VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Análisis ambiental de neonicotinoides en sedimentos de la Laguna de Yuriria.

Environmental Analysis of Neonicotinoids in Sediments of Yuriria Lagoon

Ana Marlen Acosta Sierra[1], Inés Castañeda Sánchez[1], Valeria Carolina Maciel Fonseca [1], Israel Castro Ramírez[1], Rogelio Costilla Salazar[1]

[1]Licenciatura en Ingeniería Ambiental, División Ciencias de la Vida, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato

[1]i.castro@ugto.mx[1]

Resumen

La Laguna de Yuriria, uno de los humedales más importantes de México, se encuentra expuesta al ingreso de contaminantes de origen antropogénico debido a la intensa actividad agrícola y urbana desarrollada en su cuenca. Con el objetivo de evaluar la presencia de residuos químicos acumulados en el ecosistema, se recolectaron sedimentos en nueve puntos de muestreo distribuidos alrededor de la laguna. Las muestras fueron sometidas a procesos de secado, extracción asistida por ultrasonido y análisis mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS).

Los resultados permitieron identificar compuestos asociados directa e indirectamente con plaguicidas, entre ellos metabolitos de degradación de organoclorados como el lindano, así como indicadores relacionados con organofosforados, piretroides, rodenticidas y coadyuvantes empleados en formulaciones agrícolas. Además, se detectaron marcadores de contaminación petrogénica vinculados con hidrocarburos y combustibles. En conjunto, los hallazgos evidencian que los sedimentos de la Laguna de Yuriria actúan como reservorios de contaminantes persistentes, reflejando la influencia histórica y actual de las actividades agrícolas y urbanas en la región. Esto pone de manifiesto la necesidad de fortalecer los programas de monitoreo ambiental y las estrategias de gestión y conservación de este importante ecosistema.

Palabras clave: Sedimentos; Organoclorados; Pesticidas; Compuestos.

Introducción

El incremento sostenido de la producción agrícola ha generado un aumento intensivo en el empleo de plaguicidas para el control de plagas, siendo los neonicotinoides uno de los grupos de insecticidas de mayor uso a nivel mundial debido a su elevada eficacia y a su rápido posicionamiento en el mercado. Desde la década de los noventa estos compuestos han logrado captar más del 25 % de la cuota del mercado mundial de insecticidas, encontrando aplicación en la producción de más de 140 cultivos distintos en 120 países (Jeschke et al., 2011). Su relevancia radica en que constituyen una herramienta fundamental para la protección fitosanitaria de los cultivos, particularmente en regiones tropicales, donde la presión de plagas resulta considerablemente mayor a causa de las condiciones climáticas favorables para su proliferación. No obstante, su uso también ha suscitado preocupación respecto a su impacto ecotoxicológico y a los efectos adversos que puede generar sobre los diferentes organismos.

Los neonicotinoides constituyen una clase de pesticidas, empleados en la industria agrícola para la protección de cultivos, en la horticultura y el control de pulgas. El primer neonicotinoide, la nitiazina, se desarrolló en 1972, aunque nunca llegó a comercializarse. Años más tarde, el Imidacloprid (un neonicotinoide cloronicotinilo) se convirtió en el primer compuesto de este grupo en emplearse como pesticida comercial (Selvam & Srinivasan, 2019). Posteriormente fueron incorporados otros compuestos, entre ellos Acetamiprid, Clothianidin, Dinotefuran, Nitenpyram, Thiacloprid y Thiamethoxam, pero su aprobación para cultivos de consumo humano fue hasta el año 2004 en Europa. Desde entonces, su uso ha aumentado de manera progresiva, hasta convertirse hoy en uno de los insecticidas más vendidos a nivel mundial.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

La eficacia de estos insecticidas se debe a su acción sistémica: son absorbidos por la planta y distribuidos a través de sus tejidos, lo que permite proteger el cultivo durante más tiempo. Su mecanismo de acción se centra en el sistema nervioso de los insectos, donde se unen a unas proteínas llamadas receptores nicotínicos de acetilcolina (nAChR), provocando una estimulación continua de dicho sistema. Esto altera la transmisión de los impulsos nerviosos y causa parálisis y, finalmente, la muerte del insecto. Aunque los distintos neonicotinoides presentan estructuras químicas diferentes, todos actúan mediante este mismo mecanismo.

Los receptores nicotínicos de acetilcolina son proteínas complejas formadas por cinco subunidades, cuya estructura permite la transmisión rápida de las señales nerviosas. Precisamente porque los neonicotinoides actúan de forma directa sobre estos receptores, interrumpen la comunicación entre las neuronas y provocan los efectos tóxicos característicos de este grupo de insecticidas.

Los neonicotinoides llegan al medio ambiente por dos principales métodos que son el tratamiento de semillas y la pulverización. Las principales rutas de transporte de los neonicotinoides hacia los ambientes acuáticos son la escorrentía superficial. En los últimos años, los insecticidas, incluidos los neonicotinoides, han contribuido tanto a la contaminación de aguas superficiales como subterráneas en cuerpos de agua situados en regiones agrícolas de alta intensidad, donde se ha utilizado frecuentemente los neonicotinoides (Dabrowski et al., 2002). Entre el 20% y el 75% de los neonicotinoides aplicados terminan en aguas superficiales mediante escorrentía o lixiviados a aguas subterráneas (Peña et al., 2011). El perfil ambiental de esta clase de pesticidas indica que son persistentes, tienen un alto potencial de lixiviación y escorrentía. Por lo tanto, los neonicotinoides representan un riesgo significativo para las aguas superficiales y la diversa fauna acuática.

Por otro lado, también ha surgido la preocupación sobre el papel de los neonicotinoides en el efecto negativo de los polinizadores, lo que ha provocado el colapso y el desorden de las colonias de abejas melíferas.

La laguna de Yuriria, ubicada en el estado Guanajuato, es uno de los humedales artificiales más importantes del país. Está declarada como un sitio RAMSAR, debido a su gran relevancia ecológica. Además de servir como refugio para diferentes especies de aves migratorias, es crucial para el equilibrio ambiental de la zona porque regula el clima, modera la temperatura y controla inundaciones del rio Lerma. Entre los principales servicios que ofrece son la pesca, el turismo y el riego agrícola, abasteciendo de agua al Distrito de Riego 011 (DR011), el cual representa a la región hidroagrícola más importante del estado de Guanajuato, irrigando aproximadamente 112,270 hectáreas (Carreón, 2024). El agua de la laguna ha permitido el cultivo de diversas hortalizas y granos, contribuyendo significativamente a la economía local. No obstante, las actividades agrícolas en la zona han incrementado el riesgo de contaminación por plaguicidas lo que podría aumentar el deterioro de este ecosistema (Zanor et al., 2023).

A pesar de la importancia ambiental y socioeconómica de la laguna, aún existe información limitada sobre la presencia y distribución de neonicotinoides en sus matrices ambientales. Esta falta de evidencia dificulta la evaluación de los posibles riesgos para los organismos y la determinación de estrategias para el manejo y conservación del ecosistema. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue determinar la presencia de neonicotinoides en muestras sedimento provenientes de la laguna, a través de un análisis cromatográfico, con el propósito de identificar su posible origen y valorar su repercusión sobre las diferentes esferas ambientales.

Metodología

Área de Estudio

La Laguna de Yuriria (20º 15’ 08’’ LN y 101º 07’ 30” LW) se encuