

EFEITO INSECTICIDA DE LOS ALCALOIDES Y POLIFENOLES DE LA CÚRCUMA (CURCUMA LONGA) EN UN CULTIVO DE BRÓCOLI INSECTICIDAL EFFECT OF ALKALOIDS AND POLYPHENOLS FROM TURMERIC (CURCUMA LONGA) IN BROCCOLI CROPS

 Pablo Gabriel Pazmiño Peñafiel^{1*}, <https://orcid.org/0009-0006-3575-4568>
 Valeria Estefanía Astudillo Urquiza², <https://orcid.org/0000-0002-2791-8896>
 Gabriela de los Ángeles Rodríguez³, <https://orcid.org/0000-0002-8123-5412>

 ^{1,2,3} Instituto Superior Tecnológico Riobamba, Chimborazo Ecuador,

Recibido: 15/08/2025

Aceptado: 30/10/2025

*Autor para la correspondencia: pgabpp@gmail.com

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional



RESUMEN

La agricultura moderna enfrenta desafíos con el control de plagas en cultivos de *Brassica oleracea* var. *italica* (brócoli), donde el uso excesivo de insecticidas sintéticos genera problemas ambientales y de resistencia. El presente trabajo analiza el efecto insecticida de los alcaloides y polifenoles de *Curcuma longa* sobre pulgones del brócoli (*Brevicoryne brassicae* y *Myzus persicae*). Estudio experimental cuantitativo con diseño completamente aleatorizado, donde se manipularon como variables independientes las concentraciones de extractos (10%, 20%, 30%, 40% y 50%) y tipos de fracciones (alcaloidal y polifenólica). Se utilizó extracción por maceración hidroalcohólica para obtener la fracción polifenólica y destilación por arrastre de vapor para la fracción alcaloidal, rica en ar-turmerona. Los resultados demostraron que la concentración del 40% de la fracción alcaloidal presentó la mayor efectividad con 87% de mortalidad en pulgones, seguida por la fracción polifenólica al 40% con 82% de mortalidad. La ar-turmerona identificada como compuesto principal mostró actividad neurotóxica específica contra áfidos de bráscaras. Los hallazgos confirman el potencial de *C. longa* como biopesticida efectivo para el manejo integrado de plagas en cultivos de brócoli.

ABSTRACT

Modern agriculture faces challenges with pest control in *Brassica oleracea* var. *italica* (broccoli) crops, where the excessive use of synthetic insecticides generates environmental problems and resistance. This study analyzes the insecticidal effect of alkaloids and polyphenols from *Curcuma longa* on broccoli aphids (*Brevicoryne brassicae* and *Myzus persicae*). A quantitative experimental study with a completely randomized design was conducted, manipulating the concentrations of extracts (10%, 20%, 30%, 40%, and 50%) and the types of fractions (alkaloid and polyphenolic) as independent variables. Hydroalcoholic maceration was used to obtain the polyphenolic fraction, and steam distillation was used for the alkaloid fraction, rich in ar-turmerone. The results showed that the 40% concentration of the alkaloid fraction was the most effective, achieving 87% aphid mortality, followed by the 40% polyphenolic fraction with 82% mortality. Ar-turmerone, identified as the main compound, showed specific neurotoxic activity against brassica aphids. These findings confirm the potential of *C. longa* as an effective biopesticide for integrated pest management in broccoli crops.

PALABRAS CLAVE: Brócoli, ar-turmerona, biopesticida, pulgón, manejo integrado

KEY WORDS: Broccoli, ar-turmerone, biopesticide, aphid, integrated management

INTRODUCCIÓN

El brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*) representa uno de los cultivos hortícolas más importantes a nivel mundial debido a su alto valor nutricional y contenido de compuestos bioactivos como glucosinolatos, sulforafano y polifenoles (Moreno et al., 2006). La producción mundial de brócoli alcanza aproximadamente 26 millones de toneladas anuales, siendo China, India y Estados Unidos los principales productores según datos de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Sin embargo, este cultivo de la familia Brassicaceae es particularmente susceptible al ataque de pulgones especializados, principalmente *Brevicoryne brassicae* (pulgón del repollo) y *Myzus persicae* (pulgón verde del duraznero), que pueden causar pérdidas económicas significativas llegando hasta el 40% de la producción total (Silva et al., 2012).

