

Efecto insecticida del extracto metanólico de *Argemone mexicana* para el control de *Bactericera cockerelli* (Sulc.) (Hemiptera: Triozidae)

Insecticidal effect of the methanolic extract of *Argemone mexicana* for the control of *Bactericera cockerelli* (Sulc.) (Hemiptera: Triozidae)

Delgado-Ortiz, J.C.¹ , López-López, H.² , Beltrán-Beache, M.³ , Ochoa-Fuentes, Y.M.² , Cerna-Chávez, E.² , Castro del Ángel, E.^{2*} 

¹ Catedrático Conacyt-UAAAN, Departamento de Parasitología, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

² Departamento de Parasitología, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

³ Universidad Autónoma de Aguascalientes. Centro de Ciencias Agropecuarias-Departamento de Ciencias Agronómicas. Posta Zootécnica, C.P. 20700. Jesús María, Aguascalientes, México.



Please cite this article as/Como citar este artículo: Delgado-Ortiz, J.C., López-López, H., Beltrán-Beache, M., Ochoa-Fuentes, Y.M., Cerna-Chávez, E., Castro del Ángel, E. (2023). Insecticidal effect of the methanolic extract of *Argemone mexicana* for the control of *Bactericera cockerelli* (Sulc.) (Hemiptera: Triozidae). *Revista Bio Ciencias*, 10 e1404. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1404>

Article Info/Información del artículo

Received/Recibido: August 22th 2022.

Accepted/Aceptado: April 1th 2023.

Available on line/Publicado: April 25th 2023.

RESUMEN

Argemone mexicana L. es una maleza, la cual es utilizada como planta medicinal. La actividad biológica de esta planta se ha observado en patógenos como virus, hongos, bacterias, protozoos y plagas de cultivos agrícolas; dicha actividad se atribuye a compuestos como flavonoides, glucósidos, terpenoides, compuestos fenólicos y alcaloides presentes en la planta. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto del extracto metanólico de *A. mexicana* como insecticida sobre *Bactericera cockerelli*. Se detectaron 13 metabolitos por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas; siendo seis los que tienen reporte de actividad biológica; el compuesto identificado como 5,7,8,15-Tetrahidro-3,4-dimetoxi-6-metil[1,3]benzodioxolo[5,6-e][2]benzazecin-14(6H)-ona es el segundo con mayor abundancia y es un alcaloide de bencilisoquinolina. La mortalidad observada a las 48 h fue de 83.6 y 83.9 % dependiente de las dosis altas de 20 y 30 mg/mL; mientras que a las 72 h se observó un aumento de la mortalidad hasta en un 97.2 % a las concentraciones de 8-30 mg/mL. La concentración letal media fue de 7.63 mg/mL y una LC₉₅ de 107.98 mg/mL. El análisis del extracto metanólico de las hojas de *A. mexicana* reveló que puede ser empleado como insecticida de origen vegetal al causar mortalidad en ninfas de *B. cockerelli*.

PALABRAS CLAVE: Alcaloide, bencilisoquinolina, chicalote, mortalidad, psílido del tomate.

*Corresponding Author:

Epifanio Castro del Ángel. Departamento de Parasitología, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, CP. 25315. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Telefono: (844) 110 200. E-mail: epifaniocastrodelangel@hotmail.com

ABSTRACT

Argemone mexicana L. is a weed, which is used as a medicinal plant. The biological activity of this plant has been observed on pathogens such as viruses, fungi, bacteria, protozoa, and agricultural crop pests; such activity is attributed to compounds such as flavonoids, glycosides, terpenoids, phenolic compounds, and alkaloids present in the plant. The study aimed to evaluate the effect of the methanolic extract of *A. mexicana* as an insecticide on *Bactericera cockerelli*. Thirteen metabolites were detected by gas chromatography coupled to mass spectrometry; six were reported to have biological activity; the compound identified as 5,7,8,15-Tetrahydro-3,4-dimethoxy-6-methyl[1,3]benzodioxolo[5,6-e][2]benzazecin-14(6H)-one is the second most abundant and is a benzyloquinoline alkaloid. The observed mortality at 48 h was 83.6 and 83.9 % dependent on the high doses of 20 and 30 mg/mL; while at 72 h an increase in mortality up to 97.2 % was observed at concentrations of 8-30 mg/mL. LC_{50} was 7.63 mg/mL and an LC_{95} of 107.98 mg/mL. Analysis of the methanolic extract of *A. mexicana* leaves revealed that it can be used as a plant-derived insecticide by causing mortality in *B. cockerelli* nymphs.

KEY WORDS: Alkaloid, benzyloquinoline, chicalote, mortality, tomato psyllid.

Introducción

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una hortaliza ampliamente cultivada en el mundo, debido a su importancia nutricional y socioeconómica (Yu *et al.*, 2017; Tamburino *et al.*, 2020). Un reto que se muestra en la producción de tomate es la infestación de plagas en las regiones templadas, subtropicales y tropicales de todo el mundo (Fuentes *et al.*, 2017), que generan pérdidas en los rendimientos y calidad del fruto (Liu & Wang, 2020).

El insecto *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Triozidae) conocido como psílido del tomate y la papa es plaga de algunas Solanáceas como berenjena, chile, papa y tomate de cascara (Tang *et al.*, 2020). El daño principal resulta por la transmisión de toxinas que afectan el crecimiento de la planta (Sumner *et al.*, 2020) y de manera indirecta es portador de la bacteria *Candidatus Liberibacter solanacearum* asociada a enfermedad del permanente del tomate (García-Sánchez *et al.*, 2021; Roque-Enríquez *et al.*, 2021). El uso inadecuado de los insecticidas químicos ha propiciado efectos negativos sobre las poblaciones de *B. cockerelli* debido a que se utilizan hasta 12 veces en el ciclo de cultivo; que lejos de mejorar la sanidad de la planta, provoca la posible selección de resistencia del insecto y costos elevados para la producción (Gutiérrez-Ramírez *et al.*, 2021).

Únicamente el uno por ciento del total de insecticidas aplicados en zonas agrícolas ataca a la plaga a la que va dirigida, lo demás es persistente en el agua, suelo y aire; para reducir los efectos adversos, se deben considerar alternativas más seguras para el manejo de plagas y enfermedades (Koul *et al.*, 2004). La búsqueda de insecticidas naturales desde especies de plantas silvestres son prometedoras para usarse como sustancias bioactivas, pero también es necesario que estos ensayos tengan aplicaciones más prácticas para los sistemas de producción y aporten beneficios socioeconómicos a los productores (Tembo *et al.*, 2018). Dougoud *et al.* (2019) informan que cerca de 235 familias de plantas (2,500 especies) en el planeta poseen acción biológica contra plagas, por medio de extractos vegetales que exhiben principios activos con propiedades de repelencia, antialimentaria e insecticida.

La especie *Argemone mexicana* L. considerada una maleza de hoja ancha, es denominada chicalote, perteneciente a la familia Papaveraceae (Andleeb *et al.*, 2020, Manalil & Chauhan, 2019), y es una de las 25 especies del género *Argemone* con un alto contenido de alcaloides (Xool-Tamayo *et al.*, 2021). Esta especie se puede encontrar ampliamente distribuida en campos abiertos o al borde de las carreteras. Debido a su alto contenido de aceites en la semilla y alcaloides en toda la planta (Martínez-Delgado *et al.*, 2022), en México es usada como planta medicinal para el tratamiento de enfermedades como asma, úlceras, infecciones intestinales y cáncer (Das *et al.*, 2011; Elizondo-Luévano *et al.*, 2018; Datkhile *et al.*, 2021; Singh *et al.*, 2021).

