

Control biológico de plagas en la agricultura mexicana

Lily Xochilt Zelaya-Molina¹
Ismael Fernando Chávez-Díaz¹
Sergio de los Santos-Villalobos²
Carlos Iván Cruz-Cárdenas¹
Santiago Ruíz-Ramírez³
Edith Rojas-Anaya^{4§}

¹Centro Nacional de Recursos Genéticos-INIFAP. Blvd. de la Biodiversidad 400, Rancho las Cruces, Tepatitlán de Morelos, Jalisco. CP. 47600. Tel. 55 38718700, ext. 84824. (zelaya.lily@inifap.gob.mx; chavez.fernando@inifap.gob.mx; cruz.ivan@inifap.gob.mx). ²Instituto Tecnológico de Sonora. 5 de febrero 818 sur, Col. Centro, Ciudad Obregón, Sonora, México. CP. 85000. Tel. 64 44100900, ext. 2124. (sergio.delossantos@itson.edu.mx). ³Campo Experimental Centro Altos de Jalisco-INIFAP. Blvd. de la Biodiversidad 2470, Rancho las Cruces, Tepatitlán de Morelos, Jalisco. CP. 47600. Tel. 55 38718700, ext. 84515. (ruiz.santiago@inifap.gob.mx). ⁴Oficina Regional Pacífico Centro-INIFAP. Parque Colomos s/n, Col. Providencia, Guadalajara, Jalisco, México. CP. 44660. Tel. 55 38718700.

§Autora para correspondencia: rojas.edith@inifap.gob.mx.

Resumen

Debido al continuo aumento de la población humana, la demanda de producción de alimentos deberá aumentar 70-100% en los siguientes años. Sin embargo, la seguridad alimentaria de la humanidad es afectada por diversos factores, entre ellos los insectos plaga, que actualmente son controlados mediante la aplicación de grandes dosis de insecticidas sintéticos, los cuales generan graves problemas en la salud humana, resistencia a plagas, residuos en alimentos, contaminación ambiental, brotes de plagas secundarias y reducción en las poblaciones de insectos benéficos. Ante este escenario mundial, esta problemática genera una mayor demanda de métodos de control de plagas que sean eficientes y amigables con el medioambiente, por lo que el objetivo del presente trabajo fue abordar de forma sintética el desarrollo y avance de las investigaciones realizadas en México sobre el control biológico de insectos plaga. Esta revisión se enfoca en tecnologías con una sólida base ecológica para la restauración gradual de la biodiversidad perdida en los agroecosistemas, por lo que se abordan alternativas promisorias para el control de plagas de gran relevancia en el campo mexicano, como el uso de insectos benéficos como parasitoides, predadores y entomopatógenos que ocasionan la muerte de los insectos-plaga, el uso del insecto estéril, bioinsecticidas, como pesticidas microbianos y otros entomopatógenos, protectores de plantas incorporados y pesticidas bioquímicos. La demanda de técnicas relacionadas al control biológico de insectos plaga en México deberá abordar los problemas de plagas transfronterizas, exóticas, de nueva introducción y las que se han mantenido por varias décadas en el país.

Palabras clave: compuestos volátiles, control biológico, depredadores, entomopatógenos, extractos vegetales, hormonas vegetales, parasitoides, plantas repelentes.

Recibido: mayo de 2022
Aceptado: agosto de 2022

La demanda de alimentos es uno de los principales objetivos a satisfacer a nivel global, debido al incremento en la población, la cual se estima en 10 000 millones de habitantes para el 2050. Una de las principales preocupaciones para alcanzar la seguridad alimentaria es la disminución de los rendimientos agrícolas generada por insectos plaga (Culliney, 2014). Actualmente, para disminuir o erradicar estas afectaciones se aplican grandes dosis de insecticidas sintéticos. En México, la aplicación de plaguicidas sintéticos aumentó de 97.7% en 1992 a 2016 (FAO, 2018). Sin embargo, estos tienen graves consecuencias en diversas áreas como la salud humana, impactando hasta al 78% de los agricultores expuestos o a quienes los aplican.

Ante este escenario, se precisa implementar programas de manejo con una sólida base ecológica, entre las alternativas promisorias se encuentra el uso de insectos, insecto estéril, y un amplio espectro de bioinsecticidas. Estas técnicas han sido desarrolladas para controlar las plagas que ocasionaban grandes pérdidas en los cultivos de mayor importancia del país, el objetivo del presente trabajo es abordar de forma sintética el desarrollo y el avance de las investigaciones realizadas en México sobre el control biológico de insectos plaga (Figura 1).