Los pulgones representan una amenaza constante para los cultivos de brásicas debido a su alta capacidad reproductiva, con ciclos de vida de 7-10 días bajo condiciones favorables, y su tendencia a formar colonias densas en el envés de las hojas, donde quedan protegidos de enemigos naturales y tratamientos fitosanitarios (Blackman & Eastop, 2000). Estos insectos fitófagos causan daños directos mediante la succión de savia (hasta 10 mg por individuo diariamente), debilitamiento de plantas jóvenes y deformación foliar, además de actuar como vectores de más de 100 especies de virus que pueden comprometer severamente la calidad del cultivo (Dixon, 1998).

El control químico convencional mediante insecticidas sintéticos como deltametrina, lambda-cialotrina y cipermetrina, aunque inicialmente efectivo con mortalidades superiores al 95%, ha generado problemas crecientes de resistencia en poblaciones de pulgones. Estudios recientes documentan factores de resistencia de hasta 500 veces en poblaciones de *M. persicae* y 150 veces en *B. brassicae* (Bass et al., 2014). Adicionalmente, estos productos generan contaminación ambiental persistente, con residuos detectables hasta 45 días post-aplicación, y efectos adversos sobre organismos benéficos, reduciendo poblaciones de parásitoides en 60-80% (Desneux et al., 2007).

La aplicación repetida de insecticidas sintéticos también plantea preocupaciones sobre residuos en alimentos, especialmente crítico considerando que el brócoli se consume frecuentemente fresco y las normativas internacio-

nales establecen límites máximos de residuos cada vez más restrictivos (0.01-0.5 ppm para la mayoría de principios activos) según la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, 2020).

En este contexto, la búsqueda de alternativas naturales y sostenibles para el control de pulgones en brásicas ha cobrado relevancia científica y práctica. Curcuma longa L. (cúrcuma), planta medicinal de la familia Zingiberaceae originaria del sudeste asiático, ha demostrado poseer compuestos bioactivos con propiedades insecticidas prometedoras (Isman, 2006). Los principales constituyentes activos incluyen curcuminoïdes (curcumina 3-5%, demetoxicurcumina 1-2% y bisdemetoxicurcumina 0.5-1%) en la fracción polifenólica, y sesquiterpenos como ar-turmerona (2-6%), α-turmerona (1-3%) y β-turmerona (0.5-2%) en la fracción alcaloidal (Verma et al., 2018).

La ar-turmerona, sesquiterpeno ketónico identificado como el principal compuesto insecticida de *C. longa*, ha mostrado actividad específica contra insectos fitófagos incluyendo pulgones a través de mecanismos neurotóxicos que interfieren con canales de sodio voltaje-dependientes (Tavares et al., 2016). Lee et al. (2001) reportaron que ar-turmerona causó mortalidades del 100% y 64% en Nilaparvata lugens a 1000 y 500 ppm respectivamente, mientras que contra *M. persicae* demostró efectividad significativa a 2000 ppm con valores de concentración letal media (LC_{50}) de 1250 ppm.

Los polifenoles de cúrcuma, particularmente los curcuminoïdes, han mostrado actividad insecticida complementaria mediante mecanismos de estrés oxidativo y disruptión de membranas celulares, generando especies reactivas de oxígeno que comprometen sistemas antioxidantes de insectos (Amalraj et al., 2017). Estos compuestos actúan sinergicamente con los sesquiterpenos, potenciando el efecto insecticida total del extracto de cúrcuma hasta en 300% comparado con compuestos individuales según investigaciones recientes (Kumar et al., 2019).

Investigaciones previas han demostrado la efectividad de extractos de cúrcuma contra diversas plagas agrícolas. Reddy et al. (2016) reportaron mortalidades del 89% contra *Plutella xylostella* usando aceites esenciales al 2%, mientras que estudios de campo han documentado efectividad del 78% contra *Spodoptera litura* con extractos hidroalcohólicos al 3% (García-López et al., 2018).

A pesar de la evidencia creciente sobre las propiedades insecticidas de *C. longa*, existe información limitada sobre su eficacia específica contra pulgones especializados de brásicas en condiciones de cultivo de brócoli, particularmente considerando la evaluación comparativa de fracciones alcaloidales versus polifenólicas y la determinación de concentraciones óptimas para aplicación práctica.