La actividad biológica de esta planta se ha observado en patógenos como virus, hongos, bacterias y protozoos parásitos (Elizondo-Luévano *et al.*, 2018; Andleeb *et al.*, 2020), dicha actividad se atribuye a compuestos como flavonoides, glucósidos, terpenoides, compuestos fenólicos y alcaloides (More *et al.*, 2017). También se han reportado acciones contra plagas de cultivos agrícolas como *Bemisia tabaci*, *Spodoptera frugiperda*, *Aphis gossypii* y *Tribolium castaneum* (Granados-Echegoyen *et al.*, 2019; Miranda-Arámbula *et al.*, 2021; Martínez-Delgado *et al.*, 2022), sin embargo, las pruebas son limitadas debido a la falta de ensayos sobre distintas plagas y cultivos. Por lo tanto, el fin de este estudio fue identificar los compuestos del extracto metanólico de las hojas de la especie *A. mexicana*, así como evaluar su actividad biocida sobre ninfas de *B. cockerelli*.

Material y Métodos

Colonia de *Bactericera cockerelli* (Sulc.)

Los insectos proceden de cultivos de papa y tomate recolectados en 2018 en Coahuila y Nuevo León. Las colonias se establecieron en el invernadero del departamento de parasitología, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, se colocaron en jaulas de madera (50 cm de largo x 50 cm de ancho x 80 cm de alto) cubiertas con tela de organza con poro de 40 mm, a 22 °C con un fotoperíodo de 14:10 h (Luz/Oscuridad) con plantas de tomate variedad Río Grande (Roque-Enríquez *et al.*, 2021).

Muestreo y obtención de extracto de *Argemone mexicana* L.

La recolección fue efectuada de acuerdo con lo descrito por Bobi *et al.* (2015) modificado, las plantas completas se colocaron en bolsas de papel para su transporte, el muestreo se realizó en el municipio de Saltillo, Coahuila, México. La identificación taxonómica de la planta fue realizada por el Doctor José Ángel Villarreal Quintanilla e incluida en el herbario ANSM de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro con número 103807. En seguida se escogieron solo hojas con las siguientes características de *A. mexicana*: hojas con márgenes dentados, terminación en espina, color verde intenso, tono ligeramente glauco y líneas blanquecinas; y se dejaron secar a la sombra por diez días, después se molieron en una licuadora (Waring Commercial, modelo 7011s) y se sumergieron en metanol al 96 % (Meyer, CDMex, México) durante siete días (a una proporción de 1 g de materia seca mL⁻¹ de solvente), con agitación constante a temperatura ambiente (rendimiento del 84 % v/v). El extracto se filtró al vacío con papel Whatman N° 1 y se almaceno en un frasco de color ámbar a 4 °C hasta su uso.

Análisis de Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (GC-MS)

Este proceso se realizó en el laboratorio de Biogeoquímica (UBIPRO) de la Universidad Nacional Autónoma de México, Iztacala, México. Los compuestos presentes en el extracto de hojas de *A. mexicana*, se determinaron en un cromatógrafo de gases 6850 (Aligent, Santa Clara, California), utilizando una columna HP-5MS (Aligent, Santa Clara, California) de 30 m × 250 µm de diámetro y película de 0.25 µm; la programación del horno fue de 2 min a 150 °C, posteriormente se aumentó 10 °C por min hasta conseguir 300 °C por 4 min, se usó Helio en la fase móvil a un caudal de 1 mL min⁻¹. Se acopló a un detector de espectrometría de masas 5975C (Aligent Technologies, USA) a 200 °C durante 2 min, una fuente de ionización fue de 230 °C y una temperatura de cuadrupolo de 150 °C (a 70 eV de ionización); se acondicionó para un escaneo completo en un intervalo de masas de 35 a 400 m z⁻¹. La identificación de los compuestos se estableció basado en el análisis de sus espectros de masas, empleando la base de datos del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (por sus siglas en inglés, NIST versión 08 MS).

Densidad relativa

Este estudio se realizó según lo descrito por López-López *et al.* (2022) con modificaciones, desde el extracto metanólico de hojas de *A. mexicana*, con un picnómetro Gay-Lussac de 25 mL (Brand 16038, Alemania) a 22 °C, la densidad del extracto se calculó mediante la fórmula:

$$\text{Densidad relativa} = \frac{(m_1 - m)}{m_2 - m} * d'_{22}$$

Donde: m es la masa del picnómetro vacío (g), m₁ es la masa del picnómetro con la muestra de ensayo (g), m₂ es la masa del picnómetro con agua (g), d'₂₂ es la densidad del agua a 22 °C (0.997772 g cm⁻³). Los resultados se expresan en mg mL⁻¹ para la preparación de las concentraciones a partir del extracto.

Bioensayo contra *B. cockerelli*

Utilizando el extracto metanólico de hojas de *A. mexicana*, se obtuvo una ventana de actividad biológica realizada a concentraciones de 0, 10, 20, 40, 60, 80 y 100 mg/mL, un testigo absoluto con agua destilada. Se usó la prueba de susceptibilidad número 032 versión 1 del Comité de Acción de Resistencia a Insecticidas (IRAC, 2014) con modificaciones. Debido a la alta mortalidad obtenida en la ventana biológica, se establecieron siete concentraciones a 2, 4, 8, 12, 16, 20 y 30 mg/mL; para las cuales se tomó una hoja de tomate saladette variedad Río Grande con 11 ninfas del 4^{to} instar de *B. cockerelli* fueron sumergidas en cada concentración; igualmente, se procedió a sumergir una hoja con ninfas en agua destilada como testigo absoluto por 5 s, se dejaron secar y a continuación se colocaron en cajas Petri con papel filtro empapado con agua destilada estéril. Se colocaron cuatro repeticiones para cada concentración y el testigo absoluto. La prueba se conservó con un fotoperíodo de 14:10 h (luz/oscuridad) a 23 °C. La evaluación de la mortalidad se efectuó cada 24 h posteriores a la aplicación del extracto, se utilizó un microscopio estereoscópico (Carl Zeiss Stemi DV4) para verificar el número de ninfas muertas, considerando a las ninfas como muertas cuando no presentaran movimiento coordinado mediante estímulo físico con un pincel.

Análisis de datos

Los resultados se expresaron como porcentaje de mortalidad y se ajustó la mortalidad mediante la fórmula de Abbott (Abbott, 1925). Se realizó un análisis Probit con la mortalidad corregida para la curva de concentración-mortalidad y registraron las concentraciones letales (LC₅₀ y LC₉₅). Finalmente, los datos fueron evaluados por un análisis de varianza y los valores medios fueron comparados por la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), bajo un diseño completamente al azar. Todos los análisis anteriores se realizaron utilizando el Software estadístico Statistical Analysis System (SAS) versión 9.0 (SAS Institute, 2002).

Resultados y Discusión

El análisis cromatográfico (GC-MS) de *A. mexicana* se obtuvieron 13 compuestos (dos ácidos grasos saturados, cinco ácidos grasos insaturados, un terpeno, dos alcoholes y tres alcaloides) (Tabla 1); siete de estos compuestos poseen actividad biológica reportada en la literatura, los cuales son 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 12. Siendo el de mayor abundancia en el extracto el ácido 9,12,15-Octadecatrienoico y el segundo con el 19.45 % fue el alcaloide 5,7,8,15-Tetrahidro-3,4-dimetoxi-6-metil[1,3]benzodioxolo[5,6-e][2]benzazecin-14(6H)-ona.