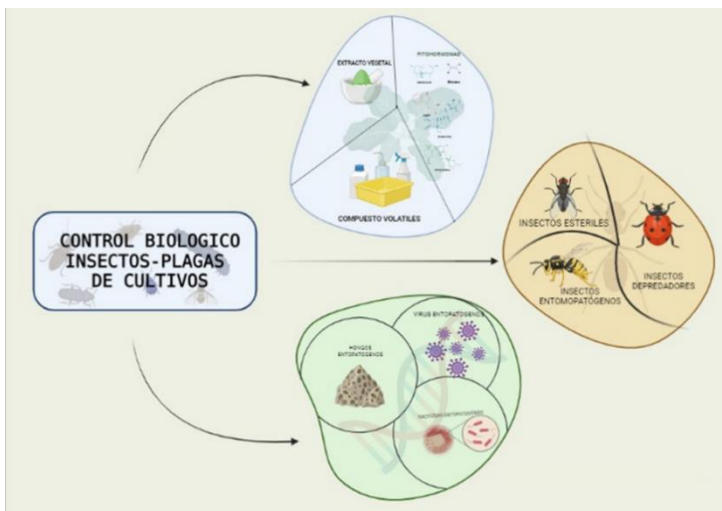


Figura 1. Biotecnologías desarrolladas para el control biológico de insectos-plaga.

Parasitoides y depredadores en el control de insectos plaga

En México los primeros registros del empleo de parasitoides y depredadores para el control de insectos plaga datan de inicios del siglo XX. A partir de entonces se continuó con el uso de diversas especies de himenópteros y lepidópteros parasitoides, y hemípteros, dípteros y coleópteros depredadores para el control biológico de plagas exóticas y nativas relevantes en cultivos de gran importancia para el país, a través de programas nacionales implementados por instancias gubernamentales (Montesinos-Matías *et al.*, 2020). En 2009 inició el programa nacional más reciente, 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; para lo cual se desarrolló una tecnología con el parasitoide asiático *Tamarixia radiata*, y su liberación masiva en áreas específicas de 19 entidades citrícolas de México (Arredondo-Bernal y Rodríguez-del Bosque, 2020).

Los parasitoides son organismos que generalmente atacan organismos del mismo tamaño, se desarrollan dentro o sobre el organismo de interés, que en la mayoría de los casos muere al ser atacado, por su parte, los depredadores son organismos que consumen organismos que se denominan presas, que en su mayoría son más pequeños que sus depredadores. Existen diferentes estrategias de control biológico en las que se emplean estos parásitos y depredadores, dependiendo del tipo de enemigo natural a emplear, su liberación, manipulación, o resultado a corto o largo plazo del manejo de la plaga, se tienen tres categorías: clásico (introducción de un agente de control biológico exótico en un nuevo ambiente con el fin de que se establezca a largo plazo y regule a una plaga exótica de manera sostenida), aumentativo (aumento de la abundancia de especies de enemigos naturales presentes en el área a través de liberaciones inundativas o inoculativas) y conservativo (implementación de medidas de manejo del hábitat para proporcionar protección y aumentación de los enemigos naturales para mejorar su efectividad).

Las especies de insectos que se emplean en programas de control biológico en México son producidas por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. En los últimos 20 años, con la finalidad de disminuir o eliminar el uso de plaguicidas químicos que dañen el ecosistema, la incorporación de técnicas alternativas en la producción agrícola ha aumentado la demanda de enemigos naturales efectivos para el control de insectos plaga, principalmente en los cultivos básicos y de mayor producción en México. Es por ello que investigadores mexicanos continúan enfocándose en la búsqueda de especies de depredadores y parasitoides de insectos plaga nuevos o ya presentes en el país; por ejemplo: Cancino *et al.* (2019) evaluaron el efecto de las liberaciones aumentativas del himenóptero *Diachasmimorpha longicaudata* para la supresión de *Ceratitidis capitata* en plantaciones de café en la región fronteriza de Guatemala, el uso del control biológico aumentativo de esta especie provocó una reducción significativa en los valores del número estimado de moscas/trampa/día, siendo muy eficiente en la reducción de las poblaciones de la plaga al incorporarse en los programas de manejo integrado.

Además, se podrían emplear otras especies como el parasitoide larvario *D. tryoni* (Wong *et al.*, 1991) o el parasitoide de huevos *Fopius arisanus*, más eficiente en el control de *C. capitata* en café (Cancino *et al.*, 2019). Por su parte Jaraleño-Teniente *et al.* (2020), basados en estudios realizados en el estado de Guanajuato para el control de *Spodoptera frugiperda*, una plaga que limita el rendimiento de maíz, trigo y otros cultivos, observaron que depredadores como ácaros del género *Balaustium*, adultos de *Hippodamia convergens* y la tijereta *Doru taeniatum* ocasionaron la mayor mortalidad de huevos de *S. frugiperda*, logrando hasta un 63% de depredación. También registraron que la parasitación de huevos de *S. frugiperda* fue realizada sólo por *Trichogramma atopovirilia* y en una baja proporción (2.8%-3.75% en maíz y 2.47% en sorgo), por lo que plantean que el uso de especies de *Trichogramma* debe reevaluarse en los programas de control biológico establecidos.

Felipe-Victoriano *et al.* (2019) reportan que los himenópteros *Gryon myrmecophilum*, *Telenomus podisi* y *Trissolcus basalidis* son parasitoides de huevos de la chinche pintada *Bagrada hilaris* en Saltillo, Coahuila. La chinche pintada es una plaga clave de cultivos de la familia Brassicaceae, causando daños económicos en brócoli, repollo y coliflor en el norte de México. Aunque aún es necesario realizar investigaciones para determinar el potencial de estas especies como agentes de control biológico y la factibilidad de métodos aumentativos, clásicos o inoculativos, para el desarrollo de estrategias de biocontrol de esta plaga. Montoya *et al.* (2017) para evaluar el efecto de liberaciones aumentativas de un parasitoide exótico sobre la diversidad y abundancia de parasitoides nativos, utilizaron *Diachasmimorpha longicaudata* para el control de moscas de la fruta de *Anastrepha* spp. en zonas adyacentes a huertas comerciales de mango en Chiapas.