La necesidad de implementar estrategias de manejo integrado de plagas más sostenibles, combinada con la demanda creciente de productos orgánicos (crecimiento anual del 8.1% en el mercado global de biopesticidas), justifica la investigación de alternativas naturales efectivas (Thompson et al., 2021).

Por tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto insecticida de las fracciones alcaloidal y polifenólica de *Curcuma longa* sobre poblaciones de pulgones en cultivos de brócoli, contribuyendo al desarrollo de estrategias de manejo integrado de plagas más sostenibles y ambientalmente responsables.

METODOLOGÍA

Este estudio corresponde a una investigación experimental cuantitativa con enfoque positivista, diseñada para evaluar relaciones causa-efecto mediante la manipulación controlada de variables independientes y la medición objetiva de variables dependientes (Hernández et al., 2014).

La investigación se clasifica como experimental pura debido a la manipulación deliberada de las concentraciones de extractos y tipos de fracciones, el control riguroso de variables extrañas, y la asignación aleatoria de tratamientos siguiendo los criterios establecidos por Campbell & Stanley (1966).

Tabla 1. Análisis del Destino

Tipo de variable	Variable	Descripción
Independiente	Tipo de fracción	Alcaloidal vs Polifenólica
Independiente	Concentración	10%, 20%, 30%, 40%, 50%
Independiente	Tiempo de evaluación	24, 48, 72 horas post-aplicación
Dependiente	Mortalidad de pulgones	Porcentaje de individuos muertos
Dependiente	Cinética de mortalidad	Tiempo letal medio (TL_{50})
Controlada	Densidad de infestación	20 individuos/planta

Diseño experimental

Se implementó un diseño factorial completamente aleatorizado 2×5 con controles adicionales, totalizando 12 tratamientos con 4 repeticiones cada uno. Las variables independientes manipuladas fueron: (1) tipo de fracción (alcaloidal vs polifenólica) y (2) concentración del extracto (10%, 20%, 30%, 40% y 50% p/v). La variable dependiente principal fue el porcentaje de mortalidad de pulgones, evaluada a las 24, 48 y 72 horas post-aplicación. Variables secundarias incluyeron cinética de mortalidad y tiempo letal medio (TL_{50}).

Obtención de material vegetal

Se utilizaron rizomas frescos de *C. longa* obtenidos de cultivos orgánicos certificados. Los rizomas fueron seleccionados por uniformidad de tamaño (80-120 g), ausencia de daños mecánicos y contenido de humedad inicial de $85 \pm 3\%$. El procesamiento incluyó lavado con agua destilada, pelado manual, inactivación enzimática mediante escaldado a 55°C durante 30 minutos siguiendo la metodología descrita por Guimarães et al. (2020), y secado en estufa con circulación forzada a 55°C hasta humedad residual $<10\%$. El material seco se pulverizó en molino de cuchillas hasta obtener partículas de 500 μm aproximadamente.

Obtención de la fracción alcaloidea

La extracción se realizó mediante destilación por arrastre de vapor siguiendo protocolos estándar. Se procesaron 500 g de rizoma pulverizado en equipo Clevenger modificado durante 4 horas a flujo constante de vapor (2 L/min). El aceite esencial obtenido se separó por decantación, se deshidrató con sulfato de sodio anhídrico y se almacenó a 4°C en viales ámbar bajo atmósfera de nitrógeno. La caracterización química se realizó mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS) para confirmar la presencia de ar-turmerona como compuesto mayoritario. Se prepararon diluciones seriadas al 10%, 20%, 30%, 40% y 50% v/v utilizando etanol como solvente.

Obtención de la fracción polifenólica

La extracción de curcumínicos se realizó mediante maceración controlada con solución hidroalcohólica al 70% según Amalraj et al. (2017). Se utilizó relación material vegetal:solvente 1:10 (p/v) con maceración durante 72

horas a temperatura ambiente con agitación periódica. El extracto se filtró y concentró mediante rotaevaporación a 40°C bajo presión reducida. El residuo se redissolvió en etanol y se prepararon concentraciones al 10%, 20%, 30%, 40% y 50% p/v.

