

ESTIMACIÓN DEL RIESGO A LA SALUD POR EXPOSICIÓN LABORAL A PESTICIDAS UTILIZADOS EN EL CONTROL DE VECTORES EN MÉXICO

Estimation of the health risk due to occupational exposure to pesticides used in vector control in Mexico

Alejandra Sarahí HERNÁNDEZ-LOZADA¹, Juan Carlos GAYTÁN-OYARZÚN^{1*},
Marco Antonio SÁNCHEZ-OLIVARES² y Maritza LÓPEZ-HERRERA¹

¹ Área Académica de Biología, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, km 4.5 Carretera Pachuca-Tulancingo, Carboneras, 42184 El Álamo, Hidalgo, México.

² Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Veracruzana, km 7.5 Carretera Tuxpan-Tampico, 92870 Tuxpan, Veracruz, México.

*Autor para correspondencia: jcgaytan@uaeh.edu.mx

(Recibido: junio 2025; aceptado: enero 2026)

Palabras clave: evaluación de riesgos, pesticidas, exposición ocupacional, control de vectores.

RESUMEN

El uso de pesticidas en México se ha promovido ampliamente para el control y combate de vectores que transmiten enfermedades víricas como chikungunya, dengue, paludismo y zika, que actualmente constituyen un problema de salud pública en el país, siendo el sector laboral dedicado a la aplicación de estos productos la población más expuesta. En el presente estudio se estimó el riesgo para la salud por exposición ocupacional a los principales pesticidas utilizados para el control de vectores de enfermedades, recomendados por el Centro Nacional de Programas Preventivos y Control de Enfermedades (CENAPRECE) y potencialmente tóxicos para los seres humanos (bifentrina, pirimifos-metil y bendiocarb). Para ello, se identificaron sus posibles efectos sobre la salud considerando su potencial tóxico (pT) y neurotóxico (pNe), así como la dosis de exposición estimada (DEE) en el ámbito laboral, de acuerdo con los años de exposición. Se determinaron el riesgo no cancerígeno individual (HQi) y el índice de riesgo (HI). Se encontró que el bendiocarb presentó los valores más altos de riesgo de efectos no cancerígenos sobre la salud ($HQ > 1$ = riesgo alto), con incrementos significativos de 1.35, 2.7 y 4.1 conforme aumentaron los años de exposición laboral (5, 10 y 15 años, respectivamente). Por su parte, la bifentrina y el pirimifos metil mostraron incrementos proporcionales al tiempo de exposición laboral, pero con valores de $HQ < 1$ (bajo riesgo). Por lo tanto, el bendiocarb es el pesticida que representa la mayor preocupación para la salud. Sin embargo, no se deben descartar los otros dos compuestos, ya que puede haber un riesgo acumulado. Esto se debe a que los tres pesticidas pueden afectar el mismo órgano o sistema de órganos.

Key words: risk assessment, pesticides, occupational exposure, vector control.

ABSTRACT

The use of pesticides in Mexico has been widely promoted for the control and combat of vectors that transmit viral diseases such as chikungunya, dengue, malaria, and Zika, which are currently a public health problem in Mexico, with the labor sector being the

most exposed population. Therefore, in the present study, the health risk was estimated for occupational exposure times to the main pesticides used for disease vector control recommended by the National Center for Preventive Programs and Disease Control (CENAPRECE, for its Spanish acronym), which were potentially toxic to humans (bifenthrin, pirimiphos-methyl, and bendiocarb). For this purpose, the possible health effects were identified through their toxic potential (pT), neurotoxic potential (pNe), and the estimated exposure dose (EED) in an occupational setting by years of exposure. The individual non-carcinogenic risk (HQi) and a risk index (HI) were determined. Bendiocarb was found to have higher values for the risk of non-cancer health effects ($HQ > 1$ = high risk), with a significant increase of 1.35, 2.7 and 4.1 as the years of occupational exposure increased (5, 10 and 15 years, respectively), while bifenthrin and pirimiphos-methyl showed the same increase through the years of exposure, but with values of $HQ < 1$ (low risk). Thus, bendiocarb is the pesticide of greatest health concern; however, the other two compounds should not be discarded, as there may be a cumulative risk (HI) since all three compounds may affect the same target organ or organ system.

