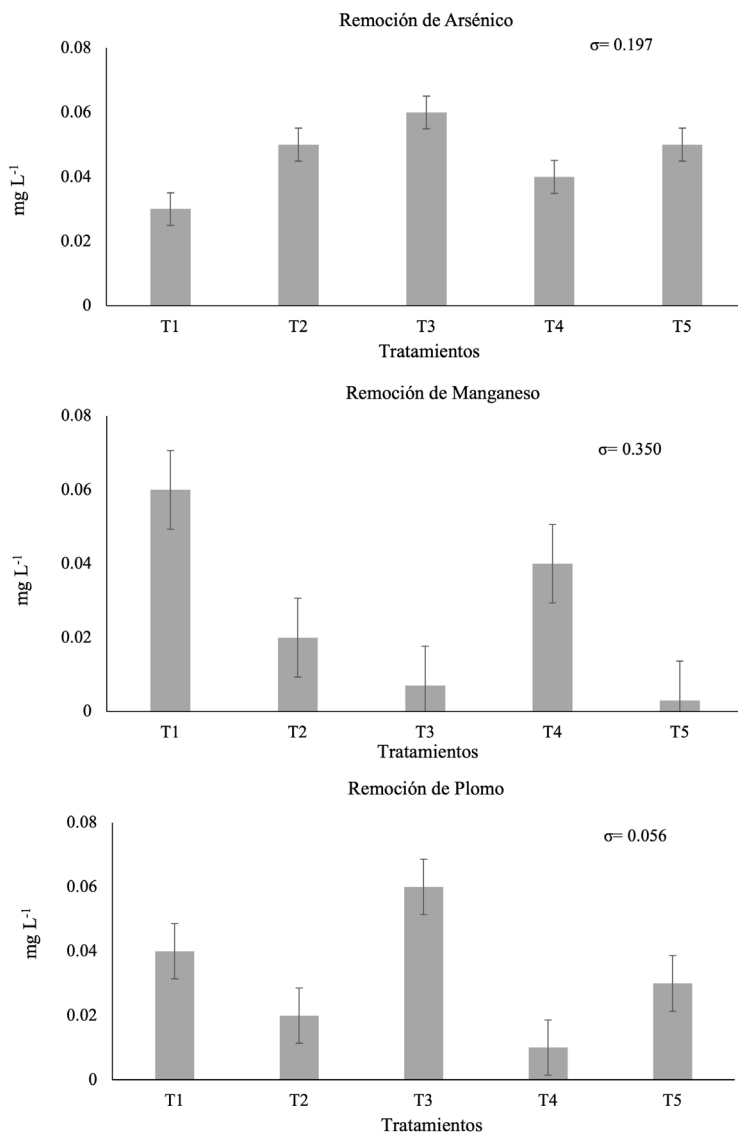
Cinética de crecimiento en los cinco tratamientos. Donde: a) T1 = control, b) T2 = AR + Cv (100%), c) T3 = AR + Cv (75%), d) T4 = AR + Cv (50%), y e) T5 = AR + Cv (25%); AR = agua residual; Cv = *C. vulgaris* Beyerinck CLV2



Fuente: adaptado de Alonso-Bernales et al. (2016).

Figura 8

Remoción de As, Mn y Pb por *C. vulgaris* Beyerinck CLV2. Donde: T1 = control, T2 = AR + Cv (100%), T3 = AR + Cv (75%), T4 = AR + Cv (50%), y T5 = AR + Cv (25%); AR = agua residual; Cv = *C. vulgaris* Beyerinck CLV2. ($P < 0.001$), ($n = 20$)



Fuente: adaptado de Alonso-Bernales et al. (2016).

La concentración final respecto a la remoción de metales por *C. vulgaris* Beyerinck CLV2 fue significativa a nivel microescala. De igual manera, el porcentaje de remoción por tratamiento con *C. vulgaris* Beyerinck CLV2 fue diferente, para el T4 (50 %) fue mayor en As y Pb, mientras que en el T5 (75 %) fue para Mn. La concentración de los metales se redujo al inocular *Chlorella*, durante el transcurso de tres semanas (Figura 8), respecto al valor inicial, el orden de remoción fue Mn > As > Pb. Según Kumar et al. (2016), la disminución en la concentración de los metales de acuerdo con los valores reportados en la norma favorece la reutilización de esta agua para riego agrícola o su reintegración a los ríos.

Negm et al. (2018) indican que la biomasa de *C. vulgaris* Beyerinck tiene una interacción redox con EPT como As, Pb, Ni y Co, a nivel membranal, y posteriormente favorece su transporte hacia los organelos para utilizar estos metales en su crecimiento y desarrollo, específicamente en el caso las microalgas, los metales son transportados a vacuolas, y de este modo pueden crecer mejor y favorecer la descontaminación de las aguas.

Lodos residuales de plantas de tratamiento

La depuración de aguas residuales es una estrategia empleada globalmente para recuperar el agua contaminada por uso de diversas actividades humanas. Durante el tratamiento se generan sólidos en suspensión conocidos como lodos residuales (Jing et al., 2017). Los lodos residuales son tratados y estabilizados biológicamente. Una vez estabilizados los lodos residuales se les denomina biosólidos, los cuales pueden ser reutilizados como fertilizantes, ayudan a mejorar la calidad de los suelos con cultivos agrícolas, a la recuperación de bosques, también como composta o producción de energía eléctrica (Rojas y Mendoza, 2012).

Los lodos residuales que se obtienen del saneamiento de aguas residuales no solo se caracterizan por su alto contenido de nutrientes, sino porque contienen varios contaminantes como EPT y elementos inorgánicos. La presencia de elementos traza convierte a los lodos residuales en un foco de contaminación ambiental, debido a los gases que se generan por descomposición, originando olores fétidos, presencia de un sin número de microorganismos, entre los que se encuentran algunos patógenos, y elementos que en altas concentraciones son tóxicos. Según Uggetti et al. (2012), la producción de lodos por persona varía entre 60-80 g día¹, indicando que en las plantas de tratamiento se produce una gran cantidad de lodos residuales por agua tratada. Por lo que, el procesamiento de lodos residuales representa costos de operación más altos para las plantas; en consecuencia, son muy pocas las plantas de tratamiento que estabilizan los lodos residuales que generan. A causa de esto, surge la importancia de tratar los lodos

residuales y eliminar, reducir o formar compuestos, para que no sean dañinos para los organismos ni para el ambiente (Rojas y Mendoza, 2012).

Lodos residuales en México

En México se ha buscado aprovechar los biosólidos, por lo que se ha investigado cómo utilizarlos como sustrato para plantas de ornato y maíz, en las cuales se han demostrado buenos resultados (Campos et al., 2009). Uno de los usos más innovadores de los biosólidos es la obtención de biogás altamente utilizado en la producción de energía eléctrica. En cuanto a esta forma de aprovechamiento, México es uno de los países con más atraso, debido a que no utiliza ni el 1 % de los lodos residuales generados (Rojas y Mendoza, 2012).

Existen tecnologías de biorremediación para reutilizar agua residuales y suelos, también las hay para los lodos residuales; en dichas tecnologías se emplean las actividades metabólicas de plantas, hongos y bacterias para degradar -destruir-, transformar o remover los contaminantes a productos metabólicos dañinos (Elekes, 2014). Los lodos residuales deben ser sometidos a tratamientos de estabilización, con el fin de evitar daños en el ambiente por la presencia de contaminantes como:

a) Metales pesados: en las aguas residuales provenientes de los hogares no se encuentran en altas concentraciones, de modo que no llegan a ser tratados, ya que no superan los límites máximos permitidos por la NOM-004-SEMARNAT-2002. Se caracterizan por acumularse en los tejidos de animales y plantas, lo que genera su biomagnificación (transferencia de sustancias tóxicas desde un alimento a un organismo, con altas concentraciones en él) y toxicidad para la vida de los ecosistemas.

b) Nutrientes y materia orgánica (MO): su peligrosidad radica en su potencial de eutroficación para las aguas subterráneas y superficiales. Sin embargo, se pueden considerar como fertilizantes valiosos al igual que la MO (Rojas y Mendoza, 2012).

Tabla 18

Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos de acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002

Metal pesado	Excelente	Bueno
	mg kg ⁻¹ en masa seca	mg kg ⁻¹ en masa seca
As	41	75
Cd	39	85
Cr	1200	3000
Cu	1500	4300

Metal pesado	Excelente	Bueno
	mg kg ⁻¹ en masa seca	mg kg ⁻¹ en masa seca
Hg	17	57
Pb	300	840
Ni	420	420
Zn	2800	7500

Fuente: elaboración propia con base en la NOM-004-SEMARNAT-2002.

El desarrollo tecnológico y las investigaciones han permitido establecer un sinnúmero de técnicas físicas, químicas y biológicas para tratar la contaminación de los lodos por microorganismos patógenos y EPT. En las técnicas químicas y físicas destacan: lavado, precipitación, solidificación, estabilización, electrocinética, separación mecánica y separación pirometalúrgica; sin embargo, este tipo de procesos son demasiado costosos y suelen presentar problemas técnicos. Por lo cual, se hace uso de bioprocesos como la biorremediación mediante la aplicación de microorganismos y plantas como principales descontaminantes de elementos traza (Cortes-Torres, 2016).

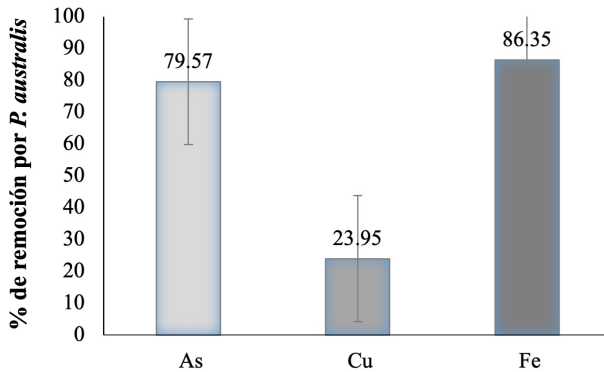
La fitorremediación en el tratamiento de lodos residuales

Los lodos que se obtienen del saneamiento de aguas residuales no solo se caracterizan por su alto contenido de nutrientes, sino porque contienen varios contaminantes como EPT. Por ello es importante tratar los lodos residuales y eliminar, reducir o formar compuestos (Saffari et al., 2020). Los procesos de estabilización de los lodos residuales que se generan en las plantas de tratamiento representan costos de operación más altos. Además, los tratamientos de lodos residuales convencionales impiden su estabilización y reutilización en las plantas de tratamiento de aguas residuales en Ciudad Victoria, Tamaulipas; de esta forma son desechados en las instalaciones de la planta sin ningún tratamiento, convirtiéndolos en un foco de contaminación ambiental.

Por lo cual, la fitorremediación es una solución a esta problemática, ya que se considera como una herramienta económica y efectiva que puede ser aplicada *in situ*. El uso de humedales permite la retención de elementos traza en forma natural por algunas plantas, destacando *P. australis* Cav. Trin. (Muro-González et al., 2020). Por lo anterior, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. ha sido documentada para la extracción de EPT presentes en lodos residuales, con una capacidad mayor para Fe con 86 %, seguido de As con 79 % y Cu con 24 % (Figura 9).

Figura 9

Porcentaje de remoción de As, Cu y Fe por *P. australis* en lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Cd. Victoria, Tamaulipas



Fuente: adaptado de Cortés-Torres et al. (2019).

Uno de los parámetros que influyó en la remoción de estos metales fue el pH, debido a que la mayoría de los metales muestran más disponibilidad a pH ácido (Amezcuá-Ávila et al., 2020), lo que permitió la movilidad y retención de As, Cu y Fe por *P. australis*.

Según Ramos-Gómez et al. (2012), la biodisponibilidad de los metales de As, Cu y Fe es favorecida a pH ácido. En este experimento el pH tuvo un valor inicial de 6.7 e incrementó a 8.4 a lo largo del experimento. Furcal-Beriguete y Torres-Morales (2020) sustentan que la liberación de exudados carboxilados por las raíces atenúa la acidez del medio por lo cual se vio afectada la movilidad de As, Cu y Fe hacia *P. australis*.

Las concentraciones de EPT en los sustratos iniciales (As = 1.61, Cu = 12.411 y Fe = 656.365 mg kg⁻¹) no superaron los valores establecidos por la norma NOM-004- SEMARNAT-2002 (As = 41 y Cu = 1 500 mg kg⁻¹). Sin embargo, es relevante el reducir al máximo la concentración de metales presentes en los lodos residuales, como lo señala David et al. (2012) ya que elementos como As, Cu y Fe tienen alta capacidad de bioacumularse y biomagnificarse en las cadenas tróficas, incrementando su toxicidad.

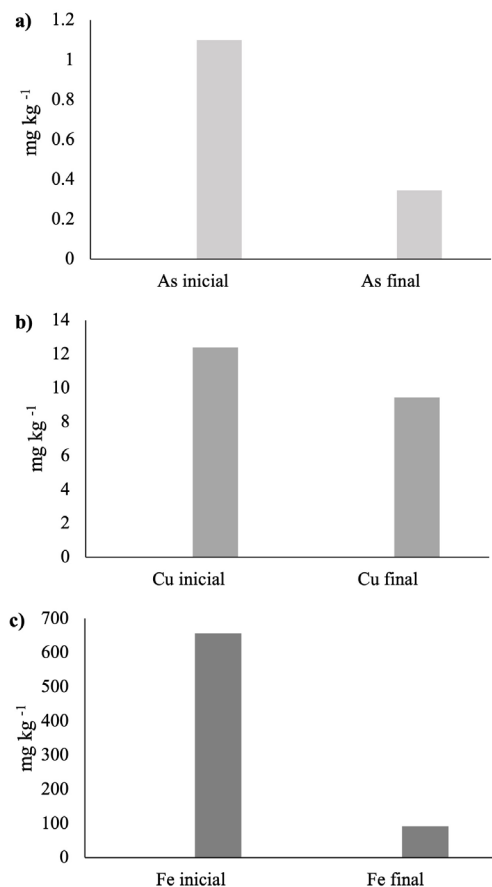
La concentración de As disminuyó del lodo residual inicial respecto al último mes de 1.61 a 0.345 mg kg⁻¹ (Figura 10a), debido a la capacidad de fitorremediación por *P. australis* (Peruzzi et al., 2011). La concentración de Cu también disminuyó al final del experimento (Figura 10b), este resultado concuerda con lo estudiado por Torres et al. (2010), quienes utilizaron tratamientos similares para la remoción de Cr

con vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty), y hallaron que el tratamiento más efectivo era el que tenían con planta + lodo residual + abono orgánico.

Respecto a la concentración inicial de los tres EPT, el Fe disminuyó en mayor proporción (Figura 10c), en comparación a las concentraciones de As y Cu. Por lo que, el porcentaje de remoción del Fe en el lodo fue alto, por la posible lixiviación del As y por la afinidad del Fe a formar sulfuros de hierro, en condiciones reductoras (Moreno, 2010).

Figura 10

Contenido inicial y final de As (a), Cu (b) y Fe (c) presentes en lodos residuales de la planta de tratamiento de aguas residuales de Cd. Victoria, Tamaulipas



Fuente: adaptado de Cortés-Torres et al. (2019).

Suelo

El desarrollo económico mundial ha originado fuertes presiones; no solo en la sobreexplotación y la contaminación de agua, sino en el suelo ocasionado por los cambios en el uso de este recurso natural, el crecimiento urbano que ha invadido terrenos agrícolas y un manejo inadecuado de las cuencas; lo que ha generado erosión, deforestación, baja calidad de los suelos, además de ser causantes de inundaciones (Guadarrama-Brito y Galván, 2015).

El suelo, como recurso natural, contribuye con diversos servicios ambientales, como parte de los ciclos biogeoquímicos, filtración y almacenamiento de agua. Además, sirven de sustrato para producir alimentos y biomasa, aportan nutrientes a las plantas, son sumideros de carbono mediante la fijación de C y son hábitat para muchas especies (Burbano-Orjuela, 2016). Es un recurso fundamental para la vida en el planeta, pero las actividades antropogénicas sobre el suelo están llegando a límites críticos. La FAO en el 2019 reportó que alrededor de 99 % del suministro de alimentos en el mundo derivan de la producción en suelos agrícolas que comprenden cerca de 50-70 % de las tierras globales. Actualmente el laboreo, la aplicación de fertilizantes y el uso de pesticidas han reemplazado las funciones biológicas del suelo, aumentando con ello la dependencia de insumos externos para mantener la productividad del suelo, lo que será insostenible a largo plazo (FAO, 2021). El incremento de pérdida de suelos productivos aumenta la volatilidad de precios de los alimentos porque gran parte de la población mundial vive en la pobreza. La FAO señala que es necesaria una gestión sostenible del suelo que repercute en grandes beneficios para el planeta (FAO y GTIS, 2015). El Banco Mundial (2021) reporta que los suelos agrícolas representan el 36.9 %, y que se encuentra en constante peligro de decrecer por problemas de erosión, pérdida de C_{org} (carbono orgánico), pérdida de nutrientes, acidificación, contaminación, anegamiento, pérdida de la biodiversidad del suelo, por mencionar algunas de las consecuencias en el suelo agrícola.

Dentro de los problemas de contaminación, la industria petrolera afecta principalmente la productividad de los suelos. La contaminación por hidrocarburos de petróleo es ocasionada por actividades de exploración, refinación, extracción o falta de mantenimiento de instalaciones. Estos hidrocarburos alteran las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que afectan su fertilidad y repercuten en la productividad agrícola, lo que ocasiona pérdidas económicas a los productores. Además, los hidrocarburos disponibles en el suelo pueden ser absorbidos indirectamente por las plantas e impactar en los ciclos biogeoquímicos (Cavazos et al., 2014; Velásquez, 2017).

Los suelos contaminados afectan a muchos procesos biológicos, por lo que se han generado estrategias que disminuyan la toxicidad, movilidad o concentración de estos contaminantes mediante tecnologías de remediación biológicas (Fundación de Chile, 2019).

Suelos contaminados en México

La contaminación del suelo a nivel global es considerada la tercera amenaza más relevante en las funciones del suelo (Rodríguez et al., 2019). Dentro de las principales fuentes de contaminación del suelo, se encuentran los derrames de hidrocarburos de petróleo (Velásquez, 2017).