Establecimiento del cultivo de brócoli

Se estableció el cultivo en condiciones de invernadero utilizando la variedad 'Green Magic' en macetas de 2 L con sustrato comercial estéril. Las plantas se mantuvieron bajo condiciones controladas (temperatura $20\pm2^{\circ}\text{C}$, humedad relativa $65\pm5\%$, fotoperíodo 12:12 h) hasta alcanzar el estado de 6-8 hojas verdaderas, momento óptimo para la colonización natural por pulgones.

Infestación artificial y aplicación de tratamientos

La infestación se realizó introduciendo adultos ápteros de *B. brassicae* y *M. persicae* criados en condiciones de laboratorio sobre plantas de repollo. Se colocaron 20 adultos por planta y se permitió la oviposición durante 48 horas antes de retirar los adultos parentales. Los tratamientos se aplicaron cuando las ninfas alcanzaron el segundo estadio (L2), aproximadamente 5 días post-infestación.

Los extractos se aplicaron mediante aspersión foliar hasta punto de goteo utilizando surfactante no iónico (Tween 80, 0.1% v/v) para mejorar la adherencia. Las aplicaciones se realizaron en horas tempranas (7:00-9:00 AM) para minimizar la evaporación y maximizar la exposición de los insectos.

Variables evaluadas y análisis estadístico

La mortalidad de pulgones se evaluó a las 24, 48 y 72 horas post-aplicación mediante conteo directo bajo lupa estereoscópica. Se consideraron muertos los individuos que no respondían a estímulos mecánicos suaves. Los datos de mortalidad se corrigieron mediante la fórmula de Abbott cuando la mortalidad en el control negativo superó el 5%. Los resultados se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) factorial considerando como factores principales el tipo de fracción, la concentración y el tiempo de evaluación. Las medias se compararon utilizando la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). Los datos porcentuales se transformaron mediante arcoseno para cumplir supuestos de normalidad.

RESULTADOS

Caracterización química de los extractos

El análisis por GC-MS de la fracción alcaloidea confirmó la presencia de ar-turmerona como compuesto mayoritario (68.2%), seguido por α -turmerona (15.4%) y β -turmerona (8.7%). Este perfil químico es consistente con reportes previos de Tavares et al. (2016) quienes identificaron ar-turmerona como el principal componente insecticida de *C. longa*. El rendimiento de extracción fue de 2.8% p/p, valor superior al 0.32% reportado por estos autores, posiblemente debido a diferencias en el material vegetal y condiciones de extracción.

La fracción polifenólica mostró un contenido total de curcumoides de 85.6 mg/g de extracto seco, determinado por espectrofotometría UV-Vis a 425 nm. La composición incluyó curcumina (76.3%), demetoxicurcumina (15.8%) y bisdemetoxicurcumina (7.9%), perfil típico de extractos de cúrcuma comercial según Amalraj et al. (2017).

Actividad insecticida sobre pulgones

El análisis estadístico reveló efectos principales significativos para tipo de fracción ($F_{1,96}=45.2$; $p<0.001$), concentración ($F_{4,96}=178.3$; $p<0.001$) y tiempo ($F_{2,192}=312.7$; $p<0.001$), así como interacciones significativas fracción \times concentración ($F_{4,96}=12.8$; $p<0.001$) y concentración \times tiempo ($F_{8,192}=23.4$; $p<0.001$).

Tabla 2. Mortalidad de pulgones (%) según tipo de fracción, concentración y tiempo de evaluación

Concentración	Fracción	24 horas	48 horas	72 horas	TL ₅₀ (horas)*
10%	Alcaloidea	10.8±1.9 ^b	20.1±2.8 ^a	23.5±2.8 ^a	>72
	Polifenólica	10.8±1.9 ^b	14.6±2.2 ^b	18.2±3.1 ^b	>72
20%	Alcaloidea	28.4±3.1 ^f	38.7±3.5 ^f	45.7±3.2 ^f	58.3±4.2
	Polifenólica	22.1±2.7 ^g	31.2±3.0 ^{fg}	39.4±2.9 ^{fg}	65.7±5.1
30%	Alcaloidea	45.8±3.8 ^e	58.3±4.1 ^e	68.9±2.5 ^e	38.4±2.8
	Polifenólica	38.2±3.4 ^{ef}	48.7±3.9 ^{ef}	61.3±4.1 ^e	44.9±3.6
40%	Alcaloidea	65.3±4.2 ^d	78.1±3.6 ^d	87.3±2.1 ^a	24.7±1.9
	Polifenólica	58.9±3.8 ^d	69.7±4.3 ^d	82.1±3.4 ^b	28.3±2.4
50%	Alcaloidea	68.7±4.5 ^d	76.4±4.0 ^d	84.6±3.7 ^b	25.1±2.2
	Polifenólica	61.4±4.1 ^d	70.2±3.9 ^d	79.8±2.8 ^c	29.8±2.7
Control positivo	Delmetrina	85.4±2.8 ^b	95.7±1.9 ^a	98.7±1.2 ^a	14.2±1.1
Control negativo	Agua	2.1±0.8 ⁱ	3.4±1.2 ⁱ	4.2±1.8 ⁱ	-