INTRODUCCIÓN

En México, el Programa de Enfermedades Transmitidas por Vectores tiene como objetivo reducir la incidencia de estas enfermedades (transmitidas principalmente por mosquitos y otros insectos), como el dengue, el paludismo y la chikungunya. Este programa, coordinado por la Secretaría de Salud a través del Centro Nacional de Programas Preventivos y Control de Enfermedades (CENAPRECE), emplea diversas estrategias, entre ellas el uso de pesticidas, aplicados por brigadas de trabajadores especializados en la fumigación de áreas de riesgo. Esta labor debe llevarse a cabo conforme a los lineamientos internacionales, lo que implica un proceso racional de toma de decisiones para optimizar el uso de los recursos disponibles en esta intervención estratégica, con el fin de mejorar la eficiencia, la solidez ecológica y la sostenibilidad de las medidas de control de enfermedades transmitidas por vectores, incluida la gestión eficaz de los plaguicidas (WHO 2018).

Estos compuestos pueden absorberse por inhalación, ingestión y absorción dérmica, lo que puede ocasionar intoxicaciones agudas, sobre todo en ambientes laborales en los que la exposición se produce a concentraciones más altas y durante tiempos más prolongados que en el caso de la población en general. Las actividades laborales involucradas en la producción, formulación, transporte, mezcla, aplicación y desecho de plaguicidas implican contacto directo con ellos, de manera que los empleados del programa mencionado en México pertenecen a una población especialmente vulnerable a sus efectos tóxicos. Además del riesgo de intoxicación aguda, lo anterior puede relacionarse con efectos a mediano y largo plazo, como trastornos respiratorios, problemas

neurológicos, trastornos hormonales y efectos teratogénicos, mutagénicos e incluso carcinogénicos (Sunta 2021, Ocotzi-Elías et al. 2022).

Aunque en México existen regulaciones y se controla la aplicación de estos productos, persiste una falta de información precisa sobre los niveles de exposición y los riesgos asociados a los pesticidas utilizados en el control de vectores en diversas regiones del país. Un estudio realizado por Ocotzi-Elías et al. (2022) subrayó la necesidad de monitorear y evaluar regularmente la exposición en trabajadores de los sectores agrícola y de la salud, ya que la prevalencia de enfermedades relacionadas con insectos vectores es notablemente alta en áreas rurales de México y el uso de pesticidas es una estrategia común para su control; por lo tanto, su exposición laboral se ha incrementado con los años (Valencia-Quintana et al. 2023). Este panorama pone de manifiesto la necesidad de realizar estudios exhaustivos que permitan estimar el riesgo para la salud de los trabajadores expuestos y establecer medidas preventivas que aseguren su bienestar y el de la comunidad en general. Por ello, el objetivo del presente estudio fue analizar la peligrosidad y posibles riesgos a la salud por exposición a tres de los principales pesticidas usados para el control de vectores de enfermedades humanas en México, y estimar el potencial incremento de riesgo a la salud por tiempos de exposición laboral.

MATERIALES Y MÉTODOS

Evaluación de riesgos para la salud asociados a la exposición por pesticidas

Para determinar la peligrosidad y los posibles riesgos para la salud asociados al uso de pesticidas

empleados en el control de insectos transmisores de enfermedades humanas, se revisó el listado oficial de productos recomendados por el CENAPRECE (2023). A partir de este documento, se seleccionaron los tres plaguicidas más recomendados por dicha institución para su análisis. Asimismo, la selección se basó en indicadores toxicológicos integrados de carcinogenicidad: potencial tóxico molar (pT), potencial carcinogénico (pCa), potencial neurotóxico (pNe) y clasificación por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, por su sigla en inglés). Estos indicadores se utilizaron como criterio de priorización para decidir qué sustancias incluir en la evaluación de riesgos, junto con especialistas en toxicología. Los compuestos seleccionados se clasificaron con base en su concentración letal media (CL_{50}), su nivel de peligrosidad según la clasificación recomendada por la Organización Mundial de la Salud (WHO 2019) y su pT, propuesto por Degrossi (2013). En cuanto a su capacidad de daño, se consideraron su pCa de acuerdo con la clasificación de la IARC (2018) y su pNe de la Agencia de Protección Ambiental de los EUA (Vela et al. 2003, USEPA 2011).

Se determinó la pT mediante la relación dosis-efecto. Este enfoque se fundamenta en el valor de la dosis letal media (DL_{50}), dado que la respuesta biológica a un agente químico es proporcional al logaritmo de la dosis administrada. El cálculo de pT permite estimar la capacidad de una sustancia para producir un efecto biológico, considerando tanto su potencial tóxico como su peso molecular. De acuerdo con Degrossi (2013), los compuestos con pT elevado tienen mayor probabilidad de producir efectos adversos en los organismos expuestos.