En México, la industria petrolera es considerada desde hace más de 40 años, la fuente principal de la contaminación del suelo. A lo largo del país se tienen extensas áreas contaminadas por hidrocarburos como resultado de los derrames, y de las actividades propias de esta industria, tan solo en el 2016 se registraron 192 sucesos entre fugas y derrames de petróleo (Briceño, 2018). El derrame de hidrocarburos reportados durante el periodo 2018-2021 fue de 110.16 b en suelos agrícolas (Centro de Coordinación y Apoyo a Emergencia, 2022). Mientras que, Petróleos Mexicanos -PEMEX- reportó 213 derrames de hidrocarburos en suelo, lo que representa 1 284 ha contaminadas (Barois et al., 2018). Desde 1990, la contaminación en zonas agrícolas ha provocado pérdidas por más de 50 mil millones de dólares, especialmente en zonas rurales (Navarro, 2006).

Los hidrocarburos totales del petróleo de mediano y alto peso molecular son hidrofóbicos, y los absorbe el suelo, provocando su permanencia por periodos largos (Velásquez, 2017). La utilización de los microorganismos presentes en estos suelos son una alternativa para reducir el grado o nivel de contaminación por los hidrocarburos, debido a que estos organismos utilizan a estos compuestos como fuente de carbono y energía como resultado de la descomposición de los hidrocarburos (Rivera et al., 2018).

Versatilidad metabólica de bacterias endémicas de suelos agrícolas contaminados con hidrocarburos

México es el decimoprimer productor mundial de petróleo, por tanto, esta actividad ha repercutido en la contaminación de los ecosistemas, entre los que se encuentra el suelo; y la degradación de este recurso representa el 12.6 % del PIB (INEGI, 2019; OPEC, 2020). El estado de Puebla ha ocupado el cuarto lugar a nivel nacional en derrames registrados de petróleo crudo durante el periodo 2000-2014 (CNH, 2015) afectando con ello a suelos agrícolas. En 2002, en Acatzingo, Puebla, ocurrió un derrame de 450 000 L de petróleo crudo que impactó 50 ha

de suelos agrícolas; y en el 2010 en San Martín Texmelucan, Puebla, aconteció una explosión por derrame de petróleo crudo que ocasionó 30 pérdidas humanas, suelos agrícolas contaminados, y afectación a la economía campesina (PEMEX, 2002; Rivera-Pineda, 2011). El territorio poblano es atravesado por oleoductos y poliductos de Petróleos Mexicanos, que son siniestrados principalmente por las tomas clandestinas y ha provocado derrames de diésel, gasolina, combustóleo y petróleo crudo (PEMEX, 2018).

Los suelos contaminados con hidrocarburos son afectados en su estructura y fertilidad; como consecuencia, hay una disminución en el rendimiento de los cultivos, cambios en la dinámica poblacional microbiana y de la fauna, contaminación por infiltración a cuerpos de agua subterráneos, impactos en la economía y salud de la población (Cavazos et al., 2014; Mohanta et al., 2023). Por ello deben restaurarse los sitios contaminados para no poner en riesgo a los ecosistemas.

La biorremediación ha sido estudiada, enfocándose en el potencial metabólico de las bacterias endémicas de suelos agrícolas contaminados con hidrocarburos, para transformar contaminantes orgánicos en compuestos más simples y en la producción de biosurfactantes. Diferentes bacterias han sido reportadas, como: *Bacillus cereus*, *Bacillus pumilus*, *Bacillus subtilis*, *Klebsiella ornithinolytica*, *Klebsiella pneumoniae*, *Klebsiella* sp., *Paenibacillus lautus*, *Pseudomonas stutzeri*, y *Serratia marcescens* (Mauricio-Gutiérrez et al., 2020; Pérez-Armendáriz et al., 2013). Los géneros bacterianos como *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Paenibacillus* (Tabla 19) sobreviven a las condiciones de contaminación del suelo agrícola, y puede deberse a los diferentes mecanismos de tolerancia como la secreción de biosurfactantes, presencia de enzimas oxigenasas, y cambios en la hidrofobicidad de la membrana (Ron y Rosenberg, 2014). Las cepas de *Bacillus pumilus* M1HC1b, *Bacillus subtilis* M1HC15a, *Paenibacillus lautus* M1HC27 y *Paenibacillus lautus* M1HC19 presentaron valores de índice de emulsificación (E_{24}) de 5.88 a 4.75 %. Estos géneros bacterianos han sido reportados por su capacidad de producir biosurfactantes y emulsificar diésel con valores de E_{24} = 62.5 %, 76.8 %, 79 % y 87.6 % (Abdel-Mawgoud et al., 2008; Ganesh y Lin, 2009). El E_{24} (\square 5.26%) de las cepas bacterianas endémicas de suelos agrícolas contaminados con diésel fueron más bajos, sin embargo, la producción de surfactantes mejora la biodegradabilidad de los hidrocarburos por su capacidad de reducir la viscosidad del aceite y facilitar la emulsificación, y por tanto la biodisponibilidad del contaminante.

La cepa de *Bacillus pumilus* M1HC1b (Figura 11a) mostró una biodegradación del 100 %, y *Paenibacillus lautus* M1HC27 (Figura 11b) del 71.72 % a 10 días con 4000 ppm de diésel; y a medida que aumentó la concentración de hidrocarburo disminuyó la capacidad de degradación y crecimiento bacteriano. Además de

biodegradar y producir sustancias tensoactivas con capacidad de emulsificar hidrocarburos, estos géneros bacterianos habitan la rizósfera de plantas de interés agronómico, como promotoras del crecimiento vegetal.

La supervivencia de las bacterias endémicas de suelos agrícolas contaminados con hidrocarburos se debe a una adaptabilidad metabólica como consecuencia de la continua exposición a hidrocarburos; y requieren actuar en consorcio con más de una bacteria o grupos bacterianos para una eficiente capacidad de biodegradación de mezclas complejas como el diésel (Akwukwaegbu et al., 2019; Mauricio-Gutiérrez et al., 2020). Además, para que los procesos microbianos en el suelo tengan éxito, es necesario favorecer las condiciones edáficas con la adición de nutrientes, texturizantes o mejoradores de suelo, humedad y oxígeno (Mauricio-Gutiérrez et al., 2014).

La microbiota edáfica de suelos contaminados con hidrocarburos actúa como un componente esencial en la biorremediación, ya que biotransforma los contaminantes orgánicos a CO₂, agua y biomasa microbiana; y puede ser aprovechada como paquetes biotecnológicos en procesos de biorremediación y rizadorremediación.

Tabla 19

Índice de Emulsificación por bacterias endémicas

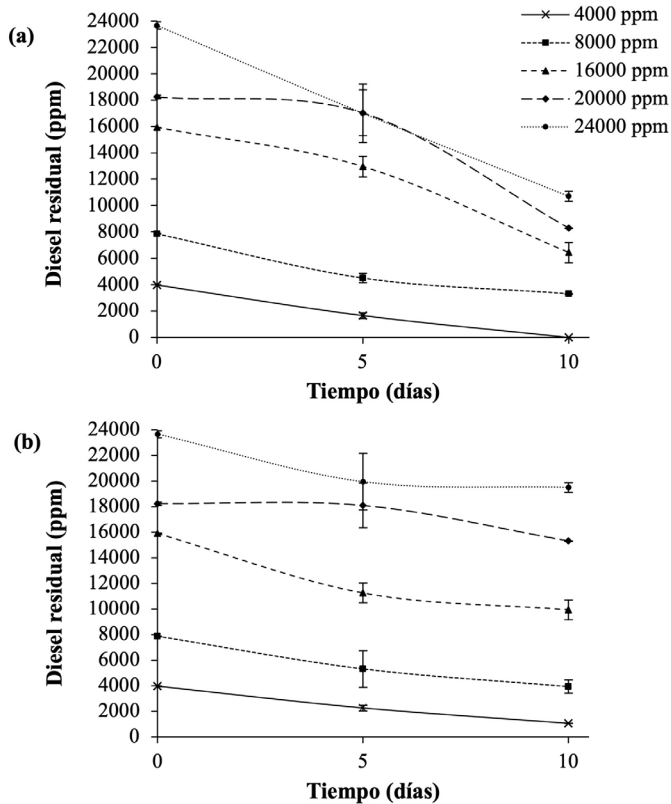
Cepa bacteriana	E_{24} ¹
<i>Pseudomonas stutzeri</i> M1HC1	Nd
<i>Bacillus pumilus</i> M1HC1b	5.88 ± 0.001
<i>Bacillus cereus</i> M1HC10	Nd
<i>Bacillus subtilis</i> M1HC15a	5.67 ± 0.001
<i>Paenibacillus lautus</i> M1HC19	4.76 ± 0.001
<i>Paenibacillus lautus</i> M1HC27	4.75 ± 0.83

¹ E_{24} : índice de emulsificación. $E_{24} = (\text{altura de la capa de emulsión}) / (\text{altura total}) \times 100$. Nd = No detectado.

Fuente: adaptado de Mauricio-Gutiérrez et al. (2020).

Figura 11

Diésel residual a diferentes concentraciones (a) *Bacillus pumilus* MIHC1b y (b) *Paenibacillus lautus* MIHC27



Fuente: adaptado de Mauricio-Gutiérrez et al. (2020).

Conclusión

Diferentes organismos y microorganismos han sido documentados para la biorremediación de aguas residuales, lodos de depuradora y suelos contaminados con hidrocarburos de petróleo. La aplicación del alga *Chlorella vulgaris* Beyerinck CLV2 en aguas residuales de origen urbano para la remoción de As, Mn y Cu, mostró resultados prometedores que alcanzan valores permisibles por la norma mexicana, y que permiten la utilización de aguas residuales para riego agrícola, la reintegración a ríos y la estabilización de los lodos residuales implementados en sistemas de humedales y en prácticas agrícolas. Finalmente, el estudio de microorganismos endémicos como *Bacillus*, *Pseudomonas* y *Paenibacillus* aislados de

suelos agrícolas contaminados con hidrocarburos, presentan diferentes mecanismos de tolerancia como la biodisponibilidad y biodegradación de contaminantes orgánicos para sus requerimientos metabólicos; lo que ha permitido su adaptación a condiciones adversas y su uso en biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos. La biorremediación, ofrece diferentes paquetes biotecnológicos que permiten la recuperación de sistemas como agua, lodos y suelo a través de diversos procesos biológicos.

Referencias

- Abdel-Mawgoud, A. M., Aboulwafa, M. M., y Hassouna, N. A. (2008). Characterization of surfactin produced by *Bacillus subtilis* isolate BS5. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 150(3), 289-303. <https://doi.org/10.1007/s12010-008-8153-z>
- Akwukwaegbu, R. N., Okerentugba, P. O., Okpokwasili, G. C., Stanley, H. O., y Ugboma, C. J. (2019). Hydrocarbon degradation potential of heterotrophic bacteria isolated from oil polluted sites in Sakpenwa community in Rivers State. *South Asian Journal of Research in Microbiology*, 4(2), 1-12. <https://doi.org/10.9734/sajrm/2019/v4i230102>
- Alonso-Bernales, T., Mora-Ravelo, S.G., Alarcón, A., y Flores, G. J. (2016). *Destoxificación de As, Mn y Pb, con Chlorella vulgaris CLV2 en las aguas residuales de Cd. Tampico, Tamaulipas*. Tesis de Maestría. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, Tamaulipas, México.
- Anastopoulos, I., y Kyzas, G. (2015). Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae, *Journal of Molecular Liquids*, 209, 77-86.
- Banco Mundial. (2021). *Water in agriculture*. <http://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture>
- Barois, I., Contreras-Ramos, S. M., Hernández-Castellanos, B., de los Santos, M., Martínez F., y García D. R. (2018). *El suelo y el petróleo: Estudio de caso de biorremediación en pasivo ambiental de Papantla, México*. Instituto de Ecología A.C. (ed.) Xalapa, México.
- Briceño, J. (2018). *Identificación molecular de cepas hidrocarbonoclastas nativas de suelos en sitios contaminados por petróleo crudo en Tabasco y Veracruz, México*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Burbano-Orjuela, H. (2016). The soil and its relationship with ecosystem services and food security. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Campos, M. E., García, R. N., Velásquez, R. A., y García, F. M. (2009). Análisis básico del reúso de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en suelos de pradera del parque nacional Nevado de Toluca. *Quivera*, 11(2), 35-51. <https://quivera.uaemex.mx/article/view/10259>

- Cavazos-Arroyo, J., Pérez-Armendáriz, B., y Mauricio-Gutiérrez, A. (2014). Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de Acatzingo Puebla, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 11(4), 539-550.
- Centro de Coordinación y Apoyo a Emergencia. (2022). CCEA. Vía transparencia
- CNH. (Comisión Nacional de Hidrocarburos). (2015). *Reporte de Derrames de Petróleo Crudo 2000-2014*. http://www.cnh.gob.mx/_docs/Reporte_de_volumen_de_petroleo_crudo_derramado_y_fugas_de_gas_natural_I_2014.pdf/
- CONAGUA. (2011). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y plantas de tratamiento de aguas residuales en operación*. Comisión Nacional del Agua (ed.). México.
- _____. (2017a). *Inventario nacional de plantas de tratamiento de agua residual*. Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT (eds.). México.
- _____. (2017b). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: procesos de oxidación bioquímica con biomasa suspendida*. Comisión Nacional del Agua (ed.). México.
- _____. (2019). *Estadísticas del agua en México*. CONAGUA (ed.). México.
- Cortés Torres, E. C. (2016). *Remoción de arsénico, cobre y hierro de lodos residuales con Phragmites australis*. Tesis de Maestría. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, Tamaulipas. México.
- Cortés-Torres, C., Barrientos-Lozano, L., Rocandio-Rodríguez, M., Almaguer-Sierra, P., Alarcón, A., Rosas-Mejía, M., y Mora-Ravelo, S. G. (2019). Removing arsenic, copper, and iron from sewage sludge with reed (*Phragmites australis*). *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(3), 5603-5617. https://doi.org/10.15666/Aeer/1703_56035617
- Cuautle Hernández, V.A., Mendoza, P.L., Minto, R. M., Gil, M. S., Anacleto J. N., Vásquez, C. M. F., Ortiz, P. P., Evelin Jazmín Cortes, G. E. J., Flores, M. P., Mendoza, J. C., Pérez O. G. (2021). Aplicaciones de la biorremediación. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 12(31), 2-75.
- David L, G., Matache, M. L., Tudorache, A., Chisamera, G. B., Rozyłowicz, L., y Lucian, R. G. (2012). Food chain biomagnification of heavy metals in samples from the lower prut food plain natural park. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(1), 69-73. <https://doi.org/10.30638/eemj.2012.010>
- Elekes, C. (2014). Eco-Technological solutions for the remediation of polluted soil and heavy metal recovery. Pp. 309-335. En M. Hernandez (ed.), *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*. InTech. London, United Kingdom.
- FAO y GTIS. (2015). *Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) - Resumen Técnico*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo. Roma, Italia.

- FAO. (2021). *FAOstat Home*. <http://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Fundación de Chile. (2019). *Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados*. Gobierno de Chile. https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-detecnologías-de-remediacion-de-sitios-contaminados_baja-1.pdf
- Furcal-Beriguete, P., y Torres-Morales, J. L. (2020). Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 33(1), 122-137.
- Ganesh, A., y Ling, J. (2009). Diesel degradation and biosurfactant production by Gram-positive isolates. *African Journal of Biotechnology*, 8(21), 5847-5854. <https://doi.org/10.5897/AJB09.811>
- García-Pérez, J., Beuckels, A., Vandamme, D., Depraetere, O., Foubert, I., Parra, R., y Muylaert, K. (2014). Influence of magnesium concentration, biomass concentration and pH on flocculation of *Chlorella vulgaris*. *Algal Research*, 3, 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.11.016>
- Guadarrama-Brito, Ma. E., y Galván, F. A. (2015). Impacto del uso de agua residual en la agricultura. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 4(7), 1-20.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2019). *Sistema de Cuencas Nacionales de México*. <https://www.inegi.org.mx/temas/ee/>
- Jaramillo, M. F. y Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: a review about its limitations and benefits. *Sustainability*, 9(2), 1734-1753. <https://doi.org/10.3390/su9101734>.
- Jing, X., Yao, G., Liu, D., Yiran, L., Luo, M., Zhou, Z., y Wang, Z. (2017). Effects of wastewater irrigation and sewage sludge application on soil residues of chiral fungicide benalaxyl. *Environmental Pollution*, 224, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.004>
- Kumar, D., Pandey, L. K., y Gaur, J. P. (2016). Metal sorption by algal biomass: From batch to continuous system. *Algal Res*, 18, 95-109. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.05.026>
- Lara, J. A. y Hernández, A. (2003). Reutilización de aguas residuales: aprovechamiento de los nutrientes en riego agrícola. *Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales*. Instituto Cinara, Universidad del Valle, 237-242
- Martínez-Austria, P. F., Díaz-Delgado, C., y Moeller-Chávez, G. (2019). Water security in México: general diagnosis and main challenges. *Ingeniería del Agua*, 23(2), 107-121. <https://doi.org/10.4995/Ia.2019.10502>
- Mauricio-Gutiérrez, A., Jiménez-Salgado, T., Tapia-Hernández, A., Cavazos-Arroyo, J., y Pérez-Armendáriz, B. (2014). Biodegradation of hydrocarbons exploiting spent substrate from *Pleurotus ostreatus* in agricultural soil. *African Journal of Biotechnology*, 13(33), 3385-3393. <https://doi.org/10.5897/AJB2014.13964>.