Es fundamental mencionar que la elección del solvente (como el etanol, metanol y cloroformo, etc.) para la extracción de los compuestos activos juega un papel sustancial, debido a que de esto depende el descubrir nuevos compuestos para fines de control de plagas y enfermedades (Andleeb et al., 2020). Las técnicas relacionadas en la producción de los extractos o fracciones bioactivas a partir de plantas suelen ser las mismas, y las etapas primordiales para este fin es la selección de solventes adecuados (polares, polares intermedios y no polares), el procedimiento de extracción y técnicas de identificación (Abubakar & Haque, 2020). Se ha observado que los extractos acuosos

y etanólico tienen la función de proteger cultivos de plagas (Tavares *et al.*, 2021), además los extractos de plantas a base de etanol, metanol, éter de petróleo, acetato de etilo, diclorometano, cloroformo y agua protegen a las plantas de hongos (Choudhury *et al.*, 2018).

Los compuestos fitoquímicos metabolizados en plantas se almacenan principalmente en vacuolas de las células vegetales, se han reconocido compuestos como los esteroides, terpenos y en mayor abundancia los fenólicos (incluyendo alcaloides); que dependiendo de su concentración y técnica de extracción se logran excelentes propiedades biopesticidas (Jiménez-Reyes *et al.*, 2019). La planta de *A. mexicana* presentó actividad insecticida a partir de diferentes extractos a base de acetato de etilo, acetona, metanol y hexano por extracción directa. Elango *et al.* (2012) reportan mayor rendimiento de extracción en hojas de *A. mexicana* con metanol (10.2 mg/g de hoja) en comparación con la acetona, acetato de etilo y hexano (5.5, 5.3 y 3.1 mg/g de hoja, respectivamente).

Tabla 1. Compuestos fitoquímicos derivados del extracto metanólico de *A. mexicana*.

	Compuesto	CAS ¹	Referencia	TR ²	Area %
1	Ácido hexadecanoico, éster metílico	000112-39-0	113690	11.99	1.88
2	Ácido n-hexadecanoico	000057-10-3	102726	12.78	12.35
3	Ácido 9,12-octadecadienoico (Z,Z)-, éster metílico	000112-63-0	132273	14.61	1.65
4	Ácido 9,12,15-octadecatrienoico, éster metílico, (Z,Z,Z)-	0007361-80-0	130794	14.70	4.08
5	Fitol	000150-86-7	133807	14.99	1.15
6	Ácido 9,12,15-octadecatrienoico, (Z,Z,Z)-	000463-40-1	119801	15.35	27.07
7	Ácido 9,12,15-octadecatrienoico, éster etílico, (Z,Z,Z)-	001191-41-9	141488	15.39	8.94
8	Ácido 9,12,15-octadecatrienoico, (Z,Z,Z)-	000463-40-1	119801	15.44	14.02
9	Erinina, 21-desoxo-23-hidroxi-, (23.alfa.)-	016843-68-8	188374	21.45	4.37
10	2,4-ciclohexadien-1-ona, 3,5-bis(1,1-dimetiletil)-4-hidroxi-	054965-43-4	76340	22.09	0.75
11	(+)-Canadina	000522-97-4	164694	23.03	1.77
12	1,3] Benzodioxolo [5,6-e] [2] benzazecin-14 (6H) -ona, 5,7,8,15-tetrahidro-3,4-dimetoxi-6- metil-	000485-91-6	182195	23.27	19.45
13	2,4-ciclohexadien-1-ona, 3,5-bis(1,1-dimetiletil)-4-hidroxi-	054965-43-4	76340	23.72	1.82

¹ CAS: Servicio de Resúmenes Químicos; ² TR: Tiempo de retención en minutos.

El resultado de los metabolitos identificados en la Tabla 1, ayudo a detectar que ciertos componentes ya han sido previamente reportados con las siguientes actividades biológicas: el éster metílico del ácido hexadecanoico detectado en el extracto metanólico de *Azolla pinnata* mostró un efecto insecticida en larvas del 4to estadio de *Aedes albopictus* (Ravi et al., 2018). El ácido n-hexadecanoico, identificado en el extracto de diclorometano de *Ficus sycomorus*, fue efectivo para repeler hembras de *Tetranychus urticae*, *Aphis craccivora* y *Sitophilus oryzae* (Romeh, 2013). Los ésteres metílicos del ácido 9,12-octadecadienoico (Z,Z)- y el ácido 9,12,15-octadecatrienoico (Z,Z,Z)- presentes en la fracción de éter de petróleo de *Robinia pseudoacacia* manifestaron efectos insecticidas sobre *Brevicoryne brassicae* y *Aphis gossypii* (Jiang et al., 2018).

En cuanto al fitol, ha sido reportado en el extracto etanólico de *Petiveria alliacea* como el principal metabolito con actividad insecticida contra ninfas *Bemisia tabaci* (Cruz-Estrada et al., 2013). El compuesto biológicamente más activo en el extracto de *A. mexicana* ha sido el ácido 9,12,15-octadecatrienoico, (Z,Z,Z)-, que está reportado en el extracto de acetato de etilo de *Moringa oleifera* como inhibidor en la eclosión de huevos y mortalidad de ninfas del 3er estadio de *Haemonchus contortus* y *Nacobbus aberrans* (Páez-León et al., 2022). Por último, el alcaloide 5,7,8,15-tetrahidro-3,4-dimetoxi-6-metil[1,3]benzodioxolo[5,6-e][2]benzazecin-14(6H)-ona obtenido del extracto acuoso de *A. mexicana*, demostró actividad antiparasitaria sobre *Plasmodium falciparum* (Simoes-Pires et al., 2014). Sin embargo, no existe suficiente información acerca de la actividad biológica de este alcaloide ante plagas de importancia agrícola presentes en las órdenes tisanóptera, hemíptera, homóptera, coleóptera, díptera y lepidóptera.

El ensayo con el extracto metanólico de las hojas de *A. mexicana* sobre ninfas de *B. cockerelli* mostró hasta un 67 % de mortalidad desde la concentración de 20 mg/mL a las 24 h (Tabla 2); en las concentraciones de 20 y 30 mg/mL, se observó la máxima mortalidad a las 48 y 72 h hasta un 97.3 %. La concentración letal media (LC₅₀) indicada por los datos de la mortalidad para el extracto metanólico de *A. mexicana* a las 48 h fue de 7.63 mg/mL y la LC₉₅ de 107.98 mg/mL con $p \leq 0.05$ (Tabla 3).

Autores como Danga et al. (2015) y Kosini et al. (2021) sugirieron que la presencia de alcaloides y otros metabolitos secundarios en extractos de plantas podría conducir a la pérdida de actividad del extracto durante el fraccionamiento. Esto lleva a la necesidad de combinar solventes, lo que genera altos costos de producción y efectos potencialmente dañinos para los humanos y el medio ambiente.

Dentro del género *Argemone* se han reconocido una serie de alcaloides en diferentes tejidos de la planta como los metabolitos frecuentes con propiedades medicinales y citotóxicas. Sintetizados a partir de aminoácidos, son altamente reactivos en la naturaleza y biológicamente activos en una amplia variedad de organismos (Brahmachari et al., 2013; Dey et al., 2020).