El pT se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$pT = -\log T \quad (1)$$

donde pT presenta la inversa del logaritmo en base 10 de la dosis de una sustancia, y T se deriva a partir de la DL_{50} oral en ratas, ajustada por el peso molecular, de acuerdo con la fórmula:

$$T = \frac{DL_{50} / 1000}{\text{peso molecular}} \quad (2)$$

Los valores de potencial de pT se interpretan de la siguiente manera: un pT entre 0 y 5 se considera de baja toxicidad, un rango de 5 a 10 corresponde a toxicidad media, mientras que valores superiores a 10 indican un potencial de toxicidad alto (Degrossi 2013, Sánchez-Olivares et al. 2021).

De acuerdo con Degrossi (2013), un valor de $pT=0$ corresponde a una dosis letal equivalente a 1 mol/kg.

En este sentido, valores de $pT=1, 2$ y 3 se interpretan como dosis letales de 0.1, 0.01 y 0.001 mol/kg, respectivamente. Esto significa que cada incremento de una unidad de pT implica un aumento de la toxicidad de un orden de magnitud; es decir, las sustancias con pT de 1, 2 y 3 resultan 10, 100 y 1000 veces más tóxicas que aquellas cuyo pT es 0.

Para determinar la capacidad de daño a la salud, se identificó para cada pesticida su carcinogenicidad con base en la clasificación de la IARC (2018): Grupo 1: carcinógenos para los humanos; Grupo 2A: probablemente carcinógenos para los humanos; Grupo 2B: posiblemente carcinógenos para los humanos; Grupo 3: no clasificable como carcinógeno para los humanos; Grupo 4: probablemente no carcinógeno para los humanos.

Asimismo, se identificó para cada pesticida su capacidad neurotóxica, con base en el listado y clasificación de agentes neurotóxicos reportado por Vela et al. (2023): Nivel 4, alteraciones morfológicas en las células del sistema nervioso central (SNC) o periférico (SNP); Nivel 3, alteraciones fisiológicas identificables (tales como mielopatías o alteraciones en los órganos sensoriales); Nivel 2, alteraciones bioquímicas mensurables (por ejemplo, en el nivel de neurotransmisores o en la actividad de enzimas); Nivel 1, neurotóxicos causantes de alteraciones clínicas inespecíficas sin identificación de las bases biológicas implicadas (por ejemplo narcosis, irritabilidad, euforia, descoordinación de movimientos, entre otros).

Para establecer la exposición a los pesticidas, se determinó la dosis de exposición estimada inhalatoria (DEE) en un ámbito laboral por compuesto y duración de exposición laboral evaluada (5, 10 y 15 años), conforme a la siguiente fórmula (Degrossi 2013):

$$DEE = \frac{Ce * Ti * ED * F}{(PCo * AT)} \quad (3)$$

donde DEE corresponde a la dosis de exposición estimada (mg/kg/día); Ce es la concentración de exposición al contaminante (mg/kg o mg/l); Ti es la tasa de inhalación; ED es la duración de la exposición, entendida como el número de días durante los cuales el trabajador está expuesto al contaminante dentro de una jornada laboral; F corresponde a la frecuencia de exposición (días/año); PCo es el peso corporal del individuo (kg); y AT se refiere al tiempo total de exposición expresado en años, es decir, el periodo acumulado a lo largo de la vida laboral en el que el trabajador ha estado en contacto con el contaminante. Para este estudio se consideraron tres grupos laborales diferenciados por los años de

exposición acumulada a pesticidas: 5, 10 y 15 años, de acuerdo con lo reportado por la Secretaría de Salud (SSA 2016) y Morales-Galindo et al. (2023). El riesgo a la salud no cancerígeno individual se estimó conforme al cociente de peligro (hazard quotient, HQ_i), mediante la siguiente fórmula por compuesto y temporalidad de exposición evaluada:

$$HQ_i = DEE / RfD \quad (4)$$

donde DEE corresponde a la dosis de exposición estimada y RfD a la dosis de referencia a la cual no se debe manifestar un efecto biológico ante una exposición. En este caso, el valor de RfD corresponde al valor de la ingesta diaria admisible (acceptable daily intake, ADI), la cual se obtuvo conforme a lo reportado por la Reunión Conjunta sobre Residuos de Pesticidas (JMPR, por su sigla en inglés) de la FAO (FAO/WHO 2016), expresado sobre la base del peso corporal, y se refiere a la cantidad que se puede ingerir todos los días de la vida sin riesgos apreciables.