- Mauricio-Gutiérrez, A., Machorro-Velázquez, R., Jiménez-Salgado, T., Vázquez-Cruz, C., Sánchez-Alonso, M.P., y Tapia-Hernández, A. (2020). *Bacillus pumilus* and *Paenibacillus lautus* effectivity in the process of biodegradation of diesel isolated from hydrocarbons contaminated agricultural soils. *Archives of Environmental Protection*, 46(4), 59-69. <https://doi.org/10.24425/aep.2020.135765>
- Melián-Navarro, A. y Fernández- Zamudio, Ma. A. (2015). Reutilización de agua para la agricultura y el medioambiente. *Agua y Territorio*, 8, 80-92.
- Mohanta, S., Pradhan, B., y Behera, I.D. (2023). Impact and remediation of petroleum hydrocarbon pollutants on agricultural land: a review. *Geomicrobiology Journal*. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2243925>
- Mora-Ravelo, S. G., Alarcón, A., Rocandio-Rodríguez, M., y Vanoye, E. V. 2017. Bioremediation of wastewater for reutilization in agricultural system: Review. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(1), 33-50. http://dx.doi.org/10.15666/aecer/1501_033050
- Moreno, E. (2010). *Recuperación de suelos mineros contaminados con arsénico mediante fitotecnologías*. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Madrid. España.
- Moura Chagas, J., Celio de Figueiredo, C., y Paz-ferreiro, J. (2021). Geoderma Sewage sludge biochars effects on corn response and nutrition and on soil properties in a 5-yr field experiment. *Geoderma*, 401(July). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115323>
- Muro-González, D. A., Mussali-Galante, P., Valencia-Cuevas, L., Flores-Trujillo, K., y Tovar-Sánchez, E. (2020). Morphological, physiological, and genotoxic effects of heavy metal bioaccumulation in *Prosopis laevigata* reveal its potential for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(32), 40187-40204.
- Navarro, M. V. R. (2006). Los desastres en su interacción con la ciencia, la tecnología y la sociedad. *MediSur*, 4(2), 50-58.
- Negm, N. A., Abd El Wahed, M. G., Hassan, A. R. A., y Abou Kana, M. T. H. (2018). Feasibility of metal adsorption using brown algae and fungi: Effect of biosorbents structure on adsorption isotherm and kinetics. *J. Mol. Liq.* 264, 292-305. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.027>
- Norma Oficial Mexicana. (1993). *NOM-CCA-32-ECOL/1993. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola*.
- _____. (2002). *NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*.
- OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries). (2020). *Annual Statistical Bulletin*. https://www.opec.org/opec_web/en/publications/202.htm

- Oscanoa Huaynate, A., Cervantes Gallegos, M., Flores Ramos, L., y Ruiz Soto, A. (2021). Evaluación del potencial de *Desmodesmus asymmetricus* y *Chlorella vulgaris* para la remoción de nitratos y fosfatos de aguas residuales. *Revista Peruana de Biología*, 28(1).
- PEMEX (Petróleos Mexicanos). (2002). *Fuga de crudo en el oleoducto nuevo Teapa-Venta de Carpio-Tula*. Boletín No. 19. <http://www.pemex.com/index.cfm?action=news§ionID=8&catID=40&contentID=269>
- _____. (2018). *Reporte de tomas clandestinas en 2018*. http://www.pemex.com/acerca/informes_publicaciones/Paginas/tomas-clandestinas.aspx
- Peña, M., Ducci, J., y Zamora, V. (2013). *Tratamiento de aguas residuales en México*. Banco Interamericano de Desarrollo, Sector de Infraestructura y Medio Ambiente (ed.). Nota Técnica. IDB-TN-521. México.
- Pérez-Armendáriz, B., Mauricio-Gutiérrez, A., Jiménez-Salgado, T., y Tapia-Hernández, A. (2013). Emulsification of hydrocarbons using biosurfactant producing strains isolated from contaminated soil in Puebla, Mexico. En Chamy R., y Rosenkranz F. (eds). *Biodegradation Engineering and Technology*. Tech. London, United Kingdom.
- Peruzzi, E., Masciandaro, G., Macci, C., Doni, S., y Ceccanti, B. (2011). Pollutant monitoring in sludge treatment wetlands. *Water Science & Technology*, 64(7), 1558-1565. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.589>
- Ramallo, R. S. (2021). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté.
- Ramos-Gómez, M., Avelar J., Medel-Reyes, A., Yamamoto, L., Godínez, L., Ramírez, M., Guerra, R. y Rodríguez, F. (2012). Movilidad de metales en jales procedentes del distrito minero de Guanajuato, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), 49-59.
- Ramos, R., y Pizarro, R. (2018). Crecimiento y capacidad de biorremediación de *Chlorella vulgaris* (Trebouxiophyceae, Chlorophyta) cultivada en aguas residuales generadas en el cultivo del pez dorado *Seriola lalandi* (Perciformes: Carangidae). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 53(1), 75-86. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572018000100075>
- Rivera-Pineda, F. (2011). *Situación socio económica y ambiental de los productores de Acatzingo, Puebla, por el derrame de hidrocarburos en sus suelos agrícolas*. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Campus Puebla.
- Rivera, O. P., Rivera L., J. M., Andrade, L. E. del C., Heyer, R. L., de la Garza, R. F. R., y Castro, M. B. I. (2018). Bioestimulación y biorremediación de recortes de perforación contaminados con hidrocarburos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(2), 249-262. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.02.06>
- Rodríguez, E. N., McLaughlin, M. y Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. FAO (ed.). Roma, Italia.

- Rojas, R. R. y Mendoza, E. L. G. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Producción + Limpia*, 7(2), 74-94.
- Ron, E.Z., y Rosenberg, E. (2014). Enhanced bioremediation of soil spills in the sea. *Current Opinion of Biotechnology*, 27, 191-194. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.02.004>.
- Saffari, M., Saffari, V. R., Khabazzadeh, H., y Naghavi, H. (2020). Assessment of content and chemical forms of arsenic, copper, lead, and chromium in sewage sludge compost as affected by various bulking agents. *Main Group, Met. Chem*, 56-66.
- Sierra, C. (2011). *Calidad del Agua, evaluación y diagnóstico*. Universidad de Medellín (ed.). Colombia.
- SINA. (2019). Descarga de aguas residuales. <http://www.sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?p=12>
- Torres, R. D., Cumana, A., Torrealba, O., y Posada D. (2010). Uso del vetiver para la fitorremediación de cromo en lodos residuales de una tenería. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(2), 175-188.
- Uggetti, E., Ferrer, I., Nielsen, S., Arias, C., Brix, H., y García, J. (2012). Characteristics of biosolids from sludge treatment wetlands for agricultural reuse. *Ecological Engineering*, 40, 210-216. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.030>
- Velásquez, A. J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 151-167. <https://doi.org/10.22490/21456453.1846>
- Vitola, D. Pérez, A., y Montes, D. (2022). Utilización de microalgas como alternativa para la remoción de metales pesados. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(1), 195-203.
- Winpenny, J., Heinz, I., Koo-Oshima., Slagot, M., Collado, J., Hernández, F., y Torricelli, R. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficio para todos?* Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma, Italia.

Capítulo VIII

Análisis de la diversidad genética en maíces nativos: conceptos, parámetros y metodologías¹

Mario Rocandio Rodríguez²
Yolanda del Rocío Moreno Ramírez²

Resumen

En este trabajo se revisan conceptos ampliamente utilizados en investigaciones de diversidad fitogenética, sobre todo en el cultivo de maíz, que aporten elementos al lector para analizar la diversidad genética de plantas cultivadas. Esto es importante para mejorar, aprovechar y plantear propuestas de conservación de dichos recursos, además de repercutir en el ámbito sociocultural y productivo. Para su exploración y estimación se han generado herramientas tecnológicas y estadísticas con el objetivo de generar conocimiento de la diversidad de los recursos fitogenéticos utilizados en la agricultura, que puedan utilizarse en el desarrollo y aplicación de estrategias frente a desafíos ambientales y de producción, para así alcanzar la soberanía y seguridad alimentaria. Así, la importancia de la conservación de estos recursos radica en la caracterización y evaluación de la diversidad fitogenética, siendo fundamental conocer las metodologías estadísticas de análisis de la diversidad, los métodos y parámetros para evaluar y analizarla.

Los recursos fitogenéticos conforman la biodiversidad generada a través del tiempo por la domesticación de los diferentes cultivos, con el objetivo de conservar y aprovechar estos recursos por el humano. Las variantes son múltiples, al grado de que en la actualidad la exploración, documentación y análisis de su magnitud son un desafío para los investigadores en las ciencias agrícolas, lo que

¹ Citar este capítulo, como: Rocandio-Rodríguez, M., y Moreno-Ramírez, Y. R. (2024). Análisis de la diversidad genética en maíces nativos: Conceptos, parámetros y metodologías En: *Perspectivas multidisciplinares para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas*. UAT, México, pp. 211-228.

² Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Ciudad Victoria 87120, Tamaulipas, México. Autor para correspondencia: mrocandio@docentes.uat.edu.mx

ha promovido la generación de técnicas para su exploración y análisis, además, de herramientas tecnológicas y estadísticas. Los estudios de la diversidad genética de las plantas, en particular de las cultivadas para la alimentación humana y de animales, han ayudado a entender y a crear estrategias para el control efectivo de la erosión genética, con lo cual se definen los patrones genéticos de la variación que responden tanto a condiciones agroecológicas como a la diversidad cultural de los grupos humanos que los han cultivado, además, determinan la incorporación de poblaciones e individuos a programas de mejoramiento y aprovechamiento genético, ya sea por sus características sobresalientes *per se*, o por su tolerancia y resistencia a condiciones bióticas o abióticas, lo cual facilita la incorporación de genes para el desarrollo de estrategias en la mejora reproductiva y conservar los materiales genéticos.

Diversidad fitogenética

La diversidad genética de las plantas ocurre como consecuencia de la compleja dinámica de las poblaciones. En la naturaleza, el equilibrio de Hardy-Weinberg en plantas rara vez se consigue debido principalmente a: 1) el tamaño de las poblaciones, que presentan un tamaño definido, por lo que, la frecuencia de los alelos de una generación a otra difiere simplemente por azar de la frecuencia en los cigotos parentales; 2) hay pocas poblaciones aisladas de otras de su misma especie, por lo que, siempre hay posibilidad de migración de genes entre ellas mismas; 3) las plantas cultivadas están sujetas a la selección.

La diversidad genética constituye la base para la evolución de las especies (Mastretta-Yanes et al., 2019), ya que sobre las características relevantes en la adaptación actúa la selección natural para crear la amplia diversidad de organismos que existen; tomando como base esta compleja variación genética generada a través de los años, se ha ido incorporando la selección artificial, que ha generado y mejorado plantas cultivadas con características sobresalientes tanto de producción como de resistencias a factores bióticos y abióticos (Kresovich y McFerson, 1992). La importancia de la biodiversidad no es solo histórica, y promueve la diversidad genética de plantas cultivadas y de sus parientes silvestres planteando estrategias de mejora poblacional e individual, y esto a su vez proporciona un margen de seguridad para los agricultores contra plagas, enfermedades y factores abióticos adversos. Esto también sustenta la producción en los sistemas tradicionales de subsistencia para conservar los recursos fitogenéticos nativos, además de optimizar la producción en ambientes muy variables en los cuales establecen sus cultivos (Cooper y Hobbelink, 1992).

Para la valoración continua de los recursos fitogenéticos, es necesario caracterizar y medir dicha diversidad. La efectividad en la exploración varía según los caracteres evaluados, debido a que están codificados por un gran número de genes distribuidos en el genoma, lo que permite explorar la variabilidad en aquellos de herencia mendeliana (Cordeiro et al., 2000). Sin embargo, es complejo e impreciso el reconocimiento y enumeración de los diversos genotipos en cada uno de los *loci* que definen este tipo de caracteres, debido a que la variación se manifiesta como diferencias imperceptibles, y a la presencia de los efectos pleiotrópicos, epistáticos y poligénicos (Bretting y Widrelechner, 1995).

Diversidad y conservación de los recursos fitogenéticos

México es el cuarto país con mayor diversidad biológica en el mundo y tiene todos los tipos de diversidad vegetal que han sido descritos, así como una alta frecuencia de especies endémicas (Palomino, 1991). La diversidad de especies se debe, entre otros factores, a la amplia variación y combinación de condiciones fisiográficas, eco-geográficas (Rzedowski, 1988). Las plantas cultivadas y su diversidad genética, intrínseca y asociada, han constituido un recurso fundamental y estratégico para el desarrollo de la agricultura. Debido a la gran diversidad vegetal encontrada en el país, México es considerado como parte del centro de origen, diversidad y domesticación denominada región mesoamericana (Vavilov, 1951); de la cual se originaron especies cultivadas como: *Zea mays* L., *Phaseolus vulgaris* L., *Capsicum annuum* L., *Gossypium hirsutum* L., *Agave sisalana* L. y *Cucurbita* spp. (Colunga et al., 1986).

La diversidad vegetal se constituye por la variedad de formas vegetales existentes en una región o nicho ecológico, y está relacionada con las culturas que las conservan y cultivan. Esta relación ha sido poco estudiada, descrita, entendida y apreciada, ya que existen pocos trabajos de investigación acerca del conocimiento tradicional, el mantenimiento local de la diversidad y de las interrelaciones biodiversidad-hombre (Astier et al., 2021).

La diversidad genética en las especies vegetales se ha estudiado principalmente con base en la caracterización morfológica. La variación de los órganos reproductivos y la determinación de sus patrones de variación permite conocer su proceso evolutivo. Además, detectar materia prima es crucial para los programas de mejoramiento genético y diseñar estrategias para la conservación (Simpson y Withers, 1986). La conservación de la diversidad genética es de importancia ecológica, agrícola y económica. En el aspecto ecológico, dicha diversidad está ligada al manejo de los agroecosistemas tradicionales, en los que se maximiza el aprovechamiento del ambiente mediante la interacción entre diferentes

especies y morfotipos de una misma especie. La importancia agrícola está en su uso en diversos agroecosistemas que se sustentan en el uso de variedades nativas locales o regionales, conservadas y desarrolladas por los agricultores, y que suelen satisfacer sus necesidades específicas.

Una estrategia para la conservación de los recursos genéticos de los agroecosistemas tradicionales, conocida como conservación *ex situ*, consiste en coleccionar muestras representativas de germoplasma de cada cultivo de manera intensiva, para mantenerlas en bancos de germoplasma fuera del área de producción (Hernández y Zarate, 1991). Otra forma de preservar la diversidad de una región es la conservación *in situ*, que permite la evolución dinámica de la biodiversidad (Hernández y Zarate, 1991); ya que es realizada por las comunidades, tiene como ventajas el mantenimiento de la intervención cultural de los usuarios del germoplasma y la selección natural (Brush y Perales, 2007).

La conservación *in situ* se percibe como un complemento de gran valor para la conservación *ex situ* de especies nativas, debido a que las poblaciones se pueden preservar bajo los efectos de los procesos biológicos y sociales de la evolución del cultivo (Altieri y Merrick, 1987). Los agroecosistemas tradicionales representan siglos de experiencia acumulada por los campesinos, obtenida por su conocimiento y convivencia con el ambiente (biótico y abiótico); el conocimiento y manejo de las especies y formas dentro de estas son una opción para la conservación y mantenimiento sostenible de la diversidad (Altieri y Merrick, 1987).

Concepto y aplicaciones de la diversidad genética en el cultivo de maíz

Los métodos clásicos que describen los patrones de diversidad entre los grupos de plantas se han basado en caracteres morfológicos; sin embargo, el uso de estos es un método indirecto de medir la diversidad genética y que el ambiente afecta las características morfológicas de la planta. Además, se debe enfatizar que la expresión de algunos caracteres es influenciada por el ambiente. Debido a estos factores, es posible describir patrones de variación mediante el análisis de los datos morfológicos obtenidos en diferentes ambientes utilizando los mismos genotipos (Newbury y Ford-Lloyd, 1997). Por lo tanto, las variables que se evalúan deben ser seleccionadas con base en características a través de ambientes en los cuales se muestre una expresión estable de los caracteres entre los ambientes evaluados (Doebley, 1994).

Una de las desventajas de estos métodos es que una considerable parte de la variabilidad encontrada en los caracteres morfológicos la determinan factores no genéticos y esto conlleva, en muchos casos, a sobreestimar la varianza genética, al incluir en la estimación de un valor de la variación solo atribuible al ambiente.

Por ello, la valoración de las relaciones evolutivas y la estimación de la cantidad y distribución de la variación genética de las poblaciones no se puede basar solo en el análisis de caracteres fenotípicos (Falconer y Mackay, 1996).

La identificación de los polimorfismos naturales a nivel de marcadores, generalmente de ADN, como los microsátélites, o secuencias simples repetidas de ADN (SSRs, por sus siglas en inglés), constituyen una herramienta que ha demostrado confiabilidad en la generación de huellas genómicas, descripción y sistematización de la diversidad genética entre y dentro de poblaciones de plantas cultivadas como el maíz, superando los inconvenientes que presentan las metodologías tradicionales. Una huella genética se refiere a un conjunto de “marcas” asociadas a un individuo o a un grupo de individuos -población, raza-, generadas por los polimorfismos naturales a nivel de marcadores. También se pueden generar huellas genéticas mediante el uso de perfiles electroforéticos de proteínas de almacenamiento o de reserva de la semilla conocidas como isoenzimas.

El marcaje generado por las huellas genéticas tiene múltiples aplicaciones en las ciencias agrícolas. Las huellas genéticas pueden servir para determinar la pertenencia de una población a una raza o subespecie determinada, lo que las convierte en herramientas esenciales para el diseño de estrategias de conservación de los recursos fitogenéticos; además, se les puede utilizar en estudios evolutivos de las plantas cultivadas y como herramientas auxiliares en mejoramiento genético para la detección o predicción de patrones heteróticos entre grupos de poblaciones, maximizando el vigor híbrido entre las progenies de sus eventuales cruzas o para definir esquemas de aprovechamiento más eficiente de la variabilidad genética existente.

El concepto de raza, en el caso del maíz encierra un cierto grado de ambigüedad; Anderson y Cutler (1942) se refieren a esta categoría como “un grupo de individuos relacionados con suficientes características en común para permitir su reconocimiento como grupo”; desde una perspectiva genética, “una raza es un grupo de individuos con un número significativo de genes en común”. Dichos autores visualizaban una raza como fondo genético aplicado a un grupo completo, aunque este pudiera a veces encubierto por variación individual, conceptualizando una raza como fotografía de un grupo de poblaciones.

Al considerar la diversidad genética de maíz en México, se ha mostrado que está ampliamente ligada a las condiciones agroecológicas de una comunidad en particular, incluso que cada agricultor posee diversidad en tipos de maíz, por lo que existe interacción constante entre las diferentes poblaciones que pueden dar lugar a diferentes variantes dentro de la misma raza e incluso nuevas razas, como lo sugieren Herrera et al. (2004).

El planteamiento anterior ha propiciado que la definición de raza se alcance mediante diferentes estrategias; los primeros estudios, como aquellos de Wellhausen et al. (1951) y Hernández y Alanís (1970), se basaron en la distribución geográfica y la morfología de la planta en general, con énfasis en la mazorca y en la espiga; ya avanzada la década de 1970 y en la década de 1980, gracias al desarrollo de métodos estadísticos multivariados ejecutados por computadora, se incorporaron más caracteres, aplicando técnicas de taxonomía numérica (Goodman y Brown, 1988; Cervantes et al., 1978), y aunque los caracteres morfológicos siguieron predominando, se incorporaron efectos de interacción genotipo \times ambiente. La clasificación por taxonomía numérica usando caracteres agronómicos, fisiológicos y morfológicos es una de las herramientas útiles para integrar la variación multivariada de los atributos y conocer las interrelaciones entre las variantes del maíz (Castillo, 1993).