Entomopatógenos en el control biológico de insectos plaga

Se consideran como microorganismos entomopatógenos principalmente a diferentes cepas de hongos, bacterias y virus altamente virulentas a uno o varias especies de insectos plaga, su uso en el control biológico de estos insectos es una de las alternativas sostenibles que ha repuntado en los últimos años. Entre ellos, el grupo de los hongos entomopatógenos constituye el de mayor importancia en el control de insectos plaga debido a que 80% de las enfermedades que se producen en los insectos son ocasionados por hongos. En este caso el contacto de las esporas de los hongos con la cutícula de los insectos susceptibles desencadena su crecimiento a través del cuerpo del insecto, que, en combinación con el consumo de nutrientes y la producción de toxinas, ocasionan su muerte (Pérez, 2001), aunque su eficacia depende de factores medioambientales.

Entre las especies de hongos más empleados, debido a su amplio espectro de control, están *Beauveria bassiana*, *Metarhizium anisopliae*, *Nomuraea rileyi*, *Lecanicillium lecanii* y *Paecilomyces fumosoroseus*. *B. bassiana* puede infectar más de 200 especies de insectos como *Spodoptera frugiperda* y *Hypothenemus hampei* y *M. anisopliae* puede controlar al menos a 400 especies (Pacheco-Hernández *et al.*, 2019). Actualmente en México, las investigaciones en hongos entomopatógenos se han enfocado al control de insectos plaga de cultivos de interés, como el psílido asiático de los cítricos (*Diaphorina citri*), vector de *Candidatus Liberibacter asiaticus* que es causante de la enfermedad de los cítricos Huanglongbing, en donde se han obtenido resultados promisorios (93-100% de mortalidad en ninfas y 40-95% en adultos) con cepas de *Hirsutella citriformis*, *Paecilomyces fumosoroseus*, *Lecanicillium lecanii*, *B. bassiana* y *M. anisopliae*.

En el control de los principales insectos plaga de maíz, la gallina ciega (*Phyllophaga vetula*) y gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), se han empleado cepas de *M. anisopliae*, *Metarhizium rileyi* (Ordoñez-García *et al.*, 2015), *N. rileyi* y *P. fumosoroseus*, con muy buenos resultados, reportándose parasitismos entre 80-100% en huevos y larvas, y en general estableciendo TL50 de 1.3-6.3 días. Es importante mencionar que a pesar de las 700 especies de hongos entomopatógenos que se conocen en la actualidad, un número muy reducido se emplea en el control biológico de insectos plaga (Carrillo-Rayas y Blanco-Labra, 2009).

En cuanto a bacterias que controlan insectos plaga, las especies más empleadas son *Bacillus thuringiensis*, *Bacillus sphaericus*, *Bacillus popilliae*, *Lysinibacillus sphaericus*, *Paenibacillus* spp., *Serratia entomophila* y *B. thuringiensis* es la especie bacteriana más conocida ya que bajo condiciones de estrés produce una protoxina que en el intestino de algunos insectos se transforma en una toxina que ocasiona su muerte (Galitsky *et al.*, 2001). En México la investigación sobre bacterias para el control de insectos plaga se limitan al uso de diversas variedades y cepas de *B. thuringiensis* contra el gusano del tabaco, gusano barrenador de la caña de azúcar y la broca del café, generándose mortalidad alta de estos insectos.

Por otro lado, entre los virus patógenos de insectos, los baculovirus se consideran agentes de control seguros y de sencilla formulación y aplicación, pero los problemas que aún se tienen para su producción limitan su empleo en países como México, aunque se han realizado esfuerzos para obtener aislados de Nucleopolyhedrovirus a partir de larvas muertas de gusano cogollero (Ordoñez-García *et al.*, 2015). Recientemente la investigación sobre el uso de patógenos ha abarcado más cultivos; por ejemplo, en jitomate se tiene el trabajo de Rios-Velasco *et al.* (2014) y el de Somoza-Vargas *et al.* (2018), que utilizan *B. thuringiensis*, *M. anisopliae* y *B. bassiana* en sus evaluaciones.

Sin embargo, el campo de investigación y uso en el control biológico de entomopatógenos en México se ha reducido al empleo de 10 especies fúngicas y 1 bacteriana (Pacheco-Hernández *et al.*, 2019), lo mismo sucede con las empresas mexicanas productoras de estos insumos, quedando de un lado un gran potencial a emplear en el control biológico de insectos plaga a través de entomopatógenos, enfoque que debería consolidarse entre la participación de los centros de investigación y de educación mexicanas con el sector industrial.