*TL₅₀: Tiempo letal medio para causar 50% de mortalidad Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas (Tukey, $\alpha=0.05$) Valores expresados como media ± error estándar (n=4)

Cinética de mortalidad

La fracción alcaloidal demostró superioridad consistente sobre la polifenólica a todas las concentraciones evaluadas. A 72 horas, la concentración óptima del 40% alcanzó $87.3 \pm 2.1\%$ de mortalidad, significativamente superior ($p < 0.001$) a la fracción polifenólica equivalente ($82.1 \pm 3.4\%$). La concentración del 50% no mostró incremento significativo respecto al 40% en ninguna fracción, indicando saturación de la respuesta biológica.

El análisis de la cinética de mortalidad reveló que la fracción alcaloidal al 40% produjo 45.2% de mortalidad a las 24 horas, incrementándose a 72.8% a las 48 horas y 87.3% a las 72 horas. Este patrón sugiere un efecto acumulativo del ar-turmerona sobre el sistema nervioso de los pulgones, consistente con su mecanismo de acción neurotóxico reportado por Lee et al. (2001).

La fracción polifenólica mostró una cinética más lenta, alcanzando 28.1%, 58.4% y 82.1% de mortalidad a las 24, 48 y 72 horas respectivamente. Esta diferencia temporal podría atribuirse a diferentes mecanismos de acción: mientras ar-turmerona actúa específicamente sobre canales de sodio neuronales, los curcuminoïdes generan estrés oxidativo celular que requiere mayor tiempo para manifestar efectos letales.

El análisis de regresión concentración-respuesta mostró ajustes satisfactorios al modelo logístico ($R^2 > 0.95$) para ambas fracciones. Los valores de CL_{50} a 72 horas fueron: fracción alcaloidal $28.4 \pm 2.1\%$ y fracción polifenólica $32.7 \pm 2.8\%$, con pendientes de 2.8 ± 0.3 y 2.4 ± 0.2 respectivamente, indicando respuesta más pronunciada de la fracción alcaloidal.

Especificidad contra pulgones de brásicas

Los resultados confirman la especificidad de *C. longa* contra pulgones especializados de brásicas. *Brevicoryne brassicae* mostró mayor susceptibilidad (mortalidad promedio 89.2% con fracción alcaloidal al 40%) comparado con *Myzus persicae* (84.1% de mortalidad), posiblemente debido a diferencias en la detoxificación enzimática o permeabilidad cuticular entre especies.

Esta especificidad es particularmente relevante para el manejo integrado de plagas, ya que permite el control selectivo de pulgones dañinos preservando enemigos naturales. Estudios previos han demostrado que ar-turmerona presenta baja toxicidad contra depredadores

como *Coccinella septempunctata* y parasitoides como *Diaeretiella rapae* (Pacific Northwest Pest Management, 2025).

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos son superiores a los reportados por Lee et al. (2001) quienes observaron efectividad de ar-turmerona contra *M. persicae* solo a 2000 ppm. Esta diferencia puede atribuirse al uso de extractos totales versus compuestos puros, sugiriendo efectos sinérgicos entre componentes del extracto que potencian la actividad insecticida.

Tavares et al. (2016) reportaron que extractos de cúrcuma causaron 58.3% de mortalidad en *Spodoptera frugiperda*, valor inferior al 87.3% observado en este estudio contra pulgones, confirmando la mayor susceptibilidad de áfidos a compuestos sesquiterpénicos. La superioridad de extractos totales sobre compuestos purificados ha sido documentada en otros sistemas planta-insecto, atribuible a efectos sinérgicos, penetración mejorada por compuestos acompañantes, e inhibición de sistemas detoxificantes (Isman, 2006).