Desde mediados del siglo XX, se publicaron estudios sobre la identificación de razas de maíz en México; entre estos trabajos se encuentran el desarrollado por Wellhausen et al. (1951), quienes describieron 25 razas diferentes, tres subrazas y siete tipos no bien definidos, todos basados en características morfológicas y fisiológicas. En las dos décadas siguientes se redujeron los estudios de clasificación racial en maíz, pero después varios autores adicionaron razas y reordenamientos con colectas de diversos orígenes, empleando nuevas metodologías de análisis (Hernández y Alanís, 1970; Ortega, 1985; Benz, 1986).

Sánchez et al. (2000) estudiaron las razas mexicanas de maíz utilizando herramientas como los marcadores isoenzimáticos y la taxonomía numérica, logrando mayor precisión que en las clasificaciones previas; esto les permitió dilucidar relaciones de similitud entre grupos, precisar algunas razas pobremente definidas y asignar tipos recientemente descritos a grupos definidos. De esta forma, concluyeron que en México existen aproximadamente 59 razas de maíz, las cuales representan el 23.6 % del total estimado para el continente americano, que es de aproximadamente 250 razas (Benz, 1986).

Después del estudio de Wellhausen et al. (1951), distintos grupos de investigadores continuaron con exploraciones y estudios etnobotánicos que han dado como resultado la descripción de razas adicionales, como: Apachito, Azul, Gordo, Bofo y Tablilla de Ocho (Hernández y Alanís, 1970); Ratón, Tuxpeño Norteño, Cristalino de Chihuahua, Onaveño y Palomero de Chihuahua (Ortega, 1985), Chatino Maizón, Mixeño, Choapaneco, Mixteco y Serrano Mixe (Benz, 1986). Sánchez et al. (1993) describieron cuatro de los tipos pobremente definidos por Wellhausen et al. (1951), ubicándolos como las razas Zamorano Amarillo, Mushito, Dulcillo del Noroeste y Blandito, y tres tipos identificados por Ortega

(1979), como Coscomatepec, Motozinteco y Elotero de Sinaloa; de esta forma, la lista de razas mexicanas de maíz ha ido en aumento, reportándose la descripción de 59 razas en los estudios de Sánchez et al. (1993) y Sánchez et al. (2000), además de la raza Purépecha reportada por Mijangos et al. (2007), considerada dentro del complejo Chalqueño.

La variación fitogenética está muy relacionada con las condiciones ambientales de producción, así como con la diversidad de usos que se da al maíz, especialmente al grano (Hernández y Esquivel, 2004). El conocimiento de la variación morfológica y genética, su relación con el ambiente, y el impacto social determinan la estrategia de conservación y aprovechamiento de la diversidad genética del maíz (Castillo, 1993; Ortega et al., 1991). Esta riqueza genética contenida en estas poblaciones de maíz representa posibilidades inmensas para la selección y recombinación de recursos genéticos de maíz en diferentes regiones del país (Ortega, 1985), para la solución de diversos problemas del cultivo.

Con los avances en la genética moderna, ha sido posible estimar la diversidad genética de individuos y de poblaciones a diferentes niveles jerárquicos gracias a la información contenida en el ADN, que se traduce de una secuencia de aminoácidos a una cadena polipeptídica, pues la mayoría de las enzimas y proteínas son productos de genes individuales, aunque en algunos casos las unidades que las forman están codificadas por dos o más genes; por ello, la variabilidad isoenzimática o proteica puede equipararse con la diversidad genética (Goodman y Stuber, 1983). Los marcadores moleculares basados en ADN, como los microsatélites, han ganado aceptación para determinar la diversidad fitogenética. Los marcadores moleculares tienen ciertas ventajas sobre otros tipos de marcadores, ya que en general no son afectados por el ambiente en el que las plantas se desarrollan, y son en la gran mayoría de los casos selectivamente neutros; por lo tanto, evolucionan principalmente como resultado de mutaciones sin restricciones selectivas, lo que resulta en un cambio más o menos lineal en el tiempo (Doebley, 1994).

A finales del siglo pasado se incorporaron las secuencias simples repetidas de ADN, o microsatélites, como marcadores moleculares en humanos (Litt y Luty, 1989), y debido a sus amplias ventajas respecto a otros tipos de marcadores, fueron rápidamente validados y aplicados en maíz (Pejic et al., 1998; Senior et al., 1998; Santacruz-Varela et al., 2004; Rocandío-Rodríguez et al., 2014; Vega-Álvarez et al., 2017; Herrera-Saucedo et al., 2019), y constituyen una herramienta muy importante para el análisis de la diversidad genética, con amplias ventajas comparativas, en virtud de ser marcadores codominantes, multialélicos, con distribución uniforme a través del genoma y por tanto altamente informativos, superando los inconvenientes de las metodologías tradicionales, con la ventaja adicional de que existe información

pública referente a las secuencias de nucleótidos que flanquean individualmente a numerosos *loci*, y que pueden ser utilizadas como iniciadores para su amplificación por la reacción en cadena de la polimerasa (PCR).

Así, se genera información genotípica, que sometida al uso de modernas herramientas estadísticas puede generar datos confiables para analizar la diversidad fitogenética, todo ello con un margen de error cuantificado.

Parámetros y metodologías para la evaluación de la diversidad genética

En los organismos superiores, el genoma contiene muchos miles de genes (Lewin, 1997), por lo tanto, para determinar la variabilidad genética en teoría sería necesario estudiar todos los *loci* pertinentes. En la práctica esto es imposible, así solo una pequeña parte de los genes se muestrean para estimar la variabilidad genética global.

La diversidad genética en las poblaciones puede evaluarse usando diferentes parámetros. Nei (1987) describe los siguientes como los parámetros más comunes para la evaluación: número total de alelos en la población, el número medio de alelos por *locus*, el número medio de alelos por *locus* polimórfico, la heterocigosidad, los estadísticos F, la distancia y la estructura genéticas.

Una medida de la diversidad genética individual son los niveles totales de heterocigosidad o diversidad genética, que es definida como la probabilidad de que dos individuos parentales tomados al azar de una población tengan diferentes alelos en ese *locus*, que pueden ser idénticos para la heterocigosidad esperada bajo equilibrio Hardy-Weinberg. Cuando se evalúan muchos *loci*, se estima la heterocigosidad promedio sobre el grupo de *loci* muestreados (Nei, 1978), este parámetro está desconectado de las frecuencias genotípicas actuales, así que se entiende como la medición del grado de variación alélica, más que la medición de la frecuencia de los heterocigotos, exceptuando las poblaciones que se encuentren en el equilibrio de Hardy-Weinberg (Nei, 1973).

El polimorfismo se define como la ocurrencia simultánea dentro o entre poblaciones de múltiples formas fenotípicas de un carácter atribuible a los alelos de un simple gen o los homólogos de un cromosoma. Es un parámetro usado comúnmente cuando la inspección se realiza sobre un gran número de *loci*. Un *locus* es considerado polimórfico si la frecuencia del alelo más frecuente es igual o menor a 0.99; sin embargo, este límite es arbitrario y pueden tomarse valores de referencia similares, como 0.95 o 0.995. Es importante considerar estos valores al momento de hacer comparaciones con otros estudios (Meffe y Carrol, 1994).

El número de alelos por *locus* ha sido empleado como una medida de variabilidad genética, este parámetro se espera sea grande cuando la amplitud del

polimorfismo es alta; sin embargo, tiene una gran desventaja como una medida general de variabilidad genética, debido a que el número de alelos observados depende del tamaño de la muestra, de tal forma que la comparación de estos valores puede ser imprecisa, a menos que el tamaño de la muestra sea similar. El tamaño de muestra es crítico porque con frecuencia muchos alelos con baja frecuencia y el número de alelos observados pueden incrementar rápidamente con el tamaño de muestra (Nei, 1987).

La heterocigosidad esperada, se considera un parámetro muy apropiado para medir la diversidad genética, debido a que en este se refleja no solo el número de alelos presentes en una población determinada, sino también las frecuencias con que se presentan dichos alelos (Pejic et al., 1998), y prácticamente no se ve afectado por el tamaño de muestra. Cuando se evalúan muchos *loci*, se estima la heterocigosidad promedio del grupo de *loci* muestreados (Nei, 1977). Este parámetro no está relacionado con las frecuencias genotípicas, de manera que la intención es que represente una medida del grado de variación alélica, más que una medida de la frecuencia de heterocigotos, excepto en una población en equilibrio de Hardy-Weinberg (Nei, 1973).

La estructura o identidad genética se utiliza en los análisis de diversidad fitogenética para conocer cómo está distribuida la diversidad entre y dentro de poblaciones en el espacio y/o a través del tiempo, las medidas de diferenciación genética más comúnmente usadas son los estadísticos F , que son una medida de correlación de alelos dentro de individuos y son una extensión de los coeficientes de endogamia, que representan la magnitud de asociación no aleatoria de alelos dentro de un individuo. Así, los estadísticos F describen el grado de los efectos de endogamia de forma jerárquica dentro de poblaciones (F_{IS}), entre subpoblaciones o poblaciones (F_{ST}) y dentro de una población entera (F_{IT}). Estos cálculos utilizan las comparaciones entre la heterocigosidad observada y la esperada, asumiendo que existe equilibrio de Hardy-Weinberg en los diferentes niveles jerárquicos (Santacruz-Varela, 2001). El estadístico F_{ST} es una cantidad medible de la variación genética, que es atribuible al agrupamiento de muestras en las subpoblaciones (Hartl y Clark, 2006); por ejemplo, un valor de 0.05 significa que 5 % de la variación genética observada se debe a la existencia de subpoblaciones y que el otro 95 % de la variación observada se debe a la variación genética entre individuos dentro de subpoblaciones.

La diversidad genética ha conducido a los organismos vivos hacia la divergencia genética. La distancia genética es la amplitud cuantificable de las diferencias genéticas entre poblaciones o especies (Nei, 1987); el parecido o similitud entre dos o más unidades taxonómicas operacionales -OTU, por sus

siglas en inglés, es un término general aplicable a objetos, especies, poblaciones, individuos que se están clasificando- se puede cuantificar, aplicando un coeficiente de similitud o disimilitud. Con estos coeficientes matemáticos pueden calcularse las similitudes o disimilitudes, respecto a cada par posible de OTUs de una matriz básica de datos.

La distancia puede estar basada en caracteres fenotípicos, frecuencias alélicas o secuencias de ADN. De acuerdo con Reif et al. (2005), la selección del coeficiente de similitud o disimilitud más apropiado dependerá de los objetivos del estudio, de la naturaleza de las OTUs de la propiedad de la distancia entre las OTUs y de los caracteres, entre otros aspectos.

Algunas de las distancias genéticas más comúnmente utilizadas son: la distancia genética mínima de *Nei* (Nei, 1972), la distancia genética estándar (Nei, 1973) y la distancia genética máxima (Nei, 1987). De acuerdo con Nei (1987), la distancia genética mínima es una medida del número mínimo de diferencias de codones por *locus*, calculando la probabilidad de que dos alelos -uno de cada población- sean diferentes, lo que implica que al menos un codón es diferente entre ellos. Una desventaja de la distancia mínima es que sus componentes son la proporción de genes diferentes entre dos genomas elegidos al azar, de modo que, la distancia puede ser subestimada cuando el número de diferencias de codones es grande (Nei, 1987).

Otras distancias comunes son la distancia genética de Cavalli-Sforza y Edwards, en su forma original (Cavalli-Sforza y Edwards, 1967) o con modificaciones para tomar en cuenta las distancias multilocus (Rogers, 1986); la distancia de Rogers, modificada por *Wright* (Wright, 1978), es la más usada para frecuencias alélicas obtenidas a partir de isoenzimas y microsatélites, la cual se calcula con la siguiente expresión:

$$d_{ij} = \sqrt{\frac{1}{2n_{loci}} \sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2}$$

Rogers (1986) señala que los diferentes índices de distancias genéticas presentan ventajas y desventajas como producto de varias propiedades estadísticas y genéticas como la metricidad, término que se refiere a la representación de casos como puntos en un espacio de coordenadas, de modo tal que las similitudes y disimilitudes observadas de los puntos corresponden a distancias métricas entre ellos.

Empleando las diferentes distancias genéticas, se pueden construir los análisis de agrupamientos, los cuales ayudan a entender la diversidad genética, que representa las similitudes obtenidas de la matriz de unidades taxonómicas en

un arreglo en forma de árbol llamado dendrograma. Los métodos más populares pertenecen a las técnicas jerárquicas aglomerantes. Estas técnicas parten de una matriz de distancias, formando un primer grupo entre el par de OTUs con la distancia menor, posteriormente, se calculan las proximidades de cada OTU restante con el primer grupo. Los algoritmos para realizar este procedimiento son variados; uno de los más utilizados es el UPGMA -Método de Promedios Intergrupales no Ponderados-, este método define la proximidad entre dos agrupamientos como el promedio entre todos los pares de OTUs que conforman a uno de los agrupamientos (Kohlmann, 1994). El método “Neighbor-Joining” o de agrupamiento de vecinos, asume que todos los linajes no han divergido en igual magnitud; en contraste con otros métodos y en forma general, este localiza los nudos a los que se unen las OTUs, y establece las distancias entre nudo y OTU, y entre los nudos. El algoritmo es un caso del método de descomposición de una estrella, y es particularmente útil cuando los caracteres usados exploran las relaciones evolutivas (Swofford et al., 1996). En caso de que no se pueda demostrar claramente la existencia de una estructura jerárquica de las OTUs en estudio, se recomienda el uso de métodos de ordenación. Estos reducen la multidimensión original a dos o tres dimensiones más fáciles de interpretar; las relaciones se indican por las posiciones de los puntos que representan a las OTUs en este nuevo espacio; la desventaja es que no trazan límites en el espacio que separen grupos, ni indican grados de relación jerárquica entre ellos.

No obstante, la técnica más conocida para el agrupamiento de la diversidad genética es el análisis de componentes principales. Este procedimiento multivariado conduce a un conjunto de p caracteres compuestos no correlacionados ordenados por varianza decreciente; por lo que, usando los primeros, se simplifica el análisis. De las aplicaciones posibles, este análisis es útil cuando se desean agrupar las unidades experimentales en subgrupos de tipos semejantes o para verificar los resultados de los programas de agrupación (Johnson, 1998).

En análisis de diversidad y de filogenia se han realizado estudios en los cuales se integran datos morfológicos y moleculares en una sola matriz para sus análisis estadísticos; un principio del feneticismo sostiene que la similitud total entre dos entidades es la suma de la similitud de cada uno de los caracteres utilizados en la clasificación, para ello las clasificaciones deben efectuarse con un gran número de caracteres (Sneath y Sokal, 1962). Uno de los métodos más aceptados para analizar la información es el del análisis simultáneo o evidencia total, ya que proporciona mayor precisión a las clasificaciones, maximiza la eficiencia descriptiva y el poder explicativo de la información (Kluge y Wolf 1993; Santacruz-Varela, 2001; Rocandio-Rodríguez et al., 2020).

De Queiroz et al. (1995) proponen que los análisis por separado obedecen a que diferentes conjuntos de datos pueden causar conflictos en la resolución de los árboles o clasificaciones, dado que la naturaleza de los caracteres puede tener diferente origen; es decir, pueden estar afectados en mayor o menor grado por la selección natural o artificial, o pueden tener diferente tasa evolutiva, entre otras razones; por otra parte, Chippindale y Wiens (1994) argumentan la posibilidad de obtener clasificaciones mejor sustentadas cuando se usan caracteres de diferente naturaleza.

Para poder analizar todos los caracteres de manera simultánea, Gower (1971) propuso un Coeficiente General de Similitud aplicable a tres tipos de caracteres: de doble estado, multi-estado (ordenados y cualitativos) y cuantitativos; además contempla las situaciones de valores faltantes. La similitud entre dos individuos i y j está dada por la expresión:

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^p W_{ijk} S_{ijk}}{\sum_{k=1}^p W_{ijk}}$$

Conclusión

El análisis de la diversidad morfológica de plantas cultivadas ha sido muy útil para conocer la diversidad genética de los cultivos de forma rápida y sencilla, pero las condiciones ambientales influyen en la expresión de caracteres morfológicos que no se suele controlar satisfactoriamente, mediante la utilización de los marcadores moleculares, como los microsátélites, de importancia para sanear las limitantes de los marcadores morfológicos; además ayudan a la descripción y sistematización de la diversidad entre y dentro de las poblaciones.

Los parámetros más comunes para la evaluación de la diversidad genética son: número total de alelos en la población, el número medio de alelos por *locus*, el número medio de alelos por *locus* polimórfico, la heterocigosidad, los estadísticos F , la distancia genética, y la estructura genética, que fueron sometidos a métodos estadísticos apropiadas en programas de cómputo modernos, se vuelven una herramienta indispensable para la toma de decisiones en programas de conservación y aprovechamiento de los recursos fitogenéticos nativos, como ocurre con el maíz.

Referencias

- Abdel-Mawgoud, A. M., Aboulwafa, M. M., y Hassouna, N. A. (2008). Characterization of surfactin produced by *Bacillus subtilis* isolate BS5. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 150(3), 289-303. <https://doi.org/10.1007/s12010-008-8153-z>
- Akwukwaegbu, R. N., Okerentugba, P. O., Okpokwasili, G. C., Stanley, H. O., y Ugboma, C. J. (2019). Hydrocarbon degradation potential of heterotrophic bacteria isolated from oil polluted sites in Sakpenwa community in Rivers State. *South Asian Journal of Research in Microbiology*, 4(2), 1-12. <https://doi.org/10.9734/sajrm/2019/v4i230102>
- Alonso-Bernales, T., Mora-Ravelo, S.G., Alarcón, A., y Flores, G. J. (2016). *Destoxificación de As, Mn y Pb, con Chlorella vulgaris CLV2 en las aguas residuales de Cd. Tampico, Tamaulipas*. Tesis de Maestría. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, Tamaulipas, México.
- Anastopoulos, I., y Kyzas, G. (2015). Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae, *Journal of Molecular Liquids*, 209, 77-86.
- Banco Mundial. (2021). *Water in agriculture*. <http://www.bancomundial.org/es/topic/water-in-agriculture>
- Barois, I., Contreras-Ramos, S. M., Hernández-Castellanos, B., de los Santos, M., Martínez E., y García D. R. (2018). *El suelo y el petróleo: Estudio de caso de biorremediación en pasivo ambiental de Papantla, México*. Instituto de Ecología A.C. (ed.), Xalapa, México.
- Briceño, J. (2018). *Identificación molecular de cepas hidrocarbonoclastas nativas de suelos en sitios contaminados por petróleo crudo en Tabasco y Veracruz, México*. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Burbano-Orjuela, H. (2016). The soil and its relationship with ecosystem services and food security. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 117-124. <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.163302.58>
- Campos, M. E., García, R. N., Velásquez, R. A., y García, F. M. (2009). Análisis básico del reúso de lodos residuales de una planta de tratamiento de aguas residuales en suelos de pradera del parque nacional Nevado de Toluca. *Quivera*, 11(2), 35-51. <https://quivera.uaemex.mx/article/view/10259>
- Cavazos-Arroyo, J., Pérez-Armendáriz, B., y Mauricio-Gutiérrez, A. (2014). Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburos en suelos agrícolas de Acatzingo Puebla, México. *Agricultura Sociedad y Desarrollo*, 11(4), 539-550.
- Centro de Coordinación y Apoyo a Emergencia. (2022). CCEA. Vía transparencia
- CNH (Comisión Nacional de Hidrocarburos). (2015). *Reporte de Derrames de Petróleo Crudo 2000-2014*. http://www.cnh.gob.mx/_docs/Reporte_de_volumen_de_petroleo_crudo_derramado_y_fugas_de_gas_natural_I_2014.pdf
- CONAGUA. (2011). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y plantas de tratamiento de aguas residuales en operación*. Comisión Nacional del Agua (ed.). México.