Tabla 2. Efecto del extracto metanólico de *A. mexicana* sobre la mortalidad de ninfas de *B. cockerelli*.

Tratamientos (mg/mL)	Horas después de la aplicación*		
	24	48	72
Control	0 ± 0 d	0 ± 0d	0 ± 0 c
2	16.6 ± 8.67 cd	29.9 ± 17.06 c	55.5 ± 15.72 b
4	16.6 ± 4.48 cd	26.4 ± 18.91cd	55.6 ± 31.43 b
8	28.9 ± 21.92 bcd	46.1 ± 14.45 bc	75 ± 16.66 ab
12	23.9 ± 23.29 cd	54.2 ± 9.49 bc	86.1 ± 10.64 ab
16	45.5 ± 20.45 abc	61.9 ± 14.86 ab	88.9 ± 9.07 ab
20	67.05 ± 15.75 a	83.6 ± 6.75 a	94.4 ± 6.41 a
30	64.3 ± 12.27 ab	83.9 ± 5.84 a	97.2 ± 5.55 a
p valor	0.0001	0.0001	0.0001

Los datos representan la media de la mortalidad por tratamiento. *Letras minúsculas diferentes en cada columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Tabla 3. Concentración letal del extracto metanólico de *A. mexicana* sobre ninfas de *B. cockerelli*.

Horas después de la aplicación	Concentración letal (LC)		Ecuación de regresión	Coeficiente de determinación
	(mg/mL)			
	LC ₅₀	LC ₉₅		
24	17.96	309.63	Y =-1.6690x + 1.3304	0.841
48	7.63	107.98	Y=-1.2608x + 1.4291	0.897
72	2.25	28.97	Y=-0.5230x + 1.4828	0.819

LC: Concentración Letal en mg/mL.

El proceso de biosíntesis de los alcaloides de bencilisoquinolina (BIA) en el género *Argemone*, comienza con reacciones enzimáticas que primero están reguladas por proteínas del citocromo P450 (CYP450) de la familia CYP719; que catalizan la tirosina con la tirosina/DOPA descarboxilasa (TYDC) para formar dopamina, la (S)-norcoclaurina sintasa (NCS) y monofenol oxigenasa se condensan para obtener el 4-hidroxifenilacetaldehído (4HPPA) (Liscombe & Facchini, 2008; Rubio-Pina & Vázquez-Flota, 2013). A partir del 4HPPA se forma el compuesto (S)-norcoclaurina por medio de la interferencia de la norcoclaurina sintasa (NCS); luego, por metilación e hidroxilación, se obtiene (S)-reticulina por la participación de la (RS)-norcoclaurina

6-O-metiltransferasa (6OMT), (S)-coclaurina-N-metiltransferasa (CNMT), 3'-hidroxi-N-metil-(S)-coclaurina 4'-O-metiltransferasa (4OMT) y N-metilcoclaurina 3'-hidroxilasa (NMCH) (Rubio-Pina & Vázquez-Flota, 2013; Takemura *et al.*, 2013).

Partiendo del precursor (S)-reticulina, la alocriptopina (AL) se sintetiza por medio de la enzima del puente de berberina (BBE), la CYP719A2 (S)-escoulerina 9-O-metiltransferasa (SMT), tetrahidroprotoberina-N-metiltransferasa (TNMT) y metiltetrahidroprotoberberina 14-monooxigenasa (MTMO) (De-La-Cruz Chacón *et al.*, 2012; Takemura *et al.*, 2013). El núcleo estructural de la AL es una protopina, que se deriva de la ruta metabólica de la protoberberina (Marek *et al.*, 1998; Beaudoin & Facchini, 2014).

El compuesto 12 es el 5,7,8,15-Tetrahidro-3,4-dimetoxi-6-metil[1,3]benzodioxolo[5,6-e][2]benzazecin-14(6H)-ona, compuesto descrito con el nombre común alocriptopina (Sakai *et al.*, 1988; Brahmachari *et al.*, 2013; Nigdelioglu-Dolanbay *et al.*, 2021) presente en el género *Argemone* (Elizondo-Luévano *et al.*, 2018) y en la especie *A. mexicana* (Vacek *et al.*, 2010; Simoes-Pires *et al.*, 2014; Gobato *et al.*, 2015) donde se han identificado hasta 25 BIA (Elizondo-Luévano *et al.*, 2018). La AL pertenece al grupo de los alcaloides verdaderos de isoquinolina, en la clasificación de los BIA que derivan de los aminoácidos fenilalanina y tirosina (Dey *et al.*, 2020). Se encuentra con mayor acumulación en hojas de *A. mexicana* (Díaz-Chávez *et al.*, 2011; Martínez-Delgado *et al.*, 2022) y hasta el momento se han identificado alrededor de 2,500 BIA en diversas familias, incluida la Papaveraceae (Vacek *et al.*, 2010).

Los mecanismos descritos para los BIA involucran la inhibición de la replicación del DNA generando rupturas de doble cadena en los sitios de replicación del DNA, provocando citotoxicidad (Inoue *et al.*, 2021), la inhibición de la acetilcolinesterasa (Houghton *et al.*, 2006), inhibición de enzimas del citocromo P450 (Menéndez-Perdomo & Facchini, 2018) y anti-herbivoría por el escaso aporte nutrimental al insecto (Lee *et al.*, 2013).

Pese a que los insectos generalistas y especialistas han desarrollado mecanismos de desintoxicación sobre metabolitos secundarios o sustancias extrañas, mediante enzimas específicas producidas por el citocromo P450, las esterasas y glutatión S-transferasas en el intestino medio del insecto, para lograr una inmediata supresión de las sustancias tóxicas (Schuler, 1996). Los BIA poseen ciertas propiedades que limitan su desintoxicación en insectos como se mencionó anteriormente.

Además, los solventes orgánicos son efectivos en la difusión en los tejidos vegetales y arrastrar metabolitos secundarios aromáticos de polaridad similar; que tienen la posibilidad de interactuar en la alteración o disrupción de la membrana celular, la inactivación o privación de sustrato de la enzima, interacción con el DNA, células nerviosas del insecto, inhibición en la oviposición, eclosión de huevos y formar puentes de disulfuro en proteínas secretoras que ayudan a los insectos en el estrés oxidativo (Gurjar *et al.*, 2012; Lengai *et al.*, 2020). Esto puede explicar el efecto sobre la mortalidad que se menciona a continuación.

El extracto metanólico a base de hojas de *A. mexicana* ocasionaron la mortalidad de larvas de *Coptotermes formosanus* a las 24 y 48 h (58 y 71 %, respectivamente) a partir de 2 mg/mL (Elango *et al.*, 2012). El extracto de éter de petróleo de hojas de *A. mexicana* presentó

actividad insecticida con una LC_{50} de 48.89 ppm a las 48 h sobre larvas del tercer instar de *Culex quinquefasciatus* (Sakthivadivel *et al.*, 2012). También se demostró que hojas de *A. mexicana* en solución acuosa al 5 % (p/v) generaron sobre *B. tabaci* la reducción de la población al final del experimento en 20.57 %, en tomate bajo invernadero (Martínez-Tomás *et al.*, 2015). Estos resultados demuestran que los disolventes polares extraen los metabolitos secundarios de las hojas de *A. mexicana* y son biológicamente activos contra insectos. De igual manera, se demostró el efecto de AL sobre *T. cruzi* con una LC_{50} de 32 mg/mL (Simoës-Pires *et al.*, 2014). Esto nos indica que la actividad biológica de *A. mexicana* reportada como extracto orgánico, tiene el potencial para el control de plagas agrícolas.