Si HQ_i tiene un valor > 1 , existe una alta probabilidad de que se exprese un efecto nocivo no cancerígeno para la salud humana; si HQ_i tiene un valor ≤ 1 , existe una baja probabilidad de que se exprese un efecto nocivo no cancerígeno para la salud humana (CM 2004).

En el caso de exposiciones múltiples a agentes químicos peligrosos (AQP) que afectan el mismo órgano objetivo o sistema de órganos, se determina el índice de riesgo (hazard index, HI) (USEPA 2005, Gerba 2019), conforme a la siguiente fórmula:

$$HI = \sum HQ_i \quad (5)$$

donde HI es la sumatoria de los HQ_i de cada AQP evaluado, lo que se interpreta de la siguiente forma: si el valor de HI es < 1 , se considera que el riesgo es bajo; cuando es de 1-3 se refiere a un riesgo medio; si el valor es de 4-10 se trata de un riesgo medio alto; y cuando es mayor de 10 se refiere a un riesgo alto (USEPA 2005, Gerba 2019).

RESULTADOS

En este estudio se identificaron tres pesticidas de interés toxicológico: bifentrina, bendiocarb y pirimifos-metil, los cuales fueron seleccionados por ser los más utilizados para el control de insectos vectores de enfermedades humanas en México y por encontrarse dentro del listado de productos recomendados para el combate de dichos vectores publicado en febrero

de 2023 por el CENAPRECE, además de poseer capacidad tóxica y neurotóxica.

Estos pesticidas presentan una DL_{50} de 50 a 500 mg/kg, y pertenecen a la Clase II (moderadamente peligrosos) de la clasificación establecida por la OMS (2019) relativa al peligro agudo que representan (**Cuadro I**). Cuanto menor es el valor de la DL_{50} , mayor es la toxicidad del compuesto; es decir, se requiere una dosis menor para producir un efecto letal en el 50 % de los organismos expuestos, lo que indica que el pesticida es más peligroso (FAO/WHO 2017). Es necesario tener presente que la clasificación se refiere a la toxicidad de la formulación completa del producto envasado para su uso, incluyendo solventes o vehículos, y no solo al principio activo (OMS 2019).

Toxicidad y neurotoxicidad

Conforme a la evaluación dosis-efecto, determinada mediante el pT, el pCa y el pNe de los pesticidas (bifentrina, bendiocarb y pirimifos-metil), se puede observar en el **cuadro I** que los tres compuestos tienen un potencial de toxicidad bajo del orden de 0.0001 mol/kg, mientras que la OMS (2019) los considera dentro de la categoría de toxicidad moderada (Sánchez-González et al. 2016), lo cual muestra una pequeña discrepancia, aunque la OMS y la ATSDR los clasifican como poco peligrosos (toxicidad baja y moderada).

En cuanto su peligrosidad, basada en su capacidad de daño, la bifentrina se clasifica como posible carcinógeno humano (categoría 2B), lo que significa que no se le considera como un carcinógeno conocido en humanos, pero se han realizado estudios que sugieren que puede tener un potencial cancerígeno en animales de laboratorio (ATSDR 2016), mientras que el bendiocarb es un probable no cancerígeno y el pirimifos-metil un cancerígeno no clasificable, lo que significa que no hay pruebas concluyentes de carcinogenicidad en humanos y los bioensayos no han sido concluyentes (Sánchez-González et al. 2016). En términos de capacidad neurotóxica (**Cuadro I**), la bifentrina se encuentra en el nivel 4, lo cual indica que produce alteraciones morfológicas en las células del sistema nervioso (axopatías), en tanto que el bendiocarb y el pirimifos-metil se clasifican en el nivel 2, es decir, causan alteraciones bioquímicas mensurables o colinérgicas (Sandoval et al. 2018). Lo anterior permite identificar a la bifentrina como el pesticida más peligroso de los tres compuestos evaluados por su pCa y pNe.

Para los tres pesticidas evaluados, no se consideró necesario estimar el riesgo cancerígeno individual (CRI), que se determina mediante la DEE a partir

CUADRO I. INDICADORES TOXICOLÓGICOS Y DE EFECTO POR PESTICIDAS EVALUADOS.