Compuestos fitoquímicos en el control de insectos plaga

El uso recurrente de pesticidas en los sistemas de producción agrícola, además de generar resistencia en las plagas, daños a la salud humana y al medio ambiente, pueden afectar colateralmente a los enemigos naturales y provocar un desequilibrio ecológico (Ruiz-Jimenez *et al.*, 2021). Una alternativa a este problema es el uso de productos naturales derivados de plantas, generalmente biodegradables y que no producen un desequilibrio en los ecosistemas (Lannacone y Reyes, 2001). Entre las especies vegetales que se han utilizado para el control de insectos en grano o semilla está el ajo (*Allium sativum*) por sus agentes activos alicina y disulfuro de alilpropilo, la higuera (*Ricinus communis*) por sus ingredientes activos ricina y ricinina y la gobernadora (*Larrea tridentata*) por sus principios activos de resina.

En todo el mundo, se han rociado sobre cultivos agrícolas diversos insecticidas botánicos, como aceite de neem, aceite de poga, rotenona y aceites esenciales, y dos clases principales de insecticidas, piretroides y neonicotinoides, que se basan en compuestos químicos insecticidas de plantas (Pavela, 2016). Los pesticidas botánicos se clasifican como pesticidas bioquímicos, y son un grupo importante de protectores naturales de cultivos, a menudo de acción lenta, que incorporan mezclas de compuestos biológicamente activos y no desarrollan resistencia en plagas. En su forma básica, los pesticidas botánicos pueden ser preparaciones crudas de plantas, como polvos de flores, raíces, semillas, hojas, tallos y aceites esenciales. Las fórmulas comúnmente son extractos concentrados o líquidos (Pavela, 2016).

La familia botánica Solanaceae tiene muchas especies que producen compuestos con propiedades insecticidas, por ejemplo, nicotina y capsaicina, que se utilizan para el control de plagas en la agricultura (Gonçalves *et al.*, 2021). En cuanto a los insecticidas botánicos a base de especies de solanáceas, existen productos como Hot Pepper Wax (Vitova Insectaries, EE. UU.) formulado con *Capsicum annum* y Nico Dust a base de *Nicotiana tabacum* (Pavela, 2016). Las solanáceas son una familia botánica promisoria para descubrir nuevas moléculas insecticidas y están ampliamente distribuidas tanto en las zonas templadas como tropicales, con unas 2 300 especies que presentan metabolitos secundarios (flavonoides, alcaloides, withanólidos, capsinoides, entre otros) (Ohyama *et al.*, 2013). La actividad insecticida de las plantas se atribuye a la presencia de metabolitos secundarios (Castillo *et al.*, 2010). Estos compuestos pueden tener diversos mecanismos de acción (Wakeil, 2013), además de la actividad insecticida, tienen un efecto estático de insectos; es decir, pueden actuar como inhibidores (Eriksson *et al.*, 2008), disuasorios de la oviposición (Dimetry, 2012), repelentes (Peterson y Coats, 2001) y como reguladores del crecimiento (Dimetry, 2012).

Algunos extractos de plantas son altamente efectivos contra insectos y ácaros resistentes a los insecticidas y acaricidas organosintéticos, debido al contenido de varios metabolitos con diferentes modos de acción, que podrían usarse como reemplazo o complemento del uso de plaguicidas organosintéticos, cuyo precio, disponibilidad y tecnología de aplicación están fuera del alcance de los agricultores de escasos recursos (Abdullahi *et al.*, 2019).

En México, las investigaciones sobre compuestos fitoquímicos en el control de plagas de insectos se han incrementado en gran medida, así se tienen los trabajos de Pérez-Torres *et al.* (2017) donde extractos acuosos de *Ricinus communis* con *Capsicum frutescens* alternados con jabón resultó efectivo para proteger el cultivo de amaranto de daños por plaga al reducir la infestación en 39.7% e incrementar la producción 87%; Orozco-Santos *et al.* (2016) indicaron que los extractos de neem, ajo y cebolla redujeron de forma significativa ninfas de *Diaphorina citri* en lima mexicana.

Plantas repelentes y hormonas en el control de insectos plaga

Las plantas se defienden contra los insectos herbívoros a través del uso combinado de mecanismos de defensa directos e indirectos. Los mecanismos de defensa vegetal directos son rasgos que están presentes de manera continua en la planta, los cuales tienen la función de dificultar la alimentación, oviposición, crecimiento y desarrollo de los insectos. Los mecanismos indirectos son constitutivos o inducidos como resultado de la acción conjunta del daño mecánico y los elicitores producidos por los insectos herbívoros al momento del ataque (Belete, 2018). Tomado en cuenta estos mecanismos de defensa, en los últimos años se han usado plantas o compuestos de estas con la finalidad de poderlos usar como alternativas sostenibles para el control de insectos plaga debido a sus propiedades repelentes. Uno de los compuestos más usados es el piretro, oleorresina extraída de las flores secas del piretro, *Tanacetum cinerariaefolium* (Asteraceae). La acción insecticida de las piretrinas se caracteriza por un rápido efecto neurotóxico que afecta la mayoría de los insectos, particularmente insectos voladores, y causa hiperactividad y convulsiones (Sun *et al.*, 2020).