No obstante, no hay información disponible sobre ensayos del BIA alocriptopina con actividad insecticida; sin embargo, se han estudiado los efectos en el ser humano como hepatoprotector, antitrombótico, antiinflamatorio, antitusivos, anticancerígeno, antiparasitaria y actividad antibacteriana (Beaudoin & Facchini, 2014; Huang *et al.*, 2018).

A pesar de esto, se informó que la tiliamosina un BIA aislado de *Tiliacora acuminata*, afectó los huevos de *Culex quinquefasciatus* hasta en un 91 % a las 120 h y en las larvas presentaron daños importantes en las células del intestino medio; así como varios movimientos diferentes de las larvas en comparación con el control. Esto fue causado por la inhibición de la acetilcolinesterasa AChE1, incrementando la acetilcolina en la sinapsis del insecto, provocando la disminución de los impulsos eléctricos y la activación de los receptores postsinápticos excitatorios que provocaron parálisis y muerte (Matsuura & Fett-Neto, 2015; Sandhanam *et al.*, 2019). La planta *Argemone platyceras* expresa el compuesto munitagina, un BIA que inhibe la AChE, butirilcolinesterasa (BChE) y la prolil oligopeptidasa (POP), y la AL presentó actividad débil sobre AChE1 y POP (Siatka *et al.*, 2017). También, se demostró que el BIA sanguinarina, bloquea la transcripción de las enzimas α -amilasa, serina proteasa y lipasa en el intestino medio de las larvas de *Lymantria dispar*, reflejándose un efecto antialimentario y la disminución en la supervivencia del insecto (Zou *et al.*, 2019).

Además, se ha reconocido que los BIA como la sanguinarina, la protoberina, la benzofenantridina, berberina, fenantridina y ungeremina pueden inhibir la síntesis de ácidos nucleicos al dirigirse al dihidrofolato reductasa y las proteínas del anillo Z involucradas en la división celular (Matsuura & Fett-Neto, 2015). Así mismo, el ensayo efectuado por Quiroz-Carreño *et al.* (2020) en larvas de *Drosophila melanogaster* y *Cydia pomonella*, con cuatro BIA (boldina, coclaurina, pukateína y laurilitsina) mostró una mortalidad del 80 %; ocasionado posiblemente por el acoplamiento del heterodímero del receptor de ecdisona y octapamina, que interactúa con el sistema hormonal de los insectos para modular de forma agonista los BIAs con acción insecticida selectiva.

Como se observa en la Tabla 3, la LC_{50} disminuyó del 57.5 % al 87.5 % a las 48 y 72 h, respectivamente. Esto indica que los 13 compuestos identificados en el extracto metanólico de hojas de *A. mexicana*, podrían estar interactuando en sitios sensibles en el cuerpo del insecto a medida que la concentración del extracto incrementa y se acumula con el tiempo de exposición; a través de la disminución de enzimas secretadas por el insecto como mecanismo de protección y reguladores del crecimiento (Al-Rashidi *et al.*, 2022).

En el estudio de mortalidad de Anon & Adday (2020), empleo un extracto a base de alcaloides de hojas de *Datura inoxia* en larvas del 4to estadio de *C. quinquefasciatus*; la concentración inhibitoria media fue del 31.4 % y 62.4 % mayor en comparación con los extractos con compuestos de turbina y fenoles. Sin embargo, la exposición a las 24 horas dio como resultado tasas de mortalidad muy similar del 60 % al 70 %, sin que se observaran diferencias estadísticamente significativas. Esto posiblemente se deba a que los alcaloides también actúan sobre la polimerización de la tubulina durante la mitosis, ocasionando toxicidad, una perturbación de las enzimas que metabolizan azúcares, generando alteraciones en los procesos fisiológicos del insecto (Bhambhani et al., 2021). Así como un bloqueo específico de los canales de calcio del retículo sarcoplásmico en las células musculares que provoca parálisis, arritmia cardíaca y muerte del insecto (Alves et al., 2019).

Conclusiones

Los resultados del estudio de GC-MS mostró que el compuesto 12 (perteneciente al grupo de los BIA), es el segundo compuesto con mayor abundancia en el extracto metanólico de hojas de *A. mexicana*. Se identificaron siete metabolitos secundarios (1, 2, 3, 4, 5, 6 y 12) en el extracto metanólico de hojas de *A. mexicana* con actividad biológica. El extracto metanólico de hojas de *A. mexicana* indujo la mortalidad en un 83.9 % a las 48 h en las ninfas de *B. cockerelli* en las concentraciones 20 y 30 mg/mL, con una LC_{50} de 7.63 mg/mL y una LC_{95} de 107.98 mg/mL. El extracto de hojas de *A. mexicana* mostró efecto insecticida para controlar a *B. cockerelli*.

Contribución de los autores

JCDO y HLL concibieron, diseñaron y realizaron la investigación. JCDO, HLL y ECA; en participación con MBB, realizaron el análisis e interpretación de los datos. HLL redactó el manuscrito con el apoyo de JCDO, YMOF y ECC. Todos los autores contribuyeron a la discusión, revisión y aceptación del manuscrito final.

Agradecimientos

Agradecemos el financiamiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a Juan Carlos Delgado Ortiz (programa Investigadoras e Investigadores por México Proyecto 1048) y por la beca de doctorado otorgada a Henry López López (número de beca 777528).

Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Referencias

- Abbott, W. S. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18(2), 265-267. <https://doi.org/10.1093/jee/18.2.265a>
- Abubakar, A. R., & Haque, M. (2020). Preparation of medicinal plants: Basic extraction and fractionation procedures for experimental purposes. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, 12(1), 1. https://doi.org/10.4103/jpbs.JPBS_175_19
- Al-Rashidi, H. S., Mahyoub, J. A., Alghamdi, K. M., & Mohammed Al-Otaibi, W. (2022). Seagrasses extracts as potential mosquito larvicides in Saudi Arabia. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(12), 9. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103433>
- Alves, D. S., Fernandez, P. C. G., Martin, A. M., Budia, F., Carvalho, G. A., Zanetti, R., & de Oliveira, D. F. (2019). Toxicity of alkaloid fractions from *Psychotria* spp. (Rubiaceae) against *Atta sexdens* forel, 1908 (Hymenoptera: Formicidae). *Cerne*, 25(2), 255–262. <https://doi.org/10.1590/01047760201925022632>
- Andleeb, S., Alsalmeh, A., Al-Zaqri, N., Warad, I., Alkahtani, J. & Bukhari, S. M. (2020). In-vitro antibacterial and antifungal properties of the organic solvent extract of *Argemone mexicana* L. *Journal of King Saud University – Science*, 32(3), 2053-2058. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.01.044>
- Anon, M. R., & Adday, W. A. (2020). Biological effective of crude secondary compounds of Leaves *Datura innoxia* in the Non-cumulative for mortality of Immature insect *Culex quinquefasciatus* Say (Diptera:Culicidae). *Journal of Physics: Conference Series*, 1664, 112. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1664/1/012112>
- Beaudoin, G. A. W. & Facchini, P. J. (2014). Benzylisoquinoline alkaloid biosynthesis in opium poppy. *Planta*, 240, 19-32. <https://doi.org/10.1007/s00425-014-2056-8>
- Bhambhani, S., Kondhare, K. R., & Giri, A. P. (2021). Diversity in chemical structures and biological properties of plant alkaloids. *Molecules*, 26(11), 106. <https://doi.org/10.3390/molecules26113374>
- Bobi, A. H., Bandiya, M. H., Suleiman, M. & Usman, M. (2015). Evaluation of insecticidal efficacy of some selected plants leaf-ethanol extracts against *Musca domestica* L. [Diptera: Muscidae]. *Entomology and Applied Science Letters*, 2(1), 23-28. <https://easletters.com/article/zxkd-evaluation-of-insecticidal-efficacy-of-some-selected>
- Brahmachari, G., Gorai, D. & Roy, R. 2013. *Argemone mexicana*: chemical and pharmacological aspects. *Brazilian Journal of Pharmacognosy* 23(3), 559-575. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2013005000021>
- Choudhury, D., Dobhal, P., Srivastava, S., Saha, S., & Kundu, S. (2018). Role of botanical plant extracts to control plant pathogens-a Review. *Indian Journal of Agricultural Research*, 52(4), 341–346. <https://doi.org/10.18805/IJARE.A-5005>
- Cruz-Estrada, A., Gamboa-Angulo, M., Borges-Argáez, R. & Ruiz-Sánchez, E. 2013. Insecticidal effects of plant extracts on immature whitefly *Bemisia tabaci* genn. (Hemiptera: Aleyroideae). *Electronic Journal of Biotechnology*, 16(1), 1-9. <https://doi.org/10.2225/vol16-issue1-fulltext-6>
- Danga, S. P. Y., Nukenine, E. N., Younoussa, L., Adler, C., & Esimone, C. O. (2015). Efficacy of *Plectranthus glandulosus* (Lamiaceae) and *Callistemon rigidus* (Myrtaceae) leaf extract fractions to *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Bruchidae). *Journal of Insect Science*, 15(1), 139. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iev117>
- Das, P., Pillai, S., Kar, D., Pradhan, D. & Sahoo, S. (2011). Pharmacological efficacy of *Argemone mexicana* plant extract, against cysteamine-induced duodenal ulceration in rats. *Indian Journal of Medical Sciences*, 65, 92-99. <https://doi.org/10.4103/0019-5359.104788>
- Datkhile, K. D., Patil, S. R., Durgawale, P. P., Patil, M. N., Hinge, D. D., Jagdale, N. J., Deshmukh,

- V. N. & More, A. L. (2021). Biogenic synthesis of gold nanoparticles using *Argemone mexicana* L. and their cytotoxic and genotoxic effects on human colon cancer cell line (HCT-15). *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 19, 9. <https://doi.org/10.1186/s43141-020-00113-y>
- De-La-Cruz Chacón, I., González-Esquinca, A. R. & Riley-Saldaña, C. A. (2012). Biosíntesis de alcaloides bencilisoquinolínicos. *Universitas Scientiarum*, 17(2), 189-202. <https://doi.org/10.11144/javeriana.sc17-2.bab>
- Dey, P., Kundu, A., Kumar, A., Gupta, M., Lee, B. M., Bhakta, T., Dash, S. & Kim, H. S. (2020). Analysis of alkaloids (indole alkaloids, isoquinoline alkaloids, tropane alkaloids). *Recent Advances in Natural Products Analysis*, 2020, 505-567. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816455-6.00015-9>
- Díaz-Chávez, M. L., Rolf, M., Gesell, A. & Kutchan, T. M. (2011). Characterization of two methylenedioxy bridge-forming cytochrome P450-dependent enzymes of alkaloid formation in the Mexican prickly poppy *Argemone mexicana*. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 507 (1), 186-193. <https://doi.org/10.1016/j.abb.2010.11.016>
- Dougoud, J., Toepfer, S., Bateman, M. & Jenner, W. H. (2019). Efficacy of homemade botanical insecticides based on traditional knowledge. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 37. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0583-1>
- Elango, G., Abdul Rahuman, A., Kamaraj, C., Bagavan, A., Abduz Zahir, A., Santhoshkumar, T., Marimuthu, S., Velayutham, K., Jayaseelan, C., Kirthi, A. V. & Rajakumar, G. (2012). Efficacy of medicinal plant extracts against *Formosan subterranean termite*, *Coptotermes formosanus*. *Industrial Crops and Products*, 36(1), 524-530. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.10.032>
- Elizondo-Luévano, J. H., Castro-Ríos, R., Sánchez-García, E., Hernández-García, M. E., Vargas-Villarreal, J., Rodríguez-Luis, O. E. & Chávez-Montes, A. (2018). *In vitro* study of antiamoebic activity of methanol extracts of *Argemone mexicana* on trophozoites of *Entamoeba histolytica* HM1-IMSS. *Canadian Journal of Infectious Diseases and Medical Microbiology*, 2018, 7453787. <https://doi.org/10.1155/2018/7453787>
- Fuentes, A., Yoon, S., Kim, S. C. & Park, D. S. (2017). A robust deep-learning-based detector for real-time tomato plant diseases and pests recognition. *Sensors*, 17(9), 2022. <https://doi.org/10.3390/s17092022>
- García-Sánchez, A. N., Yáñez-Macias, R., Hernández-Flores, J. L., Álvarez-Morales, A., Valenzuela-Soto, J. H., Guerrero-Sánchez, C. & Guerrero-Santos, R. (2021). Exogenous application of polycationic nanobactericide on tomato plants reduces the *Candidatus Liberibacter*. *Plants*, 10(10), 2096. <https://doi.org/10.3390/plants10102096>
- Gobato, R., Gobato, A. & Fedrigo, D. F. G. (2015). Allocryptopine, berberine, chelerythrine, copsitine, dihydrosanguinarine, protopine and sanguinarine. Molecular geometry of the main alkaloids found in the seeds of *Argemone Mexicana* Linn. *Parana Journal of Science and Education*, 1(1), 8-16. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1507.05042>
- Granados-Echegoyen, C. A., Chan-Bacab, M. J., Ortega-Morales, B. O., Vásquez-López, A., Lagunez-Rivera, L., Diego-Nava, F. & Gaylarde, C. (2019). *Argemone mexicana* (Papaverales, Papavaraceae) as an alternative for mosquito control: first report of larvicidal activity of flower extract. *Journal of Medical Entomology*, 56(1), 261-267. <https://doi.org/10.1093/jme/tjy159>
- Gurjar, M. S., Ali, S., Akhtar, M., & Singh, K. S. (2012). Efficacy of plant extracts in plant disease management. *Agricultural Sciences*, 3(3), 425–433. <https://doi.org/10.4236/as.2012.33050>
- Gutiérrez-Ramírez, J. A., Betancourt-Galindo, R., Aguirre-Urbe, L. A., Cerna-Chávez, E., Sandoval-Rangel, A., Castro-Ángel, E., Chacón-Hernández, J. C., García-López, J. I. & Hernández-Juárez, A. (2021). Insecticidal effect of zinc oxide and titanium dioxide