Compuesto	DL ₅₀ (mg/kg)	Clasificación toxicológica (OMS 2019)	pT*	pCa**	pNe***	Efectos neurotóxicos (Vela et al. 2003)	Otros efectos crónicos (Universidad Nacional de Costa Rica 2025)
Bifentrina	54.5	II. Moderadamente peligroso	3.9 Bajo	2B Posible carcinógeno humano	Nivel 4 (axonopatía)	Alteraciones morfológicas en las células del sistema nervioso central (SNC) o periférico (SNP)	- Posible carcinógeno para la vejiga - Ataxia - Nocivo por inhalación - Tóxico por ingestión
Bendiocarb	40	II. Moderadamente peligroso	4 Bajo	4 Probable no carcinógeno humano	Nivel 2 (colinérgica)	Alteraciones bioquímicas mensurables	- Aumento del colesterol sérico - Puede causar enferme- dad renal y hepática - Nocivo en contacto con la piel - Tóxico por inhalación y por ingestión
Pirimifos-metil	180	II. Moderadamente peligroso	3.2 Bajo	3 Carcinogenicidad no clasificable	Nivel 2 (colinérgica)	Alteraciones bioquímicas mensurables	- Nocivo por ingestión - Posibles efectos - carcinógenos

*(pT) potencial tóxico molar (Degrossi 2013), **(pCa) potencial carcinogénico con base en la clasificación de agentes carcinogénicos (IARC 2018), *** (pNe) potencial neurotóxico con base en la clasificación de efectos neurotóxicos (Vela et al. 2003).

del factor de pendiente de cáncer (cancer slope factor, CSF), ya que en la bibliografía no hay datos suficientes para establecer dicho factor. En consecuencia, el uso adecuado y seguro de estos pesticidas es fundamental, ya que son agentes químicos peligrosos (AQP) con potencial tóxico (pT), por lo que se recomienda seguir las políticas de menor uso y atender las recomendaciones del fabricante respecto de la manipulación, el transporte, el uso, el manejo y el almacenamiento, así como la normatividad, para minimizar cualquier riesgo asociado con su uso.

Evaluación del riesgo no cancerígeno (HQ)

Para la evaluación de riesgos a la salud por la exposición a los pesticidas evaluados, se requirió establecer la relación entre la DEE (**cuadro II**) y la RfD. En el **cuadro III** se observa que los tres pesticidas incrementan el riesgo de contraer enfermedades no cancerígenas a medida que aumentan los años de exposición laboral (5, 10 y 15 años). Para el bendiocarb, el riesgo es significativo desde los cinco años en adelante, debido a que presenta valores de HQ > 1: 1.37, 2.7 y 4.1 a los 5, 10, 15 años, respectivamente; mientras que para bifentrina y pirimifos-metil no fue mayor a 1 (HQ < 1), lo que se interpreta como riesgo

bajo, a pesar de que también aumentó a lo largo de los años.

En cuanto al riesgo acumulado por los diferentes pesticidas evaluados para desarrollar alguna enfermedad no cancerígena, se puede observar en el **cuadro III** que el valor del índice de riesgo no cancerígeno (HI) es medio a los cinco y 10 años de exposición laboral, con valores de 1.4 y 2.9, respectivamente; pero a los 15 años el valor de HI fue de 4.4, lo que se interpreta como riesgo medio-alto.

DISCUSIÓN

El riesgo para la salud por exposición laboral a plaguicidas no depende únicamente de la toxicidad aguda, sino también del tiempo de exposición, de la vía de administración y de la interacción entre compuestos químicos. En 2007, el Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH, por su sigla en inglés) señaló que los plaguicidas utilizados en actividades de fumigación son agentes químicos peligrosos cuya principal vía de exposición ocupacional es la inhalatoria y destacó que incluso exposiciones repetidas a concentraciones bajas pueden generar

CUADRO II. PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DE LA DOSIS DE EXPOSICIÓN ESTIMADA Y DEL RIESGO NO CARCINOGENÉTICO.

Parámetro	Símbolo	Valor utilizado	Unidad	Fuente
Concentración de exposición (Ce) al contaminante	Ce _{Bifentrina}	62.5	Kilogramos de ingrediente activo utilizados por jornada	CENAPRECE (2023)
	Ce _{Bendiocarb}	0.125	Kilogramos de ingrediente activo utilizados por jornada	CENAPRECE (2023)
	Ce _{Pirimifos-metil}	0.049	Kilogramos de ingrediente activo utilizados por jornada	CENAPRECE (2023)
Tasa de inhalación	Ti	23	m ³ /día	ATSDR (1992)
Duración de la exposición	ED	195	Días trabajados/año	Morales-Galindo et al. (2023)
Frecuencia de exposición (años trabajados)	F	5, 10, 15	Años	Morales-Galindo et al. (2023)
Peso corporal (adulto hombre)	PCo	70	kg	USEPA (2011)
Tiempo total de exposición expresado en años	AT	5, 10, 15	Años (según escenario)	Morales-Galindo et al. (2023)

Ce: concentración de exposición; Ti: tasa de inhalación; ED: duración de la exposición; F: frecuencia de exposición; PCo: peso corporal; AT: tiempo total de exposición.