La rotenona es uno de varios isoflavonoides producidos en las raíces o rizomas de las leguminosas tropicales *Derris*, *Lonchocarpus* y *Tephrosia*. Este compuesto es un veneno mitocondrial que bloquea la cadena de transporte de electrones e impide la producción de energía (Zhang *et al.*, 2020). La nicotina, un alcaloide obtenido del follaje de las plantas de tabaco (*Nicotiana tabacum*) y especies afines, tiene una larga historia como insecticida. La nicotina y dos alcaloides estrechamente relacionados, la nornicotina y la anabasina, son venenos sinápticos que imitan al neurotransmisor acetilcolina. En el caso del neem (*Azadirachta indica*), se pueden obtener compuestos botánicos insecticidas, en realidad contienen más de una docena de análogos de azadiractina, pero la forma principal es la azadiractina. Este compuesto bloquea la síntesis y liberación de hormonas de la muda (ecdisteroides) de la glándula protorácica, lo que provoca una ecdisis incompleta en insectos inmaduros. En los insectos hembra adultos, un mecanismo de acción similar conduce a la esterilidad. Además, la azadiractina es un potente inhibidor del apetito para muchos insectos (Kim, 2021).

Por otro lado, las hormonas vegetales desempeñan un papel fundamental en la regulación del crecimiento, el desarrollo y los mecanismos de defensa de las plantas. Varias hormonas vegetales han sido implicadas en la comunicación intra e inter-planta en plantas dañadas por insectos. La mayoría de las respuestas de defensa de las plantas contra los insectos son activadas por vías de transducción de señales mediadas por ácido jasmónico, ácido salicílico y etileno. Estas hormonas pueden actuar de forma individual, sinérgica o antagónica, dependiendo del atacante (Belete, 2018). Asimismo, en el manejo integrado de plagas existe un gran potencial para las plantas que producen metabolitos secundarios, ya que pueden ser utilizados como barrera biológica en el cultivo e incorporarse como residuos vegetales. También, diversas combinaciones de cultivos reducen drásticamente el riesgo de infestación por una plaga.

Los cultivos asociados favorecen las poblaciones de organismos benéficos, ya que sirven como barrera para impedir que un organismo nocivo se desplace hacia su hospedero y aumente su población. El concepto general es utilizar cultivos de diferentes familias que, por lo general, tienen diferentes exigencias nutrimentales y que son sensibles o resistentes contra diferentes tipos de plagas y enfermedades. Algunos experimentos han demostrado que es posible reducir la incidencia de plagas de un 30-60% a través de la siembra de plantas repelentes, muchas veces no comestibles, contra algunas plagas específicas aprovechando, por ejemplo, su propiedad aromática (Altieri y Nicholls, 2008). Entre las plantas que se pueden usar como repelentes destacan el cilantro, perejil, apio, menta, hierbabuena, sésamo, y algunas gramíneas, siendo estas efectivas contra larvas de mariposas y nematodos (Brechelt, 2004). Las plantas sintetizan y emiten una gran variedad de compuestos orgánicos volátiles, que son emitidos principalmente por las partes vegetativas de las plantas cuando están expuestas a estímulo biótico o abiótico, específicamente como mecanismos de defensa para repeler insectos (Dong *et al.*, 2016).

En México, en los últimos años se han realizado varios estudios sobre compuestos volátiles, como el de Ángeles *et al.* (2012) que detectaron 36 compuestos orgánicos volátiles en plantas de tomate de invernadero infestadas con mosca blanca; la investigación de Bautista y Espinosa (2013) evalúa la variación de emisiones de compuestos orgánicos volátiles entre plantas de tomate en respuesta a diferentes daños, entre otro; así como estudios del empleo de plantas repelentes para el control de gorgojo de granos, como el trabajo de Alarcón *et al.* (2016) sobre la actividad repelente e insecticida de hojas, flores y extractos de llama del bosque en gorgojos y el de Pizarro *et al.* (2013) sobre el efecto insecticida del polvo de *Peumus boldus* para el control de gorgojos de maíz. Sin embargo, estudios sobre plantas repelentes, hormonas y compuestos volátiles de plantas en el control de insectos, son necesarios para desarrollar nuevas estrategias para el control de plagas.

Técnica del insecto estéril en el control de insectos plaga

La problemática actual generada por el uso de plaguicidas químicos ha generado una mayor demanda de métodos de control de plagas que sean eficientes y amigables con el medioambiente. El desarrollo de métodos sostenibles de control de vectores/plagas se ha transformado en uno de los temas más desafiantes para reducir el impacto de las enfermedades hacia plagas de cultivos en las últimas décadas, todos estos buscando mantener una mejor producción agrícola. Entre todas las herramientas de control biológico, la técnica del insecto estéril (TIE), que consiste en la liberación masiva de insectos estériles para llegar a la eliminación o reducir la población de un vector/plaga por debajo de un cierto umbral, es la más prometedora.