- _____. (2017a). *Inventario nacional de plantas de tratamiento de agua residual*. Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT (eds.). México.
- _____. (2017b). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: procesos de oxidación bioquímica con biomasa suspendida*. Comisión Nacional del Agua (ed.). México.
- _____. (2019). Estadísticas del agua en México. *CONAGUA (ed.)*. México.
- Cortés Torres, E. C. (2016). *Remoción de arsénico, cobre y hierro de lodos residuales con Phragmites australis*. Tesis de Maestría. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Cd. Victoria, Tamaulipas. México.
- Cortés-Torres, C., Barrientos-Lozano, L., Rocandio-Rodríguez, M., Almaguer-Sierra, P., Alarcón, A., Rosas-Mejía, M., y Mora-Ravelo, S. G. (2019). Removing arsenic, copper, and iron from sewage sludge with reed (*Phragmites australis*). *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(3), 5603-5617. https://doi.org/10.15666/Aeer/1703_56035617
- Cuautle Hernández, V. A., Mendoza, P. L., Minto, R. M., Gil, M. S., Anacleto J. N., Vásquez, C. M. F., Ortiz, P. P., Evelin Jazmín Cortes, G. E. J., Flores, M. P., Mendoza, J. C., Pérez O. G. (2021). Aplicaciones de la biorremediación. *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias*, 12(31), 2-75.
- David, L. G., Matache, M. L., Tudorache, A., Chisamera, G. B., Rozyłowicz, L., y Lucian, R. G. (2012). Food chain biomagnification of heavy metals in samples from the lower prut food plain natural park. *Environmental Engineering and Management Journal*, 11(1), 69-73. <https://doi.org/10.30638/eemj.2012.010>
- Elekes, C. (2014). Eco-Technological solutions for the remediation of polluted soil and heavy metal recovery. Pp. 309-335. En M. Hernandez (ed.), *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*. InTech. London, United Kingdom.
- FAO y GTIS. (2015). *Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) - Resumen Técnico*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo. Roma, Italia.
- FAO. (2021). *FAOstat Home*. <http://www.fao.org/faostat/es/#home>
- Fundación de Chile. (2019). *Manual de tecnologías de remediación de sitios contaminados*. Gobierno de Chile. https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/10/manual-detecnologías-de-remediacion-de-sitios-contaminados_baja-1.pdf
- Furcal-Beriguete, P., y Torres-Morales, J. L. (2020). Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de *Theobroma cacao* L. en Costa Rica1. *Revista Tecnología en Marcha*, 33(1), 122-137.
- Ganesh, A., y Ling, J. (2009). Diesel degradation and biosurfactant production by Gram-positive isolates. *African Journal of Biotechnology*, 8(21), 5847-5854. <https://doi.org/10.5897/AJB09.811>

- García-Pérez, J., Beuckels, A., Vandamme, D., Depraetere, O., Foubert, I., Parra, R., y Muylaert, K. (2014). Influence of magnesium concentration, biomass concentration and pH on flocculation of *Chlorella vulgaris*. *Algal Research*, 3, 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2013.11.016>
- Guadarrama-Brito, Ma. E., y Galván, F. A. (2015). Impacto del uso de agua residual en la agricultura. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 4(7), 1-20.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2019). *Sistema de cuencas nacionales de México*. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/temas/ee/>
- Jaramillo, M. F. y Restrepo, I. (2017). Wastewater reuse in agriculture: a review about its limitations and benefits. *Sustainability*, 9(2), 1734-1753. <https://doi.org/10.3390/su9101734>.
- Jing, X., Yao, G., Liu, D., Yiran, L., Luo, M., Zhou, Z., y Wang, Z. (2017). Effects of wastewater irrigation and sewage sludge application on soil residues of chiral fungicide benalaxyl. *Environmental Pollution*, 224, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.03.004>
- Kumar, D., Pandey, L. K., y Gaur, J. P. (2016). Metal sorption by algal biomass: From batch to continuous system. *Algal Res*, 18, 95-109. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.05.026>
- Lara, J. A. y Hernández, A. (2003). Reutilización de aguas residuales: aprovechamiento de los nutrientes en riego agrícola. *Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales*. Instituto Cinara, Universidad del Valle, 237-242
- Martínez-Austria, P. F., Díaz-Delgado, C., y Moeller-Chávez, G. (2019). Water security in México: general diagnosis and main challenges. *Ingeniería del Agua*, 23(2), 107-121. <https://doi.org/10.4995/Ia.2019.10502>
- Mauricio-Gutiérrez, A., Jiménez-Salgado, T., Tapia-Hernández, A., Cavazos-Arroyo, J., y Pérez-Armendáriz, B. (2014). Biodegradation of hydrocarbons exploiting spent substrate from *Pleurotus ostreatus* in agricultural soil. *African Journal of Biotechnology*, 13(33), 3385-3393. <https://doi.org/10.5897/AJB2014.13964>.
- Mauricio-Gutiérrez, A., Machorro-Velázquez, R., Jiménez-Salgado, T., Vázquez-Cruz, C., Sánchez-Alonso, M.P., y Tapia-Hernández, A. (2020). *Bacillus pumilus* and *Paenibacillus lautus* effectivity in the process of biodegradation of diesel isolated from hydrocarbons contaminated agricultural soils. *Archives of Environmental Protection*, 46(4), 59-69. <https://doi.org/10.24425/aep.2020.135765>
- Melián-Navarro, A. y Fernández- Zamudio, Ma. A. (2015). Reutilización de agua para la agricultura y el medioambiente. *Agua y Territorio*, 8, 80-92.
- Mohanta, S., Pradhan, B., y Behera, I.D. (2023). Impact and remediation of petroleum hydrocarbon pollutants on agricultural land: a review. *Geomicrobiology Journal*. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2243925>

- Mora-Ravelo, S. G., Alarcón, A., Rocandio-Rodríguez, M., y Vanoye, E, V. 2017. Bioremediation of wastewater for reutilization in agricultural system: Review. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(1), 33-50. http://dx.doi.org/10.15666/aecer/1501_033050
- Moreno, E. (2010). *Recuperación de suelos mineros contaminados con arsénico mediante fitotecnologías*. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Madrid. España.
- Moura Chagas, J., Celio de Figueiredo, C., & Paz-ferreiro, J. (2021). Geoderma Sewage sludge biochars effects on corn response and nutrition and on soil properties in a 5-yr field experiment. *Geoderma*, 401(July). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115323>
- Muro-González, D. A., Mussali-Galante, P., Valencia-Cuevas, L., Flores-Trujillo, K., y Tovar-Sánchez, E. (2020). Morphological, physiological, and genotoxic effects of heavy metal bioaccumulation in *Prosopis laevigata* reveal its potential for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(32), 40187-40204.
- Navarro, M. V. R. (2006). Los desastres en su interacción con la ciencia, la tecnología y la sociedad. *MediSur*, 4(2), 50-58.
- Negm, N. A., Abd El Wahed, M. G., Hassan, A. R. A., y Abou Kana, M. T. H. (2018). Feasibility of metal adsorption using brown algae and fungi: Effect of biosorbents structure on adsorption isotherm and kinetics. *J. Mol. Liq.* 264, 292-305. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.027>
- Norma Oficial Mexicana. (1993). *NOM-CCA-32-ECOL/1993. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales de origen urbano o municipal para su disposición mediante riego agrícola*.
- _____. (2002). *NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final*.
- OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries). (2020). *Annual Statistical Bulletin*. https://www.opec.org/opec_web/en/publications/202.htm
- Oscanoa Huaynate, A., Cervantes Gallegos, M., Flores Ramos, L., y Ruiz Soto, A. (2021). Evaluación del potencial de *Desmodesmus asymmetricus* y *Chlorella vulgaris* para la remoción de nitratos y fosfatos de aguas residuales. *Revista peruana de biología*, 28(1).
- PEMEX (Petróleos Mexicanos). (2002). *Fuga de crudo en el oleoducto nuevo Teapa-Venta de Carpio-Tula*. Boletín No. 19. <http://www.pemex.com/index.cfm?action=news§ionID=8&catID=40&contentID=269>
- _____. (2018). *Reporte de tomas clandestinas en 2018*. http://www.pemex.com/acerca/informes_publicaciones/Paginas/tomas-clandestinas.aspx
- Peña, M., Ducci, J., y Zamora, V. (2013). *Tratamiento de aguas residuales en México*. Banco Interamericano de Desarrollo, Sector de Infraestructura y Medio Ambiente (ed.). Nota Técnica. IDB-TN-521. México.

- Pérez-Armendáriz, B., Mauricio-Gutiérrez, A., Jiménez-Salgado, T., y Tapia-Hernández, A. (2013). Emulsification of hydrocarbons using biosurfactant producing strains isolated from contaminated soil in Puebla, Mexico. En Chamy R., y Rosenkranz F. (eds). *Biodegradation Engineering and Technology*. InTech. London, United Kingdom.
- Peruzzi, E., Masciandaro, G., Macci, C., Doni, S., y Ceccanti, B. (2011). Pollutant monitoring in sludge treatment wetlands. *Water Science & Technology*, 64(7), 1558-1565. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.589>
- Ramalho, R. S. (2021). *Tratamiento de aguas residuales*. Reverté.
- Ramos-Gómez, M., Avelar J., Medel-Reyes, A., Yamamoto, L., Godínez, L., Ramírez, M., Guerra, R. y Rodríguez, F. (2012). Movilidad de metales en jales procedentes del distrito minero de Guanajuato, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), 49-59.
- Ramos, R., y Pizarro, R. (2018). Crecimiento y capacidad de biorremediación de *Chlorella vulgaris* (Trebouxiophyceae, Chlorophyta) cultivada en aguas residuales generadas en el cultivo del pez dorado *Seriola lalandi* (Perciformes: Carangidae). *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 53(1), 75-86. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572018000100075>
- Rivera-Pineda, F. (2011). *Situación socio económica y ambiental de los productores de Acatzingo, Puebla, por el derrame de hidrocarburos en sus suelos agrícolas*. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados, Campus Puebla.
- Rivera, O. P., Rivera L., J. M., Andrade, L. E. del C., Heyer, R. L., de la Garza, R. F. R., y Castro, M. B. I. (2018). Bioestimulación y biorremediación de recortes de perforación contaminados con hidrocarburos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(2), 249-262. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.02.06>
- Rodríguez, E. N., McLaughlin, M. y Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. FAO (ed.). Roma, Italia.
- Rojas, R. R. y Mendoza, E. L. G. (2012). Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. *Producción + Limpia*, 7(2), 74-94.
- Ron, E.Z., y Rosenberg, E. (2014). Enhanced bioremediation of soil spills in the sea. *Current Opinion of Biotechnology*, 27, 191-194. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2014.02.004>.
- Saffari, M., Saffari, V. R., Khabazzadeh, H., y Naghavi, H. (2020). Assessment of content and chemical forms of arsenic, copper, lead, and chromium in sewage sludge compost as affected by various bulking agents. *Main Group, Met. Chem*, 56-66.
- Sierra, C. (2011). *Calidad del Agua, evaluación y diagnóstico*. Universidad de Medellín (ed.). Colombia.
- SINA. (2019). Descarga de aguas residuales. <http://www.sina.conagua.gob.mx/sina/index.php?p=12>

- Torres, R. D., Cumana, A., Torrealba, O., y Posada, D. (2010). Uso del vetiver para la fitorremediación de cromo en lodos residuales de una tenería. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 1(2), 175-188.
- Uggetti, E., Ferrer, I., Nielsen, S., Arias, C., Brix, H., y García, J. (2012). Characteristics of biosolids from sludge treatment wetlands for agricultural reuse. *Ecological Engineering*, 40, 210-216. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.12.030>
- Velásquez, A. J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 151-167. <https://doi.org/10.22490/21456453.1846>
- Vitola, D., Pérez, A., y Montes, D. (2022). Utilización de microalgas como alternativa para la remoción de metales pesados. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 13(1), 195-203.
- Winpenny, J., Heinz, I., Koo-Oshima., Slagot, M., Collado, J., Hernández, F., y Torricelli, R. (2013). *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficio para todos?* Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma, Italia.

Capítulo IX

El secado solar de frutos de *Capsicum* sp para la producción de chiles secos¹

Yolanda del Rocío Moreno Ramírez²
Ma. Teresa de Jesús Segura Martínez²

Resumen

Los chiles, frutos del género *Capsicum*, tienen gran importancia económica, impulsan el desarrollo del sector primario, y generan ingresos monetarios a distintos niveles: regional, nacional y mundial. El color, aroma y picor son propiedades organolépticas asociadas a la preferencia del consumo de chile; además, el valor nutricional por sus compuestos bioactivos otorga a los chiles valor agregado. Los chiles son fuente de compuestos bioactivos, como carotenoides, ácido ascórbico, polifenoles, entre otros, mismos que tienen alta capacidad antioxidante y suministran vitaminas y antioxidantes que mejoran la calidad de la dieta humana. El secado es un proceso de conservación de los chiles, actividad que inicia exponiendo frutos al sol para reducir el contenido de agua y obtener productos sólidos para prevenir su deterioro. Sin embargo, este proceso induce cambios físicos y químicos que tienen impacto negativo en la calidad y vida útil de los chiles. Los secadores solares son una extensión del secado directo al sol, cuyo diseño debe ser eficiente, rentable y sostenible, es decir, una ecotecnología capaz de conservar productos agrícolas con calidad organoléptica, principalmente en áreas rurales, como ocurre con la producción de chiles secos en México. La calidad de los chiles para uso y comercio depende del color y el picor; no obstante, son omitidos en el proceso de secado al sol dirigiendo los resultados únicamente a la eliminación de agua. Con base en evaluaciones y grados de tecnificación distintos, el secado mediante secadores solares tiene el potencial de contribuir a las características deseables e indeseables

¹ Citar este capítulo, como: Moreno-Ramírez, Y. d. R. y Segura-Martínez, Ma. T. J. (2024). El secado solar de frutos de *Capsicum* sp. para la producción de chiles secos En *Perspectivas multidisciplinares para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas*. UAT, México, pp. 229-250.

² Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Ciudad Victoria 87120, Tamaulipas, México. yrmoreno@docentes.uat.edu.mx

de los chiles en relación con sus cambios físicos y bioquímicos, lo cual influye en su calidad y vida útil. Son escasos los estudios publicados acerca de los procesos con secadores solares para la producción de chiles secos en México tanto de variedades comerciales como locales.

La conservación de los alimentos a través del secado

La alimentación tiene un papel determinante en la evolución humana, es vital e incidente en la promoción de la salud y prevención de enfermedades, además, mantiene múltiples dinámicas para estabilidad de cualquier sociedad (Cai et al., 2020). En relación con la selección de alimentos, Armelagos (2014) ha propuesto tres factores determinantes: el primero de ellos se basa en la disponibilidad y la eficiencia con la que los nutrientes se extraen del medio ambiente, considerando que una dieta equilibrada debe aportar energía y aminoácidos esenciales. El segundo se relaciona con la forma de preparación, es decir, el procesamiento de los alimentos, desde el momento en que adquieren hasta que se consumen. El último factor es el sabor, asociado con las propiedades organolépticas, en estrecha relación con las características funcionales. Estas propiedades y sus particularidades en plantas, frutos y semillas derivaron en vínculos entre la composición de la dieta y, la generación y elección de técnicas alrededor de su aprovechamiento, mientras que el manejo posterior a la cosecha implicó el desarrollo de conocimientos en torno al procesamiento de los alimentos (Wollstonecroft, 2011). Asimismo, el sabor para la sociedad humana genera información sensorial relacionada con la biocultura (Turner, 2010).

La dieta de los cazadores-recolectores probablemente consistió en carne, plantas, frutas y semillas, que habrían de ser consumidos en un periodo corto; “un valioso recurso como el alimento no podía desperdiciarse”, señala Boop (2019), en relación con la evolución de la preservación y empaquetado de los alimentos. La conservación de los alimentos llevó a extender el tiempo de su vida útil a través del desarrollo de técnicas en las que incidieron múltiples factores como la cultura, geografía y recursos naturales distintos que coincidieron para generar técnicas básicas de conservación de los alimentos. La conservación de alimentos suscitó circunstancias particulares entre distintas culturas, en momentos y lugares diferentes; no obstante, su característica común fue la ejecución de técnicas básicas de conservación, lo cual llevó en gran parte a establecer y consolidar las sociedades humanas (Chandramohan, 2019). Con el surgimiento de la agricultura se amplió la disponibilidad de los recursos y opciones alimenticias; sin embargo, el aseguramiento de esta disponibilidad al terminar el ciclo de producción y el cuidado del excedente obtenido generó la necesidad de comprender y controlar el deterioro

de los alimentos, lo cual comienza en la cosecha o cuando se realiza la matanza de un animal para obtener carne. La conservación es requerida cuando los alimentos son cosechados u obtenidos del medio del cual derivan, por ende, es indispensable identificar las propiedades o características de los alimentos que se quieren conservar (Morales-de la Peña et al., 2019); con ello se aumenta la posibilidad de su disposición por un tiempo más largo, comúnmente, hasta la próxima cosecha. El ahumado, secado y la fermentación fueron los primeros métodos de conservación de alimentos junto con las vasijas para almacenarlos, protegerlos y disponer de ellos (Boop et al., 2019).

La disminución de la calidad nutricional y organoléptica de los alimentos es resultado de sus propias actividades metabólicas y del crecimiento microbiano posterior a su cosecha u obtención; esto puede contrarrestarse con diferentes procesos con el fin de mantener la calidad deseada para que los beneficios y el valor nutricional de los alimentos sean máximos (Amit et al., 2017). El procesamiento de alimentos facilita el acceso a mayores cantidades de nutrientes digeribles y energía, genera dietas más diversas, y hace posible la producción de alimentos más seguros y estables (He, 2019).