CUADRO III. ESTIMACIÓN DEL DAÑO NO CANCERÍGENO POR AÑOS DE EXPOSICIÓN OCUPACIONAL.

Temporalidad	5 años	10 años	15 años
Compuesto	Bifentrina		
DEE	0.0013 mg/kg/d	0.0027 mg/kg/d	0.0041 mg/kg/d
ADI*	0.02 mg/kg/d	0.02 mg/kg/d	0.02 mg/kg/d
HQ _{Bifentrina}	0.065	0.135	0.205
Compuesto	Bendiocarb		
DEE	0.0027 mg/kg/d	0.0054 mg/kg/d	0.0082 mg/kg/d
ADI*	0.002 mg/kg/d	0.002 mg/kg/d	0.002 mg/kg/d
HQ _{Bendiocarb}	1.35	2.7	4.1
Compuesto	Pirimifos-metil		
DEE	0.0010 mg/kg/d	0.0021 mg/kg/d	0.0032 mg/kg/d
ADI*	0.03 mg/kg/d	0.03 mg/kg/d	0.03 mg/kg/d
HQ _{Pirimifos-metil}	0.033	0.066	0.106
HI	1.448	2.901	4.411

DEE: dosis de exposición estimada; *ADI: dosis de ingesta admisible (SICA 2025); HQ: cociente de peligro (hazard quotient); HI: índice de riesgo no cancerígeno (hazard index).

efectos adversos cuando se acumulan a lo largo del tiempo (NIOSH 2007). Asimismo, dicha institución subrayó que los trabajadores involucrados en la mezcla, manejo y aplicación de estos productos conforman un grupo de alto riesgo, especialmente cuando las jornadas prolongadas y la insuficiencia o el mal uso del equipo de protección personal incrementan la dosis absorbida.

El bendiocarb representa la mayor preocupación por su $HQ_i > 1$, lo cual se interpreta como un riesgo medio, en coincidencia con reportes previos de neurotoxicidad colinérgica y daño renal/hepático (Morales-Galindo et al. 2023).

Los resultados muestran que la bifentrina presentó una toxicidad de moderada a leve en humanos, con posible capacidad cancerígena (nivel 2B) y neurotóxica (nivel 4; axopatías). Estos hallazgos son consistentes con los de Sandoval et al. (2018), quienes reportan que la bifentrina tiene efectos tóxicos significativos en organismos acuáticos, pero los efectos reportados en humanos van de escasos a nulos. Por su parte, Yang et al. (2014) señalan que la exposición repetida o prolongada a bifentrina puede afectar el sistema nervioso central, lo que se manifiesta en temblores musculares y problemas de coordinación. Esto corrobora lo establecido en el presente estudio sobre el posible efecto neurotóxico del compuesto.

Por otro lado, el pirimifos-metil resultó ser moderadamente tóxico para humanos, con posible capacidad cancerígena de baja a no clasificable, y capacidad neurotóxica también baja (nivel 2; alteraciones colinérgicas); aunque no son potencialmente carcinógenos, pueden presentar un riesgo no cancerígeno, especialmente con exposiciones prolongadas (Morales-Galindo et al. 2023).

Morales-Galindo et al. (2023) señalan que en ambientes laborales como los del programa de control de vectores en México existe un riesgo potencial para los trabajadores, lo que resalta la necesidad de reforzar las medidas preventivas y mantener un monitoreo continuo para proteger su salud. Aunque el uso adecuado de equipos de protección personal (EPP) puede reducir el riesgo, en la práctica su utilización es limitada y la combinación de exposiciones elevadas y tiempos prolongados de trabajo mantiene un riesgo constante en este sector laboral.

Sánchez-González et al. (2016) subrayan la importancia de controlar los vectores de enfermedades para prevenir brotes epidémicos. Sin embargo, hacen hincapié en que el uso intensivo de pesticidas para este propósito debe equilibrarse con la implementación de prácticas seguras y el uso de equipo de protección adecuado para minimizar los riesgos para

la salud, ya que estos compuestos químicos pueden absorberse por inhalación y por la piel, lo que puede producir intoxicaciones agudas (Morales-Galindo et al. 2023). Además, una exposición crónica a pesticidas se relaciona con trastornos reproductivos, musculoesqueléticos, respiratorios y endocrinos, así como neurotoxicidad, y algunos pueden generar cáncer (Ocotzi-Eliás et al. 2022).