- nanoparticles against *Bactericera cockerelli* Sulc. (Hemiptera: Trioizidae) on tomato *Solanum lycopersicum*. *Agronomy*, 11(8), 1460. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081460>
- Houghton, P. J., Ren, Y., & Howes, M. J. (2006). Acetylcholinesterase inhibitors from plants and fungi. *Natural Product Reports*, 23(2), 181–199. <https://doi.org/10.1039/b508966m>
- Huang, Y. J., Cheng, P., Zhang, Z. Y., Tian, S. J., Sun, Z. L., Zeng, J. G. & Liu, Z. Y. (2018). Biotransformation and tissue distribution of protopine and allocryptopine and effects of plume poppy total alkaloid on liver drug-metabolizing enzymes. *Scientific Reports*, 8, 537. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18816-7>
- Inoue, N., Terabayashi, T., Takiguchi-Kawashima, Y., Fujinami, D., Matsuoka, S., Kawano, M., Tanaka, K., Tsumura, H., Ishizaki, T., Narahara, H., Kohda, D., Nishida, Y., & Hanada, K. (2021). The benzylisoquinoline alkaloids, berberine and coptisine, act against camptothecin-resistant topoisomerase I mutants. *Scientific Reports*, 11, 7718. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87344-2>
- IRAC. (2014). Insecticide Resistance Action Committee. Susceptibility test method 032. <https://irac-online.org/methods/diaphorina-citri/>
- Jiang, H., Wang, J., Song, L., Cao, X., Yao, X., Tang, F. & Yue, Y. (2018). Chemical composition of an insecticidal extract from *Robinia pseudacacia* L. seeds and it's efficacy against aphids in oilseed rape. *Crop Protection*, 104, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.004>
- Jiménez-Reyes, M. F., Carrasco, H., Olea, A. F., & Silva-Moreno, E. (2019). Natural compounds: a sustainable alternative to the phytopathogens control. *Revista de La Sociedad Química de Chile*, 64(2), 4459–4465. <https://doi.org/10.4067/S0717-97072019000204459>
- Kosini, D., Nukenine, E. N., Agbor, G. A., Tchinda, A. T., Abdou, J. P., Yaya, J. A. G., & Kowa, T. K. (2021). Fractionated Extracts From *Gnidia kraussiana* (Malvales: Thymeleaceae) as Bioactive Phytochemicals for Effective Management of *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Chrysomelidae) in Stored *Vigna unguiculata* (Fabales: Fabaceae) Seeds. *Journal of Insect Science (Online)*, 21(1), 1–8. <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieab006>
- Koul, O., Dhaliwal, G. S., & Cuperus, G. W. (2004). Integrated pest management potential, constraints and challenges. CABI, Wallingford, p 336. <https://doi.org/10.1079/9780851996868.0001>
- Lee, E. J., Hagel, J. M., & Facchini, P. J. (2013). Role of the phloem in the biochemistry and ecophysiology of benzylisoquinoline alkaloid metabolism. *Frontiers in Plant Science*, 4, 1–7. <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00182>
- Lengai, G. M. W., Muthomi, J. W., & Mbega, E. R. (2020). Phytochemical activity and role of botanical pesticides in pest management for sustainable agricultural crop production. *Scientific African*, 7, e00239. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00239>
- Liscombe, D. K. & Facchini, P. J. (2008). Evolutionary and cellular webs in benzylisoquinoline alkaloid biosynthesis. *Current Opinion in Biotechnology*, 19(2), 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2008.02.012>
- Liu, J. & Wang, X. (2020). Tomato diseases and pests detection based on improved yolo V3 convolutional neural network. *Frontiers in Plant Science*, 11, 898. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00898>
- López-López, H., Beltrán-Beache, M., Ochoa-Fuentes, Y. M., Castro-del Ángel, E., Cerna-Chávez, E., & Delgado-Ortiz, J. C. (2022). Extracto metanólico de *Crotalaria longirostrata*: Identificación de metabolitos secundarios y su efecto insecticida. *Scientia Agropecuaria*, 13(1), 71-78. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.007>
- Manalil, S. & Chauhan, B. S. (2019). Interference of turnipweed (*Rapistrum rugosum*) and Mexican pricklepoppy (*Argemone mexicana*) in wheat. *Weed Science*, 67(6), 666-672. <https://doi.org/10.1017/wsc.2019.42>
- Marek, J., Dostál, J. & Slavík, J. (1998). Crystal structures of α - and β -allocryptopine. *Collection*

- of Czechoslovak Chemical Communications, 63, 416-424. <https://doi.org/10.1135/cccc19980416>
- Martínez-Delgado, A. A., Anda, J., León-Morales, J. M., Mateos-Díaz, J. C., Gutiérrez-Mora, A. & Castañeda-Nava, J. J. (2022). *Argemone* species: potential source of biofuel and high-value biological active compounds. *Environmental Engineering Research*, 27(2), 200619. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.619>
- Martínez-Tomás, S. H., Rodríguez-Hernández, C., Pérez-Pacheco, R., Granados-Echegoyen, C., Ortiz-Hernández, Y. D. & Floreán-Méndez, F. (2015). Evaluación de tres extractos vegetales en la población de mosca blanca en el cultivo orgánico de jitomate en invernadero. *Entomología Mexicana*, 2, 371-375. <http://acaentmex.org/entomologia/revista/2015/EA/PAG%20%20371-375.pdf>
- Matsuura, H. N. & Fett-Neto, A. G. (2015). Plant alkaloids: main features, toxicity, and mechanisms of action. *Plant Toxins* 2, 1-15. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6728-7_2-1
- Menéndez-Perdomo, I. M., & Facchini, P. J. (2018). Benzylisoquinoline alkaloids biosynthesis in Sacred lotus. *Molecules*, 23, 1–17. <https://doi.org/10.3390/molecules23112899>
- Miranda-Arámbula, M., Reyes-Chilpa, R. & Anaya, L. A. L. (2021). Phytotoxic activity of aqueous extracts of ruderal plants and its potential application to tomato crop. *Botanical Sciences*, 99(3), <https://doi.org/10.17129/BOTSCI.2727>
- More, N. V., Kharat, K. R. & Kharat, A. S. (2017). Berberine from *Argemone mexicana* L. exhibits a broad spectrum antibacterial activity. *Acta Biochimica Polonica*, 64, 653-660. https://doi.org/10.18388/abp.2017_1621
- Nigdelioglu-Dolanbay, S., Kocanci, G. F. & Aslim, B. (2021). Neuroprotective effects of allocryptopine-rich alkaloid extracts against oxidative stress-induced neuronal damage. *Biomedicine and Pharmacotherapy*, 140, 111690. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.111690>
- Páez-León, S. Y., Carrillo-Morales, M., Gómez-Rodríguez, O., López-Guillén, G., Castañeda-Ramírez, G. S., Hernández-Núñez, E., Wong-Villarreal, A. & Aguilar-Marcelino, L. (2022). Nematicidal activity of leaf extract of *Moringa oleifera* Lam. against *Haemonchus contortus* and *Nacobbus aberrans*. *Journal of Helminthology*, 96, 1-7. <https://doi.org/10.1017/S0022149X22000025>
- Quiroz-Carreño, S., Pastene-Navarrete, E., Espinoza-Pinochet, C., Muñoz-Núñez, E., Devotto-Moreno, L., Céspedes-Acuña, C. L. & Alarcón-Enos, J. (2020). Assessment of insecticidal activity of benzylisoquinoline alkaloids from Chilean Rhamnaceae plants against fruit fly *Drosophila melanogaster* and the lepidopteran crop pest *Cydia pomonella*. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 25(21), 5094. <https://doi.org/10.3390/molecules25215094>
- Ravi, R., Husna-Zulkarnin, N. S., Rozhan, N. N., Nik-Yusoff, N. R., Mat-Rasat, M. S., Ahmad, M. I., Hamzah, Z., Ishak, I. H. & Mohd-Amin, M. F. (2018). Evaluation of two different solvents for *Azolla pinnata* extracts on chemical compositions and larvicidal activity against *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae). *Journal of Chemistry*, 2018, 7453816. <https://doi.org/10.1155/2018/7453816>
- Romeh, A. A. (2013). Phytochemicals from *Ficus sycomorus* L. leaves act as insecticides and acaricides. *African Journal of Agricultural Research*, 8(27), 3571-3579. <https://doi.org/10.5897/ajar2013.7243>
- Roque-Enríquez, A., Delgado-Ortiz, J. C., Beltrán-Beache, M., Ochoa-Fuentes, Y. M. & Cerna-Chávez, E. (2021). Parámetros agronómicos del tomate (*Solanum lycopersicum* L.) inoculado con “*Candidatus Liberibacter solanacearum*” y tratados con fosfitos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8, e2552. <https://doi.org/10.19136/era.a8n1.2552>
- Rubio-Pina, J. & Vázquez-Flota, F. (2013). Pharmaceutical applications of the benzylisoquinoline alkaloids from *Argemone mexicana* L. *Current Topics in Medicinal Chemistry*, 13(17), 2200-