La suma de los procesos o técnicas alrededor de minimizar o en el mejor de los casos evitar el efecto de los factores internos y externos del deterioro de los alimentos se conoce como conservación de alimentos y tiene por objetivo aumentar la vida útil manteniendo los valores nutricionales, el color, la textura y el sabor originales (Amit et al., 2017).

La conservación proporciona el suministro alimenticio aun en condiciones ambientales adversas, permitiendo la satisfacción de necesidades básicas y sociales de los individuos, por ello se considera como uno de los logros más importantes en la historia de la humanidad (Erbersdobler, 1991), que además mantuvo gran parte de las beneficios bioactivos y nutrimentales por mayor tiempo, ampliar su disponibilidad y facilitar su traslado, teniendo en cuenta que todas las fuentes alimenticias, principalmente plantas y animales, son de naturaleza perecedera (Rahman, 2019). Entre las principales ventajas de la conservación de alimentos destaca la prevención del crecimiento de levaduras, hongos y bacterias, y retrasa la oxidación de las grasas que causan el enranciamiento (Shajil et al., 2018). De acuerdo con su acción, las principales técnicas de conservación de alimentos se clasifican en: i) desacelerar o inhibir el deterioro químico y el crecimiento microbiano, ii) inactivar directamente bacterias, levaduras, mohos o enzimas, y iii) evitar la contaminación antes y después del procesamiento (Gould, 2000).

El secado es una forma de conservación de alimentos de tipo inhibitorio. Es un método milenario de preservación que se inició exponiendo los alimentos a la

luz del sol para reducir el contenido de agua y obtener productos sólidos; además, el uso de la radiación solar para la conservación de los alimentos -hortalizas, frutas, pescado, carne, entre otros- es una de las aplicaciones más antiguas de la energía solar (Belessiotis y Delyannis, 2011).

De acuerdo con Mujumdar y Menon (2020), el secado es un proceso complejo de transferencia de masa y calor, que reside en la eliminación de agua u otro solvente por evaporación de un sólido, semisólido o líquido donde pueden o no presentarse reacciones químicas; y suscitarse como resultado de convección, conducción o radiación y, en algunos casos, como resultado de una combinación de estos factores. El secado es un proceso controlado por transferencia de calor externa, donde se suscita el transporte tanto de calor como de masa dentro y fuera de los materiales alimentarios. Durante una transferencia simultánea de calor y masa, la humedad se evapora cerca de la superficie por varios mecanismos, como la difusión de líquido y vapor, los flujos capilares y por gravedad, y el flujo causado por la contracción y los gradientes de presión (Udomkun et al., 2020). Asimismo, el tiempo de secado es un factor relevante y correlacionado con el consumo de energía (Llavata et al., 2020). Por tanto, el secado de los alimentos es un proceso complejo donde, además, la estructura diferencial de cada alimento tiene efecto (Erbay y Icier, 2010).

Con base en el procedimiento de eliminación de agua aplicado, los procesos de secado pueden clasificarse en térmico, osmótico y mecánico, considerando factores como: el tipo de producto a secar, las propiedades deseadas del producto terminado, la tolerancia a la temperatura permisible, la susceptibilidad del producto al calor, los pretratamientos requeridos, el capital y costos de procesamiento, y factores ambientales (Llavata et al., 2020).

El secado permite múltiples ventajas, ya que al eliminar el agua se previene el riesgo de crecimiento de microorganismos, minimiza varias de las reacciones degradadoras intermedias como reacciones enzimáticas, oscurecimiento no enzimático y oxidación de lípidos y pigmentos (Omolola et al., 2017). Para la industria, el secado, además de reducir el contenido de humedad y la actividad del agua a límites seguros que prolonguen la vida útil, minimiza la demanda de empaque (Jin et al., 2018), simplifica el tránsito al reducir el volumen y el peso del producto, con implicaciones en la disminución de costos de manipulación, embalaje y transporte (Omolola et al., 2017).

Los alimentos secos generan nuevas formas de aprovechamiento, considerando las propiedades físicas y organolépticas del alimento seco y las variantes culinarias dentro de cada cultura o grupo poblacional y espacio geográfico derivando en un mosaico de percepciones, apreciaciones y preferencias alimenticias (Li Zhen et al., 2019).

Al determinar la cantidad y calidad de los antioxidantes fenólicos en higos, tanto en frutos secos como en frutos frescos, Vinson et al. (2005) identificaron que los frutos secos presentaron mayor cantidad de nutrientes, contenido de fibra, vida útil, además de un contenido de fenoles antioxidantes significativamente mayor en comparación con las frutas frescas, denotando que la cantidad de fenoles en los frutos secos son fuente de antioxidantes importantes. De ahí la importancia de considerar la calidad deseada de los productos, la economía del proceso y el impacto ambiental del método de secado (Sun et al., 2019).

Secado al sol

Si bien el secado directo al sol es un método artesanal de amplio uso en las comunidades rurales (Rahman, 2019), la exposición directa al sol incrementa el riesgo de contaminación no biológica, degradación de la calidad, pérdidas de producto y contaminación por hongos, insectos, pájaros y roedores. Adicionalmente, si el clima no es favorable o adecuado se dificulta el control del proceso (Purohit et al., 2006). Estas desventajas antes mencionadas, junto al reto de la producción y suministro de alimentos frente a la problemática ambiental, han conducido a desarrollar y validar alternativas ecológicas y tecnificación para el secado solar, cuyas bondades son: i) utilización de energía renovable, ii) fácil aplicación en el medio rural y iii) alta rentabilidad y eficiencia energética (EL-Mesery et al., 2022). La energía solar es una forma de energía verde que utiliza energía térmica para la transformación de productos desde una escala doméstica hasta la industria agroalimentaria (Gürel et al., 2022).

Los secadores solares funcionan por un flujo de aire precalentado por medio de energía solar, que se hace pasar por el sólido a secar, este aire provee el calor necesario para remover la humedad contenida dentro y fuera del sólido (Chibuzo et al., 2021), son una extensión del secado directo al sol. El diseño juega un papel determinante para ser una tecnología eficiente, rentable, renovable y sostenible, capaz de conservar los productos agrícolas, principalmente en los países en desarrollo (Mohana et al., 2020). Parvin et al. (2021) señalan que el secado solar es un método rentable para conservar frutas y verduras, y es el más adecuado para los agricultores rurales de los países en desarrollo.

Los secadores solares son amigables con el ambiente debido al ahorro de combustible, la reducción significativa de la contaminación ambiental y la mejora de la calidad del producto. Además, tiene influencias significativas en las características comerciales, ecológicas y sociales (EL-Mesery et al., 2022). Sin embargo, sin un correcto diseño, los secadores solares presentan inconvenientes que limitan su uso en la producción a gran escala, tal como la necesidad de grandes áreas de espacio y

cantidad de mano de obra, la dificultad para controlar la tasa de secado y atributos de calidad (Madhankumar et al., 2021).

Con base en la forma en cómo se transmite el calor a los productos húmedos, los secadores solares se dividen en directos e indirectos. En los directos la energía que recibe el material a secar proviene directamente de los rayos del sol. En los indirectos, por ejemplo, de circulación natural y de circulación forzada, la energía solar calienta al aire que circula en su interior, que a su vez cede el calor al material a secar, o el aire es simplemente calentado por la radiación solar a través de colectores que son los encargados de realizar esta acción (Cerezal-Mezquita y Burgueño-Muñoz, 2022).

Debido a que tienen un alto contenido de humedad, las frutas y verduras son fácilmente percederas; por lo tanto, el uso de varios métodos de conservación es necesario para aumentar su vida útil y reducir el desperdicio de productos agrícolas, el costo de eliminación y el problema ambiental (Salehi y Aghajanzadeh, 2020).

En el contexto agrícola, evitar aumentos del costo de la producción por pérdidas de alimentos posteriores a la cosecha, es un área de oportunidad para generar y aplicar el secado solar. Por consiguiente, el secado se ha utilizado para conservar cereales, frutas y verduras que tienen alto contenido de humedad y textura suave. Las frutas y verduras frescas son percederas y difíciles de conservar considerando que la operación es compleja y demanda mucha energía y tiempo (Onwude et al., 2016). El secado es una parte integral para mantener la calidad de los productos agrícolas, considerando que además este proceso protege gran parte de los compuestos bioactivos -vitaminas, antioxidantes- (Chojnacka et al., 2021).

El género Capsicum

Como alimento, los frutos de *Capsicum* han sido utilizados desde hace aproximadamente 5 000 a 7 000 años (Aguilar-Meléndez et al., 2021; Villalón-Mendoza et al., 2023). Evidencias arqueológicas señalan que se usaron como condimento, colorante, aromatizante, así como medicina y en rituales (Hernández-Pérez et al., 2020). El picor, color y sabor son las características organolépticas más apreciadas de los frutos de *Capsicum*. Ligadas a estas cualidades están los metabolitos secundarios -MS-, que actúan en la defensa y protección, y se producen en respuesta a ciertas señales o estímulos de estrés biótico y/o abiótico, por ende, son resultado de amplias y diversas funciones biológicas (Antonio et al., 2018).

En el caso particular de *C. annum* L., estos fueron los principales factores para la selección y domesticación de esta especie por diferentes culturas indígenas de México (Luna-Ruiz et al., 2018). El nombre común o de origen de los chiles en México proveniente de *chilli* o *xilli* del idioma náhuatl (Madala y Nutakki,

2020, Zambrano-González et al., 2020). El género *Capsicum* se conforma con cerca de 41 especies (Barboza et al., 2019) originadas de tres acervos genéticos distintos: *Capsicum pubescens* Ruiz & Pav., *Capsicum. baccatum* Linnaeus y *C. annuum* (López Castilla et al., 2019). Respecto al centro de origen de *Capsicum*, se ha considerado como área núcleo un mosaico geográfico que incluye regiones de Perú, Argentina y Bolivia (Olmstead et al., 2008) a lo largo del Río Grande (Stewart et al., 2005), así como también a la región donde se extiende el Río Amazonas en Brasil (Clement et al., 2010). Mientras que Perú ha sido reconocido como área núcleo de domesticación por conservar la mayor diversidad de chiles domesticados (Meckelmann et al., 2015); sin embargo, estudios antropológicos y genéticos señalan que la domesticación del género se suscitó a través de múltiples eventos independientes (Perry et al., 2007), en al menos dos regiones de América: *C. annuum* y *C. frutescens* en Mesoamérica, y *C. chinense*, *C. pubescens* y *C. baccatum* en América del Sur (Pickersgill, 2016). Las formas domesticadas de *Capsicum* son extremadamente variables en colores de flores, frutos y semillas, una característica peculiar es que los frutos cuelgan de la planta y son retenidos en el pedúnculo en la etapa de madurez, contrario a las especies silvestres que presentan frutos y semillas pequeños, rojos y erectos (Tripodi y Greco, 2018).

La amplia variación de *Capsicum*, en relación con la arquitectura de las plantas -como los hábitos de crecimiento-, características vegetativas -color de hojas y tallos- y características de los frutos -forma, tamaño, color y aroma-, derivan tanto de la variación natural como de los procesos de domesticación y selección que incidieron para que los chiles sean aptos para múltiples usos (Wang y Bosland, 2006). En relación con la distribución de parientes silvestres y su especie domesticada, *C. annuum* se localiza en México y el norte de Centroamérica; *C. chinense* se establece en las Indias Occidentales en el norte de América del Sur y la región amazónica, aunque autores como Alvares Bianchi et al. (2020) se refieren a *C. chinense* como especie más brasileña del género producida en biomas diferentes. Por su parte, *C. frutescens* se dispersa principalmente en el Caribe y América del Sur, en tanto que, *C. baccatum* se propaga en Perú y Bolivia, y *C. pubescens*, más tolerante a las bajas temperaturas, se encuentra en las altitudes de los Andes (Hernández-Pérez et al., 2020).

Fitoquímica de *Capsicum*

La divergencia de *Capsicum* dentro de la familia de las solanáceas, se inició hace 20 millones de años a partir de un ancestro común con tomate (*Solanum lycopersicum* L.). Los frutos de *Capsicum* contienen capsaicinoides -CAPs-, que son los metabolitos responsables del picor. La estructura química general de los CAPs se conforma de

un núcleo fenólico unido mediante un enlace amida a un ácido graso, se producen a través de una compleja serie de reacciones que implica la condensación de dos fracciones: vainillilamina y ácido 8-metil-6-nonenóico CoA. La vainillilamina se origina a partir de la ruta de los fenilpropanoides, mientras que el conjugado de ácidos grasos (CoA del ácido 8-metil-6-nonenóico) se sintetiza a través de la ruta metabólica de los ácidos grasos. La enzima capsaicina sintasa cataliza la reacción de condensación entre la vainillilamina y el ácido 8-metil-6-nonenóico CoA para formar capsaicina y *Csyl* es el gen que regula la expresión de la enzima. La capsaicina se sintetiza en las células epidérmicas de las paredes inter locales de la placenta del fruto y forma vesículas o ampollas en la epidermis (Kim et al., 2021, Naves et al., 2019), aunque existe evidencia que tanto la síntesis como la acumulación de capsaicinoides también pueden suscitarse en el pericarpio, como ocurre con los chiles habaneros (*C. chinense*), o bien, al cultivar el escorpión amarillo de Trinidad Moruga (Tanaka et al., 2021). La cadena lateral puede conformarse con 9 hasta 11 carbonos de largo y con un número variable de enlaces dobles colocados en diferentes posiciones tales combinaciones generan las distintas estructuras que conforman al grupo de CAPs. Mientras que las semillas no producen o poseen CAPs, el picor detectado en ellas corresponde a su cercanía o contaminación con la placenta, único sitio de biosíntesis de los CAPs (Lozada et al., 2021).

La magnitud o grado de picor corresponde a la acumulación principalmente de la capsaicina y dihidrocapsaicina, que representan del 77 hasta el 98% del contenido total de los CAPs (Do et al., 2017), seguido de la nor-dihidrocapsaicina; los tres son considerados como los principales representantes de este grupo (Naves et al., 2019). La capsaicina se considera como el capsaicinoide principal de *Capsicum*, el contenido de capsaicina varía entre especies y variedades de Chile resultando en distintos grados de picor, estos grados se han clasificado en unidades de picor Scoville o SHU (por la abreviación en inglés de Scoville Heat Units) con base en el contenido de capsaicina y su prueba organoléptica (Figura 12).

Los CAPs son los constituyentes químicos más importantes de *Capsicum* junto con sus análogos no picantes -capsaicinoides-. El picor se considera un atributo peculiar de los chiles lo cual llevó a su uso temprano y a su domesticación (Jeeatid et al., 2018). La sensación picante oral o de calor -coloquialmente conocido como “enchilado”- se da por la detección de los CAPs, particularmente de la capsaicina (Lozada et al., 2021).

Figura 12

*Clasificación del picor de frutos de *Capsicum* con base en las Unidades de Picor Scoville (SHU)*



Fuente: Werner (2021).

La acumulación de los CAPs comienza en las primeras etapas del desarrollo de la fruta, aproximadamente 10 días después de la polinización (DDP) y alcanza su punto máximo de acumulación a los 40 DDP y después disminuyen. La reducción del contenido de capsaicinoides se ha asociado a la alta actividad de peroxidasa que los oxida en presencia de agua oxigenada (Zhang et al., 2016). La cantidad final de capsaicinoides en el fruto depende de un complejo equilibrio entre los factores que estimulan su síntesis y degradación. Los niveles de capsaicinoides presentan plasticidad, varían en respuesta a complejas condiciones ecológicas y fisiológicas (Burgos-Valencia et al., 2020).

Los frutos de *Capsicum* también contienen altos contenidos de vitaminas A, C, E y flavonoides (Palma et al., 2015); además, son fuente importante de carotenoides, los frutos presentan diferentes colores como verde, amarillo, naranja y rojo, morado, café y blanco, que son correspondientes a distintos estados de maduración y capacidad de síntesis de carotenoides, mostrando patrones de carotenoides amarillos (β -caroteno, violaxantina, anteraxantina, zeaxantina) hasta los característicos ceto-carotenoides de color rojo intenso (capsantina, capsorubina y capsantina-5,6-epóxido), mientras que en un fruto de color amarillo / naranja completamente maduro se presentan: luteína, β -caroteno, violaxantina, anteraxantina, zeaxantina y β -criptoxantina (Mohn et al., 2019).

En conjunto, los metabolitos presentes en los frutos de *Capsicum* tienen propiedades bioactivas que promueven la salud; su ingesta regular es recomendable

porque son alimentos funcionales (Uarrota et al., 2021). El contenido de compuestos bioactivos de *Capsicum* difiere de la parte del fruto en donde se forme y almacene -placenta, pericarpio y semillas-, de las condiciones de cultivo, de la variedad e incluso de la etapa de maduración, del clima y del almacenamiento, así como de las prácticas de procesamiento (Baenas et al., 2019) como el secado en la producción de chiles secos.

Las formas de consumo alimenticio de las especies domesticadas de *Capsicum*

La producción de *C. annuum* comprende desde los chiles no picantes, como los pimientos, y los chiles picantes; esta dualidad ha creado oportunidades de aprovechamiento. Algunos chiles tipo pimiento se consumen como vegetales crudos o cocidos en las regiones templadas de Europa y América del Norte, mientras que los chiles picantes tienen un arraigo culinario en las regiones tropicales de América, África y Asia, donde se utilizan como condimento e ingrediente en una variedad de platillos tanto en fresco como seco (Jarret et al., 2019).

La diversidad de las especies domesticadas de *Capsicum* en relación con el picor, formas y color del fruto, entre otros, son reconocidos y apreciados desde la Antigüedad y en la actualidad son de gran interés comercial y atractivos para los consumidores, generando incluso preferencias a cierto tipo de chile o forma de consumo. Los usos alimenticios de los chiles son: i) como hortalizas, ya sea como verdura cruda o cocida que se transforma en pasta, encurtidos, salsas y moles, y ii) uso como condimento, donde el chile rojo se deshidrata y posteriormente puede llegar a pulverizarse o triturarse y se utiliza como especia o saborizante (Hernández-Pérez et al., 2020). Se ha propuesto su clasificación en tres importantes grupos con base a sus formas de consumo (Tabla 20). Las especies de *C. frutescens* y *C. chinense* son producidas como especias en África, Asia y menormente en América del Sur; sin embargo, la presencia de este chile en México es especial porque tiene una región exclusiva y reconocida centro de diversidad genética de la especie y segundo, porque su aroma, sabor y picor lo diferencian de cualquier “chile habanero” cultivado en otra parte del mundo (Muñoz-Ramírez et al., 2020), en tanto que *C. baccatum* y *C. pubescens*, cuyos frutos presentan diferentes niveles de picor, se cultivan predominantemente en América central. *C. annuum*, *C. chinense* y *C. frutescens* son las especies que destacan por su importancia económica, producción y versatilidad de usos, tanto alimenticios como no alimenticios; y de estas, la mayor parte de sus variedades y poblaciones nativas se distribuyen en todo México y Centroamérica (Liu et al., 2013).