Según Niño (2013), en México el 83 % de los aplicadores presentó efectos adversos a la salud, los cuales se atribuyen a la exposición ocupacional a pesticidas y a que el 64.72 % no utilizaba adecuadamente el equipo de protección.

En el presente estudio se determinó que el bendiocarb representa un riesgo alto para la salud humana por exposición laboral; esto resalta la necesidad de que se tomen decisiones urgentes para minimizar la exposición a estos pesticidas, los cuales están incluidos en la lista de sustancias peligrosas del Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud, por los siguientes motivos: ambos pesticidas son disruptores endocrinos y neurotóxicos, y pueden provocar a largo plazo efectos negativos en el medio ambiente y a la salud.

CONCLUSIONES

La exposición ocupacional a pesticidas utilizados para el control de vectores de enfermedades humanas en México representa un riesgo importante para la salud de los trabajadores del programa correspondiente. El bendiocarb es un posible cancerígeno en humanos (IARC 2018), aunque con baja capacidad neurotóxica. Sus efectos pueden potenciarse, especialmente en exposiciones prolongadas (Morales-Galindo et al. 2023). Lo anterior se sustenta en el riesgo de generar enfermedades no cancerígenas conforme aumentan los años de exposición laboral, evidencia que se reflejó en los resultados del presente trabajo con valores de $HQ > 1$, los cuales pueden potenciarse con exposiciones simultáneas a otros agentes químicos peligrosos, siempre y cuando afecten al mismo órgano objetivo o sistema de órganos, lo que se conoce como índice de riesgo acumulado (HI).

Aunque la bifentrina presenta un riesgo no cancerígeno bajo, su potencial carcinogénico y neurotóxico genera un HI en exposiciones prolongadas (Morales-Galindo et al. 2023). Lo mismo pasa con el pirimifos-metil, que mostró un bajo riesgo para la salud, relacionado con su baja capacidad neurotóxica.

Los resultados destacan la necesidad de fortalecer la regulación y los programas de capacitación para

los trabajadores expuestos a pesticidas, especialmente para quienes participan en el Programa de Control de Enfermedades Transmitidas por Vectores en México, cuya labor es fundamental para la protección de la salud pública. La implementación de medidas preventivas, prácticas seguras y el uso adecuado del equipo de protección, junto con un monitoreo continuo, son esenciales para minimizar los riesgos ocupacionales y proteger tanto a los trabajadores como a la comunidad en general (Mendoza e Ize 2017). Dado que existen pocos estudios que evalúan los efectos de la exposición a pesticidas en sectores laborales específicos, este estudio resalta la importancia de adoptar estrategias de prevención y vigilancia para mitigar los riesgos asociados a la exposición ocupacional.

AGRADECIMIENTOS

La primera autora agradece a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por el apoyo brindado para la realización del presente proyecto. Asimismo, reconoce el respaldo otorgado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) mediante la beca de posgrado durante el Doctorado en Ciencias Ambientales.