Esta técnica es aplicada como parte de un enfoque de manejo integrado de plagas, ofrece un potencial considerable y se ha utilizado con gran éxito contra las principales plagas de importancia agrícola para establecer áreas libres de plagas (erradicación), áreas de baja prevalencia de plagas (supresión) o para mantener áreas libres de la plaga a través de la contención o la prevención. Esta técnica se considera como un método de control de plagas ambientalmente amigable para el control de insectos plaga de plantas. Consiste en la producción masiva, esterilización y liberación de insectos en un área afectada donde los machos estériles se aparean con las hembras nativas sin que se reproduzcan y de esta manera impactar directamente la población de la plaga (Anguelov *et al.*, 2020). Existen casos exitosos recientes de erradicación de la mosca mediterránea de la fruta, *Ceratitis capitata*, así como programas efectivos utilizados contra la mosca mexicana de la fruta *Anastrepha ludens*, la mosca del gusano barrenador del Nuevo Mundo *Cochliomyia hominivorax* y la polilla del cactus *Cactoblastis cactorum* (Vreysen *et al.*, 2021).

La TIE es una técnica de control de plagas amigable con el medio ambiente que permite la supresión o eliminación de poblaciones introducidas y la exclusión de nuevas introducciones. La esterilidad reproductiva normalmente es inducida por radiación ionizante, un método conveniente y consistente que mantiene un grado razonable de competitividad en los insectos liberados (Vreysen *et al.*, 2021). El costo y la eficacia de un programa de control que integre el TIE dependen del equilibrio entre esterilidad y competitividad. La TIE involucra la producción en masa de la especie de insectos objetivo, esterilización y la liberación en el campo de manera sostenida y en cantidades suficientes para impactar las poblaciones naturales de la plaga (Marec y Vreysen, 2019).

Los machos estériles encuentran y se aparean con hembras fértiles, transfiriendo esperma infértil. No hay descendencia viable resultante, lo que termina en una reducción de la población natural de plagas. La esterilidad inducida está dirigida exclusivamente a las especies de destino y a diferencia de otros métodos de control biológico, no se han informado impactos adversos en organismos que no sean el objetivo. Esta técnica podría usarse en paralelo con otros métodos convencionales y biológicos, como parasitoides, depredadores e insectos patógenos (bioplaguicidas) (Hendrichs, 2000).

Conclusiones

Dada la reciente disminución dramática de la biodiversidad de insectos, la inversión en medios de control de plagas que no dañen el medio ambiente debería ser una prioridad. Debe promoverse una estrategia de acción que involucre los diversos estratos de acción en la toma de decisiones para lograr que esta estrategia, que lleva ya algunas décadas en México, se vuelva cada vez más efectiva contra las plagas que atacan a los cultivos en nuestro país. El control de insectos plaga es cada vez más complicado, la producción intensiva de cultivos y la falta de rotaciones agrícolas crearán más desequilibrios biológicos en el entorno agrícola. El futuro control de plagas tendrá que llevarse a cabo sin dañar más la diversidad biológica y degradar el medio ambiente, y en gran medida con menos dependencia de los plaguicidas de origen sintético.

Las perturbaciones al medio ambiente como resultado de la continua expansión de los viajes y el turismo en el mundo, así como del comercio de productos agrícolas, ha aumentado la introducción de plantas nocivas, insectos y otros organismos dañinos de un área a otra y seguirá incrementándose en los próximos años, por lo que no hay duda que la demanda de técnicas relacionadas al control biológico de insectos plagas, en combinación entre ellas y apoyándose en las nuevas tecnologías moleculares y metabólicas, deberá abordar los problemas de plagas transfronterizas, exóticas, de nueva introducción y las que se han mantenido por varias décadas en el país.

Literatura citada

- Abdullahi, A. M.; Sarki, A.; Hafizu, M. S.; Kunihya, I. Z.; Kolawole, A. A.; Nassai, I. and Haruna, M. Y. 2019 Phyto-chemicals of some plant leaf powder as anti-insect agents against maize weevils *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Fudma J. Sci.* 3(4):291-295.
- Alarcón, R.; Guzmán, T.; Penieres, J. y Navarrete, R. 2016. Actividad repelente e insecticida de hojas, flores y extractos de llama del bosque (*Spathodea campanulata* B.), en gorgojos de granos almacenados (*Sitophilus zeamais* M.). *La Calera.* 16(27):94-99. <https://doi.org/10.5377/calera.v16i27.6009>.