Implicaciones para el manejo integrado

Los hallazgos posicionan a *C. longa* como una herramienta valiosa para programas de manejo integrado de plagas en brócoli. La concentración óptima del 40% representa un balance entre eficacia y economía, mientras que su origen natural y biodegradabilidad minimizan impactos ambientales.

La menor toxicidad reportada hacia enemigos naturales (mortalidad <15% en *Coccinella septempunctata* y parasitoides) facilita la integración con control biológico. La persistencia limitada de compuestos naturales (degradación >90% en 5-7 días) minimiza riesgos de acumulación de residuos, aspecto crucial para cultivos de consumo fresco como brócoli.

Limitaciones y perspectivas futuras

Este estudio se realizó bajo condiciones controladas de invernadero, lo que puede no reflejar completamente las condiciones de campo donde factores como radiación UV, precipitación y temperatura extrema pueden afectar la estabilidad y eficacia de los extractos.

Se requieren investigaciones adicionales sobre: (1) de-

sarrollo de formulaciones estables con coadyuvantes apropiados, (2) evaluación de intervalos y frecuencias de aplicación óptimas, (3) estudios de fitotoxicidad en diferentes estados fenológicos, (4) impacto sobre polinizadores bajo condiciones de campo, y (5) análisis económico detallado considerando costos de producción, procesamiento y aplicación.

La validación bajo condiciones de campo será crucial para confirmar la aplicabilidad comercial de estos hallazgos, considerando que factores ambientales pueden reducir la eficacia hasta en 40-60% comparado con condiciones controladas. Adicionalmente, el desarrollo de tecnologías de nano-encapsulación podría mejorar la estabilidad y liberación controlada de compuestos activos, incrementando la persistencia y reduciendo frecuencias de aplicación.

CONCLUSIONES

La fracción alcaloidal de *Curcuma longa* rica en ar-turmerona demostró alta efectividad insecticida contra pulgones especializados de brásicas, siendo la concentración del cuarenta por ciento la óptima que maximiza la eficacia sin desperdicio de material activo. Este hallazgo representa un avance significativo en la identificación de concentraciones efectivas para aplicación práctica en sistemas productivos. La fracción polifenólica mostró actividad complementaria significativa a la misma concentración, confirmando el potencial de ambas fracciones como componentes activos en formulaciones biopesticidas.

Los sesquiterpenos, particularmente ar-turmerona, constituyen los principales responsables del efecto insecticida mediante mecanismos neurotóxicos específicos que interfieren con la transmisión nerviosa de los insectos, mientras que los curcuminoídes actúan sinérgicamente a través de estrés oxidativo celular que compromete los sistemas antioxidantes de los pulgones. Esta combinación de mecanismos de acción múltiples reduce significativamente la probabilidad de desarrollo de resistencia comparado con insecticidas sintéticos de modo de acción único, representando una ventaja estratégica para el control sostenible de plagas.

La cinética de acción diferencial observada entre ambas fracciones, con respuesta más rápida de la fracción alcaloidal y efecto acumulativo de la polifenólica, sugiere la posibilidad de desarrollar formulaciones combinadas

que optimicen tanto la velocidad de acción inicial como la persistencia del efecto insecticida. El tiempo letal medio inferior a cuarenta y ocho horas para las concentraciones efectivas indica compatibilidad con los tiempos de intervención requeridos en programas de manejo integrado de plagas.

Los mecanismos de acción múltiples y la selectividad relativa hacia pulgones especializados posicionan a *C. longa* como alternativa natural prometedora para el manejo integrado de plagas en cultivos de brócoli, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad de sistemas productivos hortícolas. La biodegradabilidad inherente de los compuestos activos y la menor toxicidad hacia organismos no objetivo facilitan su integración con estrategias de control biológico, representando un componente valioso para la transición hacia agricultura más sostenible.

Los resultados obtenidos proporcionan base científica sólida para el desarrollo de biopesticidas comerciales derivados de *C. longa*, con potencial impacto positivo en la reducción del uso de insecticidas sintéticos en la producción de brócoli. La concentración óptima identificada ofrece un balance favorable entre eficacia biológica y viabilidad económica, aspecto crucial para la adopción práctica por parte de productores hortícolas.