Tabla 20*Formas de consumo de los frutos de especies domesticadas de Capsicum*

<i>C. annuum, C. chinense, C. frutescens, C. baccatum, C. pubescens</i>		
Directo en fresco	Directo en deshidratado o seco	Procesado
Frutos prematuros o en madurez fisiológica.	Frutos maduros secos, comúnmente pulverizados utilizados como ingrediente o condimento.	Frutos maduros frescos o deshidratados que se transforman en salsas, pastas, encurtidos, aceites condimentados y bebidas.

Fuente: Antonio et al. (2018).

En México existen alrededor de cien variedades de *C. annuum* de amplia diversidad genética, morfológica y organoléptica, y en cada región del país, se utilizan chiles representativos con base en preferencias culinarias, de las que Castellón-Martínez et al. (2012) indican que existe un componente afectivo-cognitivo que surge de la percepción de estímulos, los cuales se transforman en necesidades dentro de cada contexto biocultural producto del vínculo o conexión con la diversidad biológica y la cultura de la sociedad local que la usa, conserva, decide y crea conocimiento alrededor de ella (Burke et al., 2023). Por tanto, las preferencias alimentarias de un grupo poblacional particular están determinadas por distintos factores, entre ellos, la disponibilidad alimentaria de cada región geográfica, cultura y economía, incluso religión (Ramos-López et al., 2013); al respecto, Aguilar-Meléndez et al. (2021) señalan que los chiles generan mosaicos biológico-culinarios distintos, creados a partir de la proyección de cada individuo a través de su historia personal y comunitaria, lo que en parte, contribuye a construir su identidad individual y cultural.

La producción de chile seco por secado solar

La producción de chiles secos por secado al sol en México corresponde al 40% del total de los chiles producidos en el territorio, predominando chiles secos tipo ancho, guajillo, mulato, mirasol, pasilla, puya y de árbol, pertenecientes a la especie *C. annuum*. El secado directo al sol es un método tradicional para la obtención de chiles secos que se realiza al aire libre, distribuyendo los frutos sobre el suelo de un campo abierto. Es un método común en el que se han identificado pérdidas de calidad, sobre todo una reducción del color, donde la autooxidación de los carotenoides provoca la disminución hasta su eliminación por degradación de los principales carotenoides, como el de la capsantina, así como una reducción en la textura (Yang et al., 2018). Si bien el color rojo y el grado de picor son características de la calidad, también son responsables activos de la comercialización de los chiles

secos, en especial de frutos rojos, utilizados como especia o condimento (Jalgaonkar et al., 2024).

Además, se carece de inocuidad, lo que afecta el valor comercial y se contrapone la creciente exigencia sanitaria por parte del consumidor. Para la producción de chiles secos se utilizan, mayormente, frutos en madurez fisiológica y de coloración roja-café, dependiendo de la variedad. El secado es requerido porque la humedad crea condiciones favorables para la proliferación hongos que pueden producir micotoxinas. Costa et al. (2019) señalan que las micotoxinas son estables al calor y difíciles de eliminar una vez que están presente en la cadena de producción de pimienta, de ahí la importancia de ampliar estudios e innovaciones.

Los chiles secos se obtienen a partir de frutos maduros frescos que tardan, en promedio, más de cinco días en secar, aunque este valor puede variar según el tamaño, grosor de pericarpio y tipo de fruto, además, del tiempo al que está sujeto a las condiciones del clima para obtener el contenido de humedad requerido, que oscila entre el ocho al 10 %. Debido al tiempo y exposición directa al aire y la luz suele producirse un chile seco de inferior calidad, que hace que los frutos presenten pigmentación oscurecida y pérdida de vitamina C (Sharangi et al., 2022). En este sistema de secado, se han cuantificado pérdidas entre el 30 % y el 40 % de la producción; todos los factores anteriores, han incidido en generar y validar métodos de secado “tecnificado”, o bien más que solo el “asoleado” con un procesamiento rápido, masivo, económicos que además de mantener la calidad organoléptica sea económica, de fácil implementación y sostenible (Jiménez et al., 2021).

Los secadores solares son una tecnología sustentable aplicable a producción de chile seco debido a que logran la estabilidad de los carotenoides presentes en el fruto; el color del fruto de chile otorgado por pigmentos como los carotenoides puede variar entre tipos y variedades, por tanto, estas diferencias se amplían considerando los distintos métodos de procesamiento empleados (Romauli et al., 2020).

En contraste, Sharangi et al. (2022) señalan que el secado al horno es el mejor método debido a la eliminación más rápida de la humedad de la muestra, conservando un buen color, picor, ácido ascórbico y contenido de oleorresina, con cambios mínimos en la textura de la superficie del chile seco, en comparación con el secado solar y sol directo aplicado en chile rojo (*C. annuum*). No obstante, los mismos autores señalan que si el secado al sol se realiza en condiciones cubiertas, se recomienda como un método seguro, especialmente donde no es posible el secado en horno.

En el secado de chile rojo (*C. annuum*) de Malasia al aire libre y mediante secadores que utilizan energía solar efectuado por Fudholi et al. (2013), se obtuvo que el secado solar tecnificado produjo un ahorro del 49 % en el tiempo, en

comparación con el obtenido al aire libre. El secado con tecnología solar, además, implicó 33 h para reducir su contenido de humedad de 80 % a 10 % de peso húmedo; en contraste, al aire libre requirió 65 h de procesamiento.

Owusu-Kwarteng et al. (2017), al analizar el efecto del blanqueo y secado solar por convección natural en chile rojo (*C. annuum*), identificaron que el blanqueo o escaldado con una solución de NaCl al 2 %, seguido del secado solar de convección natural, redujo el tiempo de secado en 15 h en comparación con 28 h de secado al sol. El blanqueo se trata de un pretratamiento antes de la congelación, enlatado secado, en el que se calientan frutas o verduras con el fin de inactivar enzimas que provocan la modificación de la textura, pero permite conservar el color, sabor y el valor nutritivo.

Asimismo, el análisis sensorial del pretratamiento/secado solar fue alto en color y aceptabilidad, sin modificación en textura y aroma, en comparación con el secado al sol (Owusu-Kwarteng et al., 2017). El secado solar y pretratamientos como el escaldado tienen potencial de aplicación industrial a pequeña y mediana escala, mejoran la calidad microbiana y sensorial del producto, reduciendo pérdidas post-cosecha, con beneficios económicos para los agricultores y procesadores de chile seco.

Pech-González et al. (2018) elaboraron harina de chile jalapeño (*C. annuum*) utilizando frutos secados por tres métodos distintos: deshidratación solar directa (1), un prototipo experimental (2) y estufa convencional (3); observaron en el prototipo experimental mejor calidad en color a mayor tiempo de secado. Con este método y con el secado convencional, se obtiene un producto seco con la concentración microbiana con valores dentro de los límites permitidos por la NOM-189-SCFI-2017 para el consumo humano.

En relación con la tecnología híbrida de secado solar para productos alimenticios, Castillo-Téllez et al. (2017), al explorar la deshidratación del chile costeño (*C. annuum*), utilizando un secador de convección forzada tipo túnel indirecto con un calentador de aire solar integrado bajo condiciones de temperatura controlada a 45, 55 y 65 °C, observaron una mejor cinética de secado a tiempos cortos a temperaturas de 55 y 65 °C, contrario con el secado solar a temperaturas ≤ 45 °C) que necesita mayores tiempos para la eliminación de agua. Este ejemplo demuestra que un sistema de secado solar respaldado por otras fuentes de energía contrarresta las desventajas de los sistemas “solo solares”, y son energía limpia y más rentable que los secadores térmicos de alto consumo energético empleados en la cadena de procesamiento agroalimentario. En el mismo sentido, los sistemas solares basados en energía térmica fotovoltaica -PVT, por sus siglas en inglés-, que utilizan tanto energía térmica como eléctrica, se han vuelto muy populares debido a su potencial de energía cero.

El secado de los productos se puede hacer más fácil en el secador solar utilizando energía térmica fotovoltaica -PVT- con menos tiempo de secado, alta producción de energía, productos de alta calidad en comparación con otros secadores; al respecto, Gupta et al. (2021) evaluaron el rendimiento de un secador PVT independiente para el secado de chile verde (*C. annuum*), demostrando que el contenido de humedad del chile verde se elimina más rápidamente en el secador solar PVT en comparación con el método de secado al sol abierto. El contenido de humedad de 0.030 en el secador solar y 0.035 al secado al sol al aire libre se evaluó en chiles verdes de *C. annuum*, identificando que para alcanzar estos valores transcurrieron 21 y 37 h, respectivamente. El secador solar híbrido PVT mostró mayor eficiencia térmica promedio de 31.37 % y una tasa de extracción de humedad específica promedio de 0.228 kg/kWh. El consumo total de energía para secar chile verde se calculó en 4.90 kWh/kg. En conjunto, se demostró que el secador PVT mejoró el rendimiento para el secado de chile verde en comparación a secadores solares directos/indirectos convencionales.

El impacto de los métodos de secado, tanto solar abierto como por convección forzada sobre frutos de chile silvestre (*C. annuum* var. *glabriusculum*), ha sido analizado con base en el contenido de capsaicina, CAPs y ácido ascórbico -AA. El secado al sol no afectó la concentración de capsaicina (550 mg/g); sin embargo, el contenido total de CAPs y AA disminuyen hasta 12.09 mg/g y 3.5 mg/g, respectivamente (Ballesteros et al., 2017); de manera que en el secado por convección forzada la temperatura más baja (35 °C) favorece la retención de compuestos bioactivos en 90 %, 52 % y 35 % de capsaicina, CAPs y AA. La capsaicina es el compuesto más estable; por lo tanto, el método de secado por convección forzada puede ser recomendado y eficiente para el secado de chiles picantes para una mayor retención de CAPs y AA en comparación con el secado solar abierto.

En chile habanero, se identificó que el pericarpio de frutos rojos que fueron secados a una velocidad del aire de 4 m/s y 70 °C presentaron mayor porcentaje de capsaicina -aproximadamente 84 %-, mientras que, en las semillas, también se cuantificaron altos contenidos de fenoles al secarse a 2 m/s y 60 °C. En la capacidad antioxidante evaluada en la placenta la de capsaicina se conservó en un 100 % en el secado a 2 m/s y temperaturas específicas (50 y 60 °C), lo anterior, indicó que cada parte del fruto tuvo una respuesta diferencial a la combinación de temperatura y tiempo de exposición. En el mismo tipo de chile, utilizando para el secado de frutos un secador solar de chimenea, se comparó con el secado solar al aire libre, identificando que el tiempo total de secado fue de 35 h y 55 h, por lo que el secador solar de chimenea presentó mejor desempeño (Kumi et al., 2020).

El secado solar tecnificado ofrece ventajas frente al secado solar tradicional -al aire o cielo abierto-; principalmente, en reducción del tiempo de secado, disminución de la humedad relativa dentro del secador en comparación con la del ambiente, lo que reduce la presencia de microorganismos que demeritan la calidad del fruto, y que protege al producto de contaminantes -polvo y otras partículas-; sin embargo, su adopción además del conocimiento de estas ventajas requiere de inversión y que esta sea redituable, es decir, que se pague la calidad del chile seco obtenido bajo estas condiciones. No obstante, existen factores que inciden en contra de la aceptación de la tecnología solar, por ejemplo, en el mercado nacional la clasificación de calidad de chiles secos no es clara y ejecutable y, además, se compete con chiles secos procedentes de China, Perú y la India, que si bien no tienen las características organolépticas que el mercado mexicano prefiere, su costo es mucho menor al de los chiles nacionales y por ello son adquiridos, desplazando a los nacionales. Aunque, como en el caso particular del chile piquín o chiltepín (*C. annuum* var. *glabriusculum*), se han adaptado secadores solares cuya inversión es redituable con el precio al que se comercializa el “famoso oro rojo” del norte de México, principalmente en Sinaloa y Sonora (Balderas et al., 2023).

Conclusión

El secado directo al sol es un método tradicional con amplia aplicación para la producción de chiles secos; si bien presenta desventajas -contaminaciones de suelo, polvo e insectos, etcétera-, su atención abre la oportunidad de innovar con la energía solar como energía verde sostenible y asequible para la producción de chile seco y contribuir a la económica del sector primario. Así, han surgido distintas acciones, estudios y validaciones de los secadores solares para mayor uniformidad de secado. El diseño y su implementación, según las condiciones climáticas del lugar, junto con los recursos económicos con los que se adopte esta ecotecnia, son determinantes en los resultados del valor nutricional, color y textura del producto seco. Esta ecotecnología tiene un alto potencial de estudios para mejorar en aras de conservar la calidad organoléptica de los chiles secos, principalmente en áreas rurales. No obstante, requiere de inversión, capacitación y del fortalecimiento de su comercio justo, donde la calidad sea pagada. La tecnificación del secador solar y su implementación según las condiciones en donde se establezca, son capaces de contribuir significativamente a las características deseables e indeseables de los chiles en relación con sus cambios físicos y bioquímicos. Son necesarios más estudios y la publicación de resultados que validen su uso en la producción de chiles secos en México, tanto de variedades comerciales como locales.

Referencias

- Aguilar-Meléndez, A., Vásquez-Dávila, M. A., Manzanero-Medina, G. I., y Katz, E. (2021). Chile (*Capsicum* spp.) as Food-Medicine Continuum in Multiethnic Mexico. *Foods*, 10(10), 2502.
- Alvares Bianchi, P., Renata Almeida da Silva, L., André da Silva Alencar, A., Henrique Araújo Diniz Santos, P., Pimenta, S., Pombo Sudré, C., Corte, L. E-D., Azeredo, G., y Rodrigues, R. (2020). Biomorphological characterization of Brazilian *Capsicum chinense* Jacq. germplasm. *Agronomy*, 10(3), 447.
- Amit, S. K., Uddin, M., Rahman, R., Islam, S. M., y Khan, M. S. (2017). A review of mechanisms and commercial aspects of food preservation and processing. *Agriculture & Food Security*, 6(1), 1-22.
- Antonio, A. S., Wiedemann, L. S. M., y Junior, V. V. (2018). The genus *Capsicum*: a phytochemical review of bioactive secondary metabolites. *RSC Advances*, 8(45), 25767-25784.
- Armelaños, G. J. (2014). Brain evolution, the determinates of food choice, and the omnivore's dilemma. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 54(10), 1330-1341.
- Baenas, N., Belović, M., Ilic, N., Moreno, D. A., y García-Viguera, C. (2019). Industrial use of pepper (*Capsicum annum* L.) derived products: Technological benefits and biological advantages. *Food Chemistry*, 274, 872-885.
- Barboza, G. E., Carrizo García, C., Leiva González, S., Scaldaferrero, M., y 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), e0209792.
- Belessiotis, V., y Delyannis, E. (2011). Solar drying. *Solar Energy*, 85(8), 1665-1691.
- Boop, A. F. (2019). The evolution of food preservation and packaging. En *Chemistry's Role in Food Production and Sustainability: Past and Present* (pp. 211-228). American Chemical Society.
- Burgos-Valencia, E., Echevarría-Machado, I., Narváez-Zapata, J. A., y Martínez-Estévez, M. (2020). Gene expression related to the capsaicinoids biosynthesis in the *Capsicum* genus: Molecular and transcriptomic studies. *Brazilian Journal of Botany*, 43(1), 201-212.
- Burke, L., Díaz-Reviriego, I., Lam, D. P., y Hanspach, J. (2023). Indigenous and local knowledge in biocultural approaches to sustainability: a review of the literature in Spanish. *Ecosystems and People*, 19(1), 2157490.
- Cai, J., Ma, E., Lin, J., Liao, L., y Han, Y. (2020). Exploring global food security patterns from the perspective of spatio-temporal evolution. *Journal of Geographical Sciences*, 30(2), 179-196.
- Carrizo-García, C., Barfuss, M. H., Sehr, E. M., Barboza, G. E., Samuel, R., Moscone, E. A., y Ehrendorfer, F. (2016). Phylogenetic relationships, diversification, and expansion of chili peppers (*Capsicum*, Solanaceae). *Annals of Botany*, 118(1), 35-51.

- Castellón-Martínez, É., Chávez-Servia, J. L., Carrillo-Rodríguez, J. C., y Vera-Guzmán, A. M. (2012). Preferencias de consumo de chiles (*Capsicum annuum* L.) nativos en los valles centrales de Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(SPE5), 27-35.
- Castillo-Téllez, M., Pilatowsky-Figueroa, I., López-Vidaña, E. C., Sarracino-Martínez, O., y Hernández-Gálvez, G. (2017). Dehydration of the red chilli (*Capsicum annuum* L., costeño) using an indirect type forced convection solar dryer. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1137-1144.
- Cerezal-Mezquita, P., y Bugueño-Muñoz, W. (2022). Drying of Carrot Strips in Indirect Solar Dehydrator with Photovoltaic Cell and Thermal Energy Storage. *Sustainability*, 14(4), 2147.
- Chandramohan, V. P. (2019). Convective drying of food materials: An overview with fundamental aspects, recent developments, and summary. *Heat Transfer*, 49, 1281-1313.
- Chibuzo, N. S., Osinachi, U. F., James, M. T., Chigozie, O. F., Dereje, B., y Irene, C. E. (2021). Technological advancements in the drying of fruits and vegetables: A review. *African Journal of Food Science*, 15(12), 367-379.
- Chojnacka, K., Mikula, K., Izydorzyc, G., Skrzypczak, D., Witek-Krowiak, A., Moustakas, K., Lugwig, E., y Kułazyński, M. (2021). Improvements in drying technologies- Efficient solutions for cleaner production with higher energy efficiency and reduced emission. *Journal of Cleaner Production*, 320, 128706.
- Clement, C. R., de Cristo-Araújo, M., Coppens d'Eeckenbrugge, G., Alves, A., y Picanço-Rodrigues, P. (2010). Origin and domestication of native Amazonian crops. *Diversity*, 2, 72-106.
- Costa, J., Rodríguez, R., Garcia-Cela, E., Medina, A., Magan, N., Lima, N., Battilani, P., y Santos, C. (2019). Overview of fungi and mycotoxin contamination in Capsicum pepper and in its derivatives. *Toxins*, 11(1), 27.
- Do, T., Lackova, Z., Adam, V., y Zitka, O. (2017). Determination of the content of capsaicin and dihydrocapsaicin in twelve varieties of chilli peppers using liquid chromatography with UV/VIS detection. En *MendelNet 2017, Proc. Int. PhD Students Conf. Brno* (pp. 861-866). Mendel University in Brno.
- EL-Mesery, H. S., EL-Seesy, A. I., Hu, Z., y Li, Y. (2022). Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157, 112070.
- Erbay, Z. y Icier, F. (2010). A review of thin layer drying of foods: theory, modeling, and experimental results. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 441-464
- Erbersdobler, H. F., Lohmann, M., y Buhl, K. (1991). Utilization of early Maillard reaction products by humans. *Nutritional and Toxicological Consequences of Food Processing*, 363-370.