2207. <https://doi.org/10.2174/15680266113139990152>
- Sakai, T., Taira, Z., Kamigauchi, M., Iwasa, K. & Takao, N. (1988). Structure of allocryptopine. *Acta Crystallographica Section C Crystal Structure Communications*, 44, 838-840. <https://doi.org/10.1107/s010827018701240x>
- Sakthivadivel, M., Eapen, A. & Dash, A. P. (2012). Evaluation of toxicity of plant extracts against vector of *Lymphatic filariasis*, *Culex quinquefasciatus*. *Indian Journal of Medical Research*, 135(3), 397-400. https://journals.lww.com/ijmr/Fulltext/2012/35030/Evaluation_of_toxicity_of_plant_extracts_against.20.aspx
- Sandhanam, S. D., Pathalam, G., Antony, S., Samuel, R., Michael, G. P., Kedike, B., Pandikumar, P., Savarimuthu, I. & Al-Dhabi, N. A. (2019). Effect of tiliamosine, a bis, benzyloquinoline alkaloid isolated from *Tiliacora acuminata* (Lam.) Hook. f. & Thom on the immature stages of filarial mosquito *Culex quinquefasciatus* say (Diptera: Culicidae). *Experimental Parasitology*, 204, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.exppara.2019.107719>
- Statistical Analysis Systems (2002) SAS Version 9.1. SAS Institute Inc., Cary
- Schuler, M. A. (1996). The role of cytochrome P450 monooxygenases in plant-insect interactions. *Plant Physiology*, 112(4), 1411–1419. <https://doi.org/10.1104/pp.112.4.1411>
- Siatka, T., Adamcová, M., Opletal, L., Čahlíková, L., Jun, D., Hrabínová, M., Kuneš, J. & Chlebek, J. (2017). Cholinesterase and prolyl oligopeptidase inhibitory activities of alkaloids from *Argemone platyceras* (Papaveraceae). *Molecules* 22(7), 1-14. <https://doi.org/10.3390/molecules22071181>
- Simoës-Pires, C., Hostettmann, K., Haouala, A., Cuendet, M., Falquet, J., Graz, B. & Christen, P. (2014). Reverse pharmacology for developing an anti-malarial phytomedicine. The example of *Argemone mexicana*. *International Journal for Parasitology: Drugs and Drug Resistance*, 4(3), 338-346. <https://doi.org/10.1016/j.ijpddr.2014.07.001>
- Singh, R., Chaubey, N. & Mishra, R. K. (2021). Evaluation of anti-asthmatic activity of ethanolic extract of *Argemone mexicana* Stems. *Saudi Journal of Medical and Pharmaceutical Sciences*, 7, 39-44. <https://doi.org/10.36348/sjimps.2021.v07i01.007>
- Sumner, K. J. C., Highet, F., Arnsdorf, Y. M., Back, E., Carnegie, M., Madden, S., Carboni, S., Billaud, W., Lawrence, Z. & Kenyon, D. (2020). ‘*Candidatus Liberibacter solanacearum*’ distribution and diversity in Scotland and the characterization of novel haplotypes from *Craspedolepta* spp. (Psyllidae: Aphalaridae). *Scientific Reports*, 10, 16567. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73382-9>
- Takemura, T., Ikezawa, N., Iwasa, K. & Sato, F. (2013). Molecular cloning and characterization of a cytochrome P450 in sanguinarine biosynthesis from *Eschscholzia californica* cells. *Phytochemistry*, 91, 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2012.02.013>
- Tamburino, R., Sannino, L., Cafasso, D., Cantarella, C., Orrù, L., Cardi, T., Cozzolino, S., D’agostino, N. & Scotti, N. (2020). Cultivated tomato (*Solanum lycopersicum* L.) suffered a severe cytoplasmic bottleneck during domestication: Implications from chloroplast genomes. *Plants*, 9(11), 1443. <https://doi.org/10.3390/plants9111443>
- Tang, X. T., Longnecker, M. & Tamborindeguy, C. (2020). Acquisition and transmission of two ‘*Candidatus Liberibacter solanacearum*’ haplotypes by the tomato psyllid *Bactericera cockerelli*. *Scientific Reports*, 10, 14000. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70795-4>
- Tavares, W. R., Barreto, M. D. C., & Seca, A. M. L. (2021). Aqueous and ethanolic plant extracts as bio-insecticides— establishing a bridge between raw scientific data and practical reality. *Plants*, 10(5), 12–29. <https://doi.org/10.3390/plants10050920>
- Tembo, Y., Mkindi, A. G., Mkenda, P. A., Mpumi, N., Mwanauta, R., Stevenson, P. C., Ndakidemi, P. A. & Belmain, S. R. (2018). Pesticidal plant extracts improve yield and reduce insect pests on legume crops without harming beneficial arthropods. *Frontiers in Plant Science*, 9(1),

1425. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01425>
- Vacek, J., Walterová, D., Vrublová, E. & Šimánek, V. (2010). The chemical and biological properties of protopine and allocryptopine. *Heterocycles*, 81(8), 1773-1789. <https://doi.org/10.3987/REV-10-673>
- Xool-Tamayo, J., Tamayo-Ordoñez, Y., Monforte-González, M., Muñoz-Sánchez, J. A. & Vázquez-Flota, F. (2021). Alkaloid biosynthesis in the early stages of the germination of *Argemone mexicana* L. (Papaveraceae). *Plants* 10(10), 2226. <https://doi.org/10.3390/plants10102226>
- Yu, H., Chen, S., Zhou, X. & Wu, F. (2017). Root interactions and tomato growth in tomato/potato onion companion-cropping system under different phosphorus levels. *Journal of Plant Interactions* 12(1), 438-446. <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1392624>
- Zou, C. S., Wang, Y. J., Zou, H., Ding, N., Geng, N. N., Cao, C. W., & Zhang, G. C. (2019). Sanguinarine in *Chelidonium majus* induced antifeeding and larval lethality by suppressing food intake and digestive enzymes in *Lymantria dispar*. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 153, 9–16. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2018.10.003>