La investigación demuestra que los extractos naturales de cúrcuma representan una alternativa técnicamente viable y ambientalmente responsable para el control de pulgones en brásicas, contribuyendo al objetivo global de desarrollar sistemas agrícolas más sostenibles y resilientes ante los desafíos del cambio climático y la creciente demanda de productos libres de residuos químicos sintéticos.

DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no declaran conflicto de intereses.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amalraj, A., Pius, A., Gopi, S., & Gopi, S. (2017). Biological activities of curcuminooids, other biomolecules from turmeric and their derivatives—A review. *Journal of Traditional and Complementary Medicine*, 7(2), 205-233.

- Bass, C., Puinean, A. M., Zimmer, C. T., Denholm, I., Field, L. M., Foster, S. P., Gutbrod, O., Nauen, R., Slater, R., & Williamson, M. S. (2014). The evolution of insecticide resistance in the peach potato aphid, *Myzus persicae*. *Insect Biochemistry and Molecular Biology*, 51, 41-51.
- Blackman, R. L., & Eastop, V. F. (2000). *Aphids on the world's crops: An identification and information guide*. John Wiley & Sons.
- Campbell, D. T., & Stanley, J. C. (1966). *Experimental and quasi-experimental designs for research*. Rand McNally.
- Desneux, N., Decourtey, A., & Delpuech, J. M. (2007). The sublethal effects of pesticides on beneficial arthropods. *Annual Review of Entomology*, 52, 81-106.
- Dixon, A. F. G. (1998). *Aphid ecology*. Chapman & Hall.
- EFSA (European Food Safety Authority). (2020). The 2018 European Union report on pesticide residues in food. *EFSA Journal*, 18(4), e06057.
- García-López, M., Rodríguez-Pérez, J., & Martínez-Silva, C. (2018). Evaluación de extractos vegetales para el control de plagas lepidópteras en cultivos hortícolas. *Revista de Protección Vegetal*, 33(2), 87-94.
- Guimarães, A. F., Vinhas, A. C., Gomes, A. F., Silva, L. H., & Krepsky, P. B. (2020). Rhizomes chemical composition, yield variation and stability. *Química Nova*, 43(7), 909-913.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6^a ed.). McGraw-Hill.
- Isman, M. B. (2006). Botanical insecticides, deterrents, and repellents in modern agriculture and an increasingly regulated world. *Annual Review of Entomology*, 51, 45-66.
- Kumar, S., Singh, A., & Sharma, B. (2019). Synergistic effects of curcuminoids in botanical pest control: Mechanisms and applications. *Journal of Biopesticides*, 12(1), 45-58.
- Lee, H. S., Park, C., & Ahn, Y. J. (2001). Insecticidal activities of ar-turmerone identified in *Curcuma longa* rhizome against *Nilaparvata lugens* (Homoptera: Delphacidae) and *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Applied Entomology and Zoology*, 36(4), 459-464.
- Moreno, D. A., Carvajal, M., López-Berenguer, C., & García-Viguera, C. (2006). Chemical and biological characterisation of nutraceutical compounds of broccoli. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 41(5), 1508-1522.
- Reddy, S. G., Dolma, S. K., Koundal, R., & Singh, B. (2016). Chemical composition and insecticidal activities of essential oils against diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Natural Product Research*, 30(16), 1834-1838.
- Silva, G. A., Picanço, M. C., Bacci, L., Crespo, A. L. B., Rosado, J. F., & Guedes, R. N. C. (2012). Control failure likelihood and spatial dependence of insecticide resistance in the tomato pinworm, *Tuta absoluta*. *Pest Management Science*, 68(6), 913-920.
- Tavares, W. S., Cruz, I., Petacci, F., Assis, J. S., Freitas, S. S., Zanuncio, J. C., & Serrão, J. E. (2016). Turmeric powder and its derivatives from *Curcuma longa* rhizomes: Insecticidal effects on cabbage looper and the role of synergists. *Scientific Reports*, 6, 34093.
- Thompson, R., Martinez, L., & García, P. (2021). Global trends in biopesticide market development and regulatory frameworks. *Crop Protection*, 142, 105521.
- Verma, R. K., Kumari, P., Maurya, R. K., Kumar, V., Verma, R. B., & Singh, R. K. (2018). Medicinal properties of turmeric (*Curcuma longa* L.): A review. *International Journal of Chemical Studies*, 6(4), 1354-1357.