- Fudholi, A., Othman, M. Y., Ruslan, M. H., y Sopian, K. (2013). Drying of Malaysian *Capsicum annuum* L. (red chili) dried by open and solar drying. *International Journal of Photoenergy*, 2013.
- Gould, G. W. (2000). Preservation: past, present, and future. *British Medical Bulletin*, 56(1), 84-96.
- Gupta, A., Das, B., y Mondol, J. D. (2020). Experimental and theoretical performance analysis of a hybrid photovoltaic-thermal (PVT) solar air dryer for green chillies. *International Journal of Ambient Energy*, 1-9.
- Gürel, A. E., Ağbulut, Ü., Ergün, A., Ceylan, İ., Sözen, A., Tuncer, A. D., y Khanlari, A. (2022). A detailed investigation of the temperature-controlled fluidized bed solar dryer: A numerical, experimental, and modeling study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 101703.
- He, L. (2019). Food Chemistry as a Vital Science: Past, Present, Future. En *Chemistry's Role in Food Production and Sustainability: Past and Present* (pp. 231-238). American Chemical Society.
- Hernández-Pérez, T., Gómez-García, M. D. R., Valverde, M. E., y 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.
- Jalgaonkar, K., Mahawar, M. K., Girijal, S., y Hp, G. (2024). Post-harvest profile, processing, and value addition of dried red chillies (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Food Science and Technology*, 61(2), 201-219.
- Jarret, R. L., Barboza, G. E., da Costa Batista, F. R., Berke, T., Chou, Y. Y., Hulse-Kemp, A., Ochoa-Alejo, N., Tropodi, P., Veres, A., Carrizo G. C. Csillery, G., Huang Y. K., Kiss, E., Kovacs, Z., Kondrak, M., Arce-Rodríguez, M. L.M., Sanldeferro, M. A., y Szoke, A. (2019). *Capsicum*-An abbreviated compendium. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 144(1), 3-22.
- Jeeatid, N., Suriharn, B., Techawongstien, S., Chanthai, S., Bosland, P. W., y Techawongstien, S. (2018). Evaluation of the effect of genotype-by-environment interaction on capsaicinoid production in hot pepper hybrids (*Capsicum chinense* Jacq.) under controlled environment. *Scientia Horticulturae*, 235, 334-339.
- Jimenez, D., Vardanega, R., Salinas, F., Espinosa-Álvarez, C., Bugueno-Munoz, W., Palma, J., Meireles A. A., Ruíz-Domínguez, M. C., y Cerezal-Mezquita, P. (2021). Effect of drying methods on biorefinery process to obtain capsanthin and phenolic compounds from *Capsicum annuum* L. *The Journal of Supercritical Fluids*, 174, 105241.
- Jin, W., Mujumdar, A. S., Zhang, M., y Shi, W. (2018). Novel drying techniques for spices and herbs: A review. *Food Engineering Reviews*, 10(1), 34-45.

- Kim, W. J., Kim, S. H., y Kang, D. H. (2021). Combination effect of 915 MHz microwave heating and carvacrol for inactivation of *Escherichia coli* O157: H7, Salmonella Typhimurium and *Listeria monocytogenes* in hot chili sauce. *Food Control*, 121, 107578.
- Kumi, F., Ampah, J., Amoah, R. S., Andoh-Odoom, A. H., y Kodua, M. (2020). Performance evaluation of a chimney solar dryer for Habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq). *African Journal of Food, Agriculture, Nutrition and Development*, 20(4), 16029-16045.
- Liu, S., W. Li, Y. Wu, C. Chen, y J. Lei. (2013). *De novo* transcriptome assembly in chili pepper (*Capsicum frutescens*) to identify genes involved in the biosynthesis of capsaicinoids. *PLoS One*, 8, e48156.
- Li-Zhen Deng, Arun S. Mujumdar, Qian Zhang, Xu-Hai Yang, Jun Wang, Zhi-An Zheng, Zhen-Jiang Gao, y Hong-Wei Xiao (2019) Chemical and physical pretreatments of fruits and vegetables: Effects on drying characteristics and quality attributes - a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(9), 1408-1432.
- Llavata, B., García-Pérez, J. V., Simal, S., y Cárcel, J. A. (2020). Innovative pre-treatments to enhance food drying: A current review. *Current Opinion in Food Science*, 35, 20-26.
- López Castilla, L. D. C., Garruña Hernández, R., Castillo Aguilar, C. D. L. C., Martínez-Hernández, A., Ortiz-García, M. M., y Andueza-Noh, R. H. (2019). Structure and genetic diversity of nine important landraces of *Capsicum* species cultivated in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Agronomy*, 9(7), 376.
- Lozada, D. N., Coon, D. L., Guzmán, I., y Bosland, P. W. (2021). Heat profiles of 'superhot' and New Mexican type chile peppers (*Capsicum* spp.). *Scientia Horticulturae*, 283, 110088.
- Luna-Ruiz, J. d. J., Nabhan, G. P. y Aguilar-Meléndez, A. (2018). Shifts in Plant Chemical Defenses of Chile Pepper (*Capsicum annuum* L.) Due to Domestication in Mesoamerica. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6, 48.
- Madala, N., y Nutakki, M. K. (2020). Hot Pepper-History-Health and Dietary Benefits & Production. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(4), 2532-2538.
- Madhankumar, S., Viswanathan, K., y Wu, W. (2021). Energy, exergy, and environmental impact analysis on the novel indirect solar dryer with fins inserted phase change material. *Renewable Energy*, 176, 280-294.
- Meckelmann, S. W., Jansen, C., Riegel, D., van Zonneveld, M., Ríos, L., Peña, K., Mueller-Seitz, E., y Petz, M. (2015). Phytochemicals in native Peruvian *Capsicum pubescens* (Rocoto). *European Food Research and Technology*, 241, 817-825.
- Mohana, Y., Mohanapriya, R., Anukiruthika, T., Yoha, K. S., Moses, J. A., y Anandharamakrishnan, C. (2020). Solar dryers for food applications: Concepts, designs, and recent advances. *Solar Energy*, 208, 321-344.

- Mohd Hassan, N., Yusof, N. A., Yahaya, A. F., Mohd Rozali, N. N., y Othman, R. (2019). Carotenoids of *Capsicum* fruits: Pigment profile and health-promoting functional attributes. *Antioxidants*, 8(10), 469.
- Montoya-Ballesteros, L. C., González-León, A., Martínez-Nú, Y. J., Robles-Burgue, M. R., García-Alvarado, M. A., y Rodríguez-Jimenes, G. C. (2017). Impact of open sun drying and hot air drying on capsaicin, capsanthin, and ascorbic acid content in chiltepin (*Capsicum annum* L. var. *glabriusculum*). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), 813-825.
- Morales-de la Peña, M., Welti-Chanes, J., y Martín-Belloso, O. (2019). Novel technologies to improve food safety and quality. *Current Opinion in Food Science*, 30, 1-7.
- Mujumdar, A. S., y Menon, A. S. (2020). Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In *Handbook of industrial drying* (pp. 1-39). CRC Press.
- Naves, E. R., de Ávila Silva, L., Sulpice, R., Araújo, W. L., Nunes-Nesi, A., Peres, L. E., y Zsögön, A. (2019). Capsaicinoids: pungency beyond *Capsicum*. *Trends in Plant Science*, 24(2), 109-120.
- Olmstead, R. G., Bohs, L., Migid, H., Santiago-Valentin, E., Garcia, V., y Collier, S. (2008). A Molecular phylogeny of the Solanaceae. *Taxon*, 57, 1159-1181.
- Omolola, A. O., Jideani, A., y Kapila, P. (2017). Quality properties of fruits as affected by drying operation. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 57(1), 95-108.
- Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., y Abdan, K. (2016). Modeling the thin layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 15(3), 599-618.
- Owusu-Kwarteng, J., Kori, F. K., y Akabanda, F. (2017). Effects of blanching and natural convection solar drying on quality characteristics of red pepper (*Capsicum annum* L.). *International Journal of Food Science*, 4656814.
- Palma, J. M., Sevilla, F., Jiménez, A., del Río, L. A., Corpas, F. J., Álvarez de Morales, P., y Camejo, D. M. (2015). Physiology of pepper fruit and the metabolism of antioxidants: chloroplasts, mitochondria, and peroxisomes. *Annals of Botany*, 116(4), 627-636.
- Palma-Orozco, G., Orozco-Álvarez, C., Chávez-Villeda, A. A., Mixtega-Martínez, A., y Castro-Muñoz, R. (2021). Capsaicin content in red habanero chilli (*Capsicum chinense* Jacq.) and its preservation after drying process. *Future Foods*, 4, 100070.
- Parvin, M., Saha, C. K., Nandi, R., y Alam, M. M. (2021). Solar conduction dryer for drying of fruit and vegetables in Bangladesh. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(12), e16102.
- Pech-González, G. A., Ceballos-Falcón, É. G., González-Cortés, N. and Jiménez-Vera, R. (2018). Elaboración sostenible de Harina de Chile Jalapeño (*Capsicum annum* L.) mediante secado solar tecnificado. *European Scientific Journal*, 14(30), 15-27.

- Perry, L., Dickau, R., Zarrillo, S., Holst, I., Pearsall, D., Piperno, D., Berman, M., Cooke, R., Rademaker, K., Ranere, A., Raymond, J., Sandweiss, D., Scaramelli, F., Tarble, K., y Zeidler, J. (2007). Starch fossils and the domestication and dispersal of chili peppers (*Capsicum* spp. L.) in the Americas. *Science*, 315: 986-988.
- Pickersgill, B. (2016). Chile peppers (*Capsicum* spp.). *Ethnobotany of Mexico: interactions of people and plants in Mesoamerica*, 417-437.
- Purohit, P., Kumar, A., y Kandpal, T. C. (2006). Solar drying vs. open sun drying: A framework for financial evaluation. *Solar energy*, 80(12), 1568-1579.
- Quezada, K. I. B., Ramírez, F. J. P., Muñoz, S. A. G., Parra, J. M. S., y Muñoz, R. M. Y. (2023). Chile Piquín (*Capsicum annum* var. *Glabriusculum*), Tesoro Picante de la Naturaleza. *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 11(2), 18-23.
- Rahman, M. S. (2019). Traditional Foods, Sensory Excitements and Pleasure. *Traditional Foods*, 273-292.
- Ramos-López, O., Ojeda-Granados, C., Román, S., y Panduro, A. (2013). Influencia genética en las preferencias alimentarias. *Revista de Endocrinología y Nutrición*, 21(2), 74-83.
- Romauli, N. D. M., Purba, H. F., Purba, T., Manurung, E. D., y Ambarita, H. (2020). Assessment of drying method and pretreatment size on characteristic of dried chilli powder. En *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (454 81:012101). IOP Publishing.
- Salehi, F., y Aghajanzadeh, S. (2020). Effect of dried fruits and vegetables powder on cake quality: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 95, 162-172.
- Shajil, S., Mary, A., y Juneius, C. E. R. (2018). Recent food preservation techniques employed in the food industry. En *Microbial Biotechnology* (pp. 3-21). Springer, Singapore.
- Sharangi, A. B., Upadhyay, T. K., Alshammari, N., Saeed, M. and Al-Keridis, L. A. (2022). Physico-Chemical Properties of Red Pepper (*Capsicum annum* L.) as Influenced by Different Drying Methods and Temperatures. *Processes*, 10(3), 484.
- Stewart Jr, C., Kang, B. C., Liu, K., Mazourek, M., Moore, S. L., Yoo, E. Y., Kim, B. D., Paran, I., y Jahn, M. M. (2005). The *Pun1* gene for pungency in pepper encodes a putative acyltransferase. *The Plant Journal*, 42(5), 675-688.
- Sun, Q., Zhang, M., y Mujumdar, A. S. (2019). Recent developments of artificial intelligence in drying of fresh food: A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(14), 2258-2275.
- Tanaka, Y., Watachi, M., Nemoto, W., Goto, T., Yoshida, Y., Yasuba, K. I., Ohno, S., y Doi, M. (2021). Capsaicinoid biosynthesis in the pericarp of chili pepper fruits is associated with a placental septum-like transcriptome profile and tissue structure. *Plant Cell Reports*, 40, 1859-1874.
- Toda, Y., Hayakawa, T., Itoigawa, A., Kurihara, Y., Nakagita, T., Hayashi, M., Ashino, R., Melin A. D., Ishimuru, Y., Kawamura, S., Imai H., y Misaka, T. (2021). Evolution of

- the primate glutamate taste sensor from a nucleotide sensor. *Current Biology*, 31(20), 4641-4649.
- Tripodi, P., y Greco, B. (2018). Large scale phenotyping provides insight into the diversity of vegetative and reproductive organs in a wide collection of wild and domesticated peppers (*Capsicum* spp.). *Plants*, 7(4), 103.
- Turner, K. L. (2019). Biocultural Diversity, Campesino Kitchens, and Globalization: Ethnobiological Perspectives on Dietary Change in Southern Bolivia. *Journal of Ethnobiology*, 39(1), 110-130.
- Uarrota, V. G., Maraschin, M., de Bairros, A. D. F. M., y Pedreschi, R. (2021). Factors affecting the capsaicinoid profile of hot peppers and biological activity of their non-pungent analogs (Capsinoids) present in sweet peppers. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(4), 649-665.
- Udomkun, P., Romuli, S., Schock, S., Mahayothee, B., Sartas, M., Wossen, T., Njukwe, E., Vanlauwe, B. y Müller, J. (2020). Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: An innovative landscape approach. *Journal of Environmental management*, 268, 110730.
- Villalón-Mendoza, H., Manzanares-Miranda, N., Ramírez-Meráz, M., Mejorado-Martínez, Y. M., y Soto-Ramos, J. M. (2023). Origin and Cultural Impact of Wild Chilli Pepper (*Capsicum annum* L. var. *glabriusculum*) in Northeastern Mexico. En *Sustainable Management of Natural Resources: Diversity, Ecology, Taxonomy and Sociology* (pp. 143-159). Cham: Springer International Publishing.
- Vinson, J. A., Zubik, L., Bose, P., Samman, N., y Proch, J. (2005). Dried Fruits: Excellent in Vitro and in Vivo Antioxidants. *Journal of the American College of Nutrition*, 24(1), 44-50.
- Wang, D., y Bosland, P. W. (2006). The genes of *Capsicum*. *HortScience*, 41(5), 1169-1187.
- Werner, J. (2021). Capsaicinoids-Properties and Mechanisms of Pro-health Action. En *Analytical Methods in the Determination of Bioactive Compounds and Elements in Food* (pp. 193-225). Springer, Cham.
- Wollstonecroft, M. M. (2011). Investigating the role of food processing in human evolution: a niche construction approach. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 3(1), 141-150.
- Yang, X. H., Deng, L. Z., Mujumdar, A. S., Xiao, H. W., Zhang, Q., y Kan, Z. (2018). Evolution and modeling of colour changes of red pepper (*Capsicum annum* L.) during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 231, 101-108.
- Zambrano-González, M., León-Hernández, R. y Zambrano-Lara, M. (2020). Indicación médica del consumo de *Capsicum* (chile, ají) en dieta de pacientes sanos y con manifestaciones digestivas. *Revista Mexicana de Cirugía Colorrectal*, 1(1), 7-11.
- Zhang, Z. X., Zhao, S. N., Liu, G. F., Huang, Z. M., Cao, Z. M., Cheng, S. H., y Lin, S. S. (2016). Discovery of putative capsaicin biosynthetic genes by RNA-Seq and digital gene expression analysis of pepper. *Scientific Reports*, 6(1), 1-14.

Perspectivas multidisciplinares para la agricultura: Aplicaciones para minimizar la afectación en agroecosistemas de Julio César Chacón Hernández y Mario Rocandio Rodríguez coordinadores, publicado por la Universidad Autónoma de Tamaulipas y Editorial Fontamara en junio de 2024. La revisión y diseño editorial correspondieron al Consejo de Publicaciones UAT.

El trabajo humano es importante en los agroecosistemas porque distingue a éste de los ecosistemas en la naturaleza, además, determina los flujos de energía, materia y estructura dentro de estos. Los agroecosistemas tienen dos vías: 1) los que tienen fines o telos en la reproducción de la vida material de los seres humanos, y 2) los medidos por el trabajo como sistemas socio-naturales. La producción en un sistema agrícola está orientada por el consumo humano, por lo que éstos son sistemas complejos en las que las ciencias biológicas, físicas, sociales, económicas y culturales, entre otras, forman una red, y su entendimiento exige un abordaje interdisciplinario.

Los seres humanos han aprovechado los recursos biológicos (biodiversidad) para sobrevivir durante miles de años. Estos recursos fueron y son fundamentales e integrales en la agricultura. La agro-biodiversidad, es donde los humanos producen alimentos, fibras, plantas, animales y microorganismos, los cuales se han modificado durante el proceso de domesticación para que puedan adaptarse y subsistir en entornos distintos o iguales a los de sus progenitores.

La agricultura reduce la biodiversidad, principalmente plantas y artrópodos. Para producir en un ecosistema artificial se requiere de la intervención humana para dar buenos resultados. La frecuencia del uso de agroquímicos incrementa los rendimientos, pero impactan en el medio ambiente y en el ser humano. En consecuencia, las plagas generan resistencia a esos químicos e incrementan su población, la erosión del suelo, contaminación a aguas subterráneas, etc. Al igual como hace más de treinta años las pérdidas de las cosechas debido a las plagas se mantienen en un 30 %. Lo que indica que el control de plagas a través de químicos ha llegado a su límite. Por lo que, se requiere un enfoque ecológico alternativo para maximizar los beneficios que otorga la biodiversidad en la agricultura.

ISBN UAT: 978-607-8888-40-5

ISBN Fontamara: 978-607-736-893-9

ISBN 978-607-736-893-9