- Altieri, M. y Nicholls, C. 2008. Optimizando el manejo agroecológico de plagas a través de la salud del suelo. *Agroecología*. 1:29-36.
- Ángeles, L. Y. I.; Martínez, G. N. A.; Ramírez, R. R.; López, M. G.; Sánchez, H. C. and Délano, F. J. P. 2012. Cross-Kingdom effects of plant-plant signaling via volatile organic compounds emitted by tomato (*Solanum lycopersicum*) plants infested by the greenhouse whitefly (*Trialeurodes vaporariorum*). *J. Chem. Ecol.* 38(11):1376-1386. <https://doi.org/10.1007/s10886-012-0201-z>.
- Anguelov, R.; Dumont, Y. and Yatat, D. I. V. 2020. Sustainable vector/pest control using the permanent sterile insect technique. *Math. Methods Appl. Sci.* 43(18):10391-10412. <https://doi.org/10.1002/mma.6385>.
- Arredondo, B. H. C. y Rodríguez, B. L. A. 2020. Programas de control biológico de México. *In: Arredondo-Bernal, H. C.; Tamayo, M. F. and Rodríguez-del Bosque, L. A. (Ed.). Fundamento y práctica del control biológico de plagas y enfermedades. Biblioteca básica de agricultura (BBA). Cd. de México. 523-546 pp.*
- Bautista, L. A. and Espinosa, G. F. J. 2013. Odor uniformity among tomato individuals in response to herbivore depends on insect species. *PLoS One* 8(10):1-12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077199>.
- 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.
- Carrillo, R. M. T. y Blanco, L. A. 2009. Potencial y algunos de los mecanismos de acción de los hongos entomopatógenos para el control de insectos plaga. *Acta universitaria*. 19(2):40-49.
- Castillo, L.; Jiménez, J. y Delgado, M. 2010. Metabolitos secundarios de las familias Annonaceae, Solanaceae y Meliaceae utilizados como control biológico de insectos. *Trop. Subtrop. Agroecosystems*. 12(3):445-462.
- Cancino, J.; Ruiz, L.; López, E.; Aguilar, E.; Galvez, C.; Montoya, P. and Liedo, P. 2019. Suppression of *Ceratitidis capitata* (Wied.) (Diptera: Tephritidae) populations in coffee in the Mexico-Guatemala border region through the augmentative releases of *Diachasmimorpha longicaudata* (Ashmead) (Hymenoptera: Braconidae). *Biocontrol Sci. Technol.* 29(8):822-826. <https://doi.org/10.1080/09583157.2019.1608507>.
- Culliney, T. 2014. Crop losses to arthropods. *In: Pimentel, D. and Peshin, R. (Ed.) Integrated pest management. Springer, Dordrecht. 201-225.* https://doi.org/10.1007/978-94-007-7796-5_8.
- Dimetry, N. Z. 2012. Prospects of botanical pesticides for the future in integrated pest management programme (IPM) with special reference to neem uses in Egypt. *Arch. Phytopathol. Pflanzenschutz* 45(10):1138-1161. <https://doi.org/10.1080/03235408.2012.657932>.
- Dong, F.; Fu, X.; Watanabe, N.; Su, X. and Yang, Z. 2016. Recent advances in the emission and functions of plant vegetative volatiles. *Molecules*. 21(2):1-10. <https://doi.org/10.3390/molecules21020124>.
- Eriksson, M.; Hardell, L.; Carlberg, M. and Kerman, M. 2008. Pesticide exposure as risk factor for non-Hodgkin lymphoma including histopathological subgroup analysis. *Int. J. Cancer*. 123(7):1657-1663. <https://doi.org/10.1002/ijc.23589>.
- FAO. 2018. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. El futuro de la alimentación y la agricultura: vías alternativas hacia el 2050. Versión resumida. Rome. 64 pp. <http://www.fao.org/3/CA1553ES/ca1553es.pdf>.

- Felipe, V. M.; Talamas, E. J. and Sánchez, P. S. R. 2019. Scelionidae (Hymenoptera) parasitizing eggs of *Bagrada hilaris* (Hemiptera, Pentatomidae) in Mexico. *J. Hymenopt. Res.* 73:143. <https://doi.org/10.3897/jhr.73.36654>.
- Gonçalves, G. L. P.; Lira, S. P.; Glssi, D. S. y Vendramim, J. D. 2021. Bioactividad de extractos de Solanaceae frente a *Zabrotes subfasciatus*. *Acta Biol. Colomb.* 26(1):62-71. <https://doi.org/10.15446/abc.v26n1.84712>.
- Hendrichs, J. 2000. Use of the sterile insect technique against key insect pests. *Sustain. Develop.* I. 2:75-79.
- Jaraleño, T. J.; Lomeli, F. J. R.; Rodríguez, L. E.; Bujanos, M. R. and 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>.
- Kim, D. S. 2021. A Review on the insecticidal activity of neem extracts (azadirachtin) and its current status of practical use in Korea. *Korean J. Appl. Entomol.* 60(4):463-471. <https://doi.org/10.25085/rsea.800104>.
- Lannacone, J. y Reyes, M. 2001. Efecto de la rotenona y neem sobre *Bemisia tabaco* Gennadius (Homoptera: Aleyrodidae) y *Liriomyza huidobrensis* Blanchard (Diptera: Agromyzidae) plagas del tomate en el Perú. *Agronomía Trop.* 51(1):65-79.
- Marec, F. and Vreysen, M. J. 2019. Advances and challenges of using the sterile insect technique for the management of pest Lepidoptera. *Insects.* 10(11):371. <https://doi.org/10.3390/insects10110371>.
- Montoya, P.; López, P.; Cruz, J.; Cadena, C.; Cancino, J. and Liedo, P. 2017. Effect of *Diachasmimorpha longicaudata* releases on the native parasitoid guild attacking *Anastrepha* spp. larvae in disturbed zones of Chiapas, Mexico. *BioControl.* 62(5):581-593. <https://doi.org/10.1007/s10526-017-9826-8>.
- Ohyama, K.; Okawa, A.; Moriuchi, Y. and Fujimoto, Y. 2013. Biosynthesis of steroidal alkaloids in Solanaceae plants: Involvement of an aldehyde intermediate during C-26 amination. *Phytochemistry.* 89:26-31. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2013.01.010>.
- Ordoñez, G. M.; Ríos, V. C.; Berlanga, R. D. I.; Acosta, M. C. H.; Salas, M. M. A. y Cambero, C. O. J. 2015. Reporte preliminar de entomopatogenos del ‘gusano cogollero’ *Spodoptera Frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) en Chihuahua, México. *Entomol. Mex.* 2:241-246.
- Orozco, S. M.; Robles, G. M.; Hernández, F. L. M.; Velázquez, M. J. J.; Jesús, B. G. M.; Manzanilla, R. M.; Manzo, S. G. y Nieto, A. D. 2016. Uso de aceites y extractos vegetales para el control de *Diaphorina citri* Kuwayama1 en lima mexicana en el Trópico Seco de México. *Southwest. Entomol.* 41(4):1051-1066. <https://doi.org/10.3958/059.041.0405>.
- Pacheco, H. M.; Reséndiz, M. J. y Arriola, P. V. J. 2019. Organismos entomopatógenos como control biológico en los sectores agropecuario y forestal de México: una revisión. *Rev. Mex. Cienc. Forest.* 10(56):4-32. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v10i56.496>.
- 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 Protect. Sci.* 52(4):229-241. <https://doi.org/10.17221/31/2016-PPS>.
- Pérez, T. B.; Aragón, G. A.; Cuate, M. V.; López, O. J. F.; Aragón, S. M. y Lugo, G. G. 2017. Efecto de la aplicación en campo de mezclas de extractos vegetales sobre la presencia y daños de insectos plaga en el cultivo de *Amaranthus hypochondriacus* L. *Rev. Fac. Agron.* 34:477-496.
- Peterson, C. and Coats, J. 2001. Insect repellents-past, present and future. *Pestic. Outlook.* 12(4):154-158. <https://doi.org/10.1039/b106296b>.