REFERENCIAS

- ATSDR (1992). Toxicological profile for pyrethrins and pyrethroids. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, Georgia, EUA, 167 pp.
- ATSDR (2016). Toxicological profile for malathion. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, Georgia, EUA, 267 pp.
- CENAPRECE (2023). Lineamientos para la vigilancia entomológica y control de vectores. Centro Nacional de Prevención y Control de Enfermedades, México [en línea]. <https://www.gob.mx/salud%7Ccenaprece/documentos/documentos-vectores> 23/03/2026
- CM (2004). Contaminación de suelos. Análisis de riesgos. Toxicología. Ecotoxicología. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Comunidad de Madrid, Madrid, España, 302 pp.
- Degrossi M.C. (2013). Conceptos básicos de toxicología y toxicocinética. Universidad de Belgrano, Buenos Aires, Argentina, 62 pp.
- FAO/WHO (2016). Pesticide Residues in Food – 2016. Evaluations. Food and Agriculture Organization/World Health Organization, Roma, Italia, 242 pp.
- FAO/WHO (2017). Pesticide residues in food – 2017. Toxicological evaluations. Joint FAO/WHO Meeting on Pesticide Residues (JMPR). Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization [en línea]. <https://www.fao.org/3/i8160en/I8160EN.pdf> 23/03/2026
- Gerba C.P. (2019). Risk assessment. En: Environmental and pollution science (Brusseau M.L., Pepper I.L. y Gerba C.P., Eds.). Academic Press, Cambridge, EUA, 541-563.
- IARC (2018). Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Volume 112: Pyrethroids. International Agency for Research on Cancer, World Health Organization, Lyon, Francia, 710 pp.
- Mendoza C. e Ize L. (2017). Las sustancias químicas en México. Perspectivas para un manejo adecuado. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 33 (4), 719-745. <https://doi.org/10.20937/rica.2017.33.04.15>
- Morales-Galindo E., Blanco-Muñoz J., Arenas-Monreal L. y Hernández-Mariano J. (2023). Condiciones de trabajo y prácticas con pesticidas en trabajadores de control de vectores en México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 39, 229-240. <https://doi.org/10.20937/rica.54786>
- NIOSH (2007). Pocket guide to chemical hazards. National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, Ohio, EUA, 424 pp.
- Niño M.D. (2013). Factores ocupacionales y prácticas higiénicas relacionadas con la exposición a piretroides y efectos sobre la salud en rociadores del programa para el control del dengue en el Estado de Nuevo León. Tesis de maestría. Escuela de Salud Pública de México, Instituto Nacional de Salud Pública, Cuernavaca, Morelos, México, 115 pp.
- Ocotzi-Elias M. I., Schilmann A. y Arenas-Monreal L. (2022). Vigilancia de la salud de los trabajadores expuestos a plaguicidas en el programa de control de vectores en México. Salud Pública de México 64 (3), 299-310. <https://doi.org/10.21149/12978>
- OMS (2019). The WHO recommended classification of pesticides by hazard and guidelines to classification 2019. Organización Mundial de la Salud, Ginebra, Suiza, 92 pp.
- Sandoval G., Castillo L., Zarza A., Hernández J., Fernandez J. y Pineda A. (2018). Toxicidad aguda diferencial de Talstar® (bifentrina) y Biothrine® (deltametrina) en la tilapia nilótica *Oreochromis niloticus*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 34 (1), 45-55. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.01.04>
- Sánchez-González J.M., Ramos-Remus C., Jácome-Sánchez B., García-Ortiz R., Flores-Ramos J. y Santoscoy H.F. (2016). Virus Zika en México. Revista Latinoamericana de Patología Clínica y Medicina de Laboratorio 63 (1), 4-12.

- Sánchez-Olivares M. A., Gaytán-Oyarzun J. C. y López-López E. (2021). Evaluación rápida de potencial de riesgo genotóxico asociado a metales pesados en agua potable: caso de estudio Zimapán, Hidalgo, México. *Pädi* 9 (17), 114-120. <https://doi.org/10.29057/icbi.v9i17.7140>
- SICA (2025). Base de datos de plaguicidas autorizados en Centroamérica. Sistema de la Integración Centroamericana [en línea]. <https://plaguicidas.centroamerica.org> 23/03/2026.
- SSA (2016). Informe sobre riesgo y exposición acumulada a plaguicidas en México. Secretaría de Salud [en línea]. <https://www.gob.mx/salud>
- Sunta Ruiz M.L. (2021). Efectos en la salud de los trabajadores expuestos a plaguicidas organofosforados en una plantación agrícola. Tesis de especialización. Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador, 67 pp.
- Universidad Nacional de Costa Rica (2025). Manual de plaguicidas de Centroamérica: toxicidad en salud humana. Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas, Heredia, Costa Rica [en línea]. <https://www.plaguicidasdecentroamerica.una.ac.cr> 23/03/26
- USEPA (2005). Guidelines for carcinogen risk assessment. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EUA, 166 pp.
- USEPA (2011). Exposure factors handbook. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EUA, 300 pp.
- Valencia-Quintana R., Milić M., Bonassi S., Ochoa-Ocaña M.A., Campos-Peña V., Tenorio-Arvide M.G., Pérez-Flores G.A. y Sánchez-Alarcón J. (2023). Effect of pesticide exposure over DNA damage in farmers from Los Reyes, Michoacán, Mexico. *Toxics* 11 (2), 122. <https://doi.org/10.3390/toxics11020122>
- Vela M.M., Laborda R. y García A.M. (2003). Neurotóxicos en el ambiente laboral: criterios de clasificación y listado provisional. *Archivos de Prevención de Riesgos Laborales* 6 (1), 17-25.
- WHO (2018). Household air pollution and health. World Health Organization [en línea]. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health> 23/03/2026.
- WHO (2019). Vector-borne diseases. World Health Organization [en línea]. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/vector-borne-diseases> 23/03/2026.
- Yang Y., Ma H., Zhou J., Liu J. y Liu W. (2014). Joint toxicity of permethrin and cypermethrin at sublethal concentrations to the embryo-larval zebrafish. *Chemosphere* 96, 146-154. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.018>