- Pizarro, D.; Silva, G.; Tapia, M.; Rodríguez, J. C.; Urbina, A.; Lagunes, A.; Santillán, O. C.; Robles, B. A. y Aguilar, M. S. 2013. Actividad insecticida del polvo de *Peumus boldus* Molina (Monimiaceae) contra *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae). B. Latinoam. Caribe Pl. 12(4):420-430.
- Ríos, V. C.; Pérez, C. D. A.; Salas, M. M. Á.; Berlanga, R. D. I.; Ornelas, P. J. J.; Muñiz, C. H. A.; Cambero, C. J. and Jacobo, C. J. L. 2014. Pathogenicity of the Hypocreales fungi *Beauveria bassiana* and *Metarhizium anisopliae* against insect pests of tomato. Southwest. Entomol. 39(4):739-750. <https://doi.org/10.3958/059.039.0405>.
- Ruiz, J. K. Z.; Osorio, O. R.; Hernández, H. L. U.; Ochoa, F. A. A.; Silva, V. R. y Mendez, Z. G. 2021. Actividad acaricida de extractos de plantas contra el ácaro rojo de las palmeras *Raoiella indica* (Acari: Tenuipalpidae). Rev. Soc. Entomol. Arg. 80(1):33-39.
- Somoza, V. C. E.; Hernández, V. V. M.; Peña, Ch. G.; Torres, G. G.; Huerta, P. A.; Ortega, M. L. D. and Salazar, M. J. A. 2018. Interaction of *Beauveria bassiana* strain HPI-019/14 and *Bacillus thuringiensis* strain GP139 for the biological control of *Bemisia tabaci* in strawberry. Bull. Insectology. 71(2):201-209.
- Sun, W.; Shahrajabian, M. H. and Cheng, Q. 2020. Pyrethrum an organic and natural pesticide. J. Biol. Environ. Sci. 14(40):41-44.
- Vreysen, M. J.; Abd, A. A. M.; Bourtzis, K.; Bouyer, J.; Caceres, C. X.; de Beer, C.; Oliveira, C. D. X.; Maiga, H.; Mamai, W.; Nikolouli, K.; Yamada, H. and Pereira, R. 2021. The insect pest control laboratory of the joint FAO/IAEA programme: ten years of research and development, achievements and challenges in support of the sterile insect technique. Insects. 12(4):346. <https://doi.org/10.3390/insects12040346>.
- Wakeil, N. E. 2013. Botanical pesticides and their mode of action. Gesunde Pflanzen. 65(4):125-149. <https://doi.org/10.1007/s10343-013-0308-3>.
- Wong, T. T. Y.; Ramadan, M. M.; McInnis, D. O.; Mochizuki, N.; Nishimoto, J. A. and Herr, J. C. 1991. Augmentative releases of *Diachasmimorpha tryoni* (Hymenoptera: Braconidae) to suppress a Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae) population in Kula, Maui, Hawaii. Biol. Control. 1(1):2-7. [https://doi.org/10.1016/1049-9644\(91\)90094-G](https://doi.org/10.1016/1049-9644(91)90094-G).
- Zhang, P.; Qin, D.; Chen, J. and Zhang, Z. 2020. Plants in the genus *Tephrosia*: valuable resources for botanical insecticides. Insects. 11(10):721. <https://doi.org/10.3390/insects11100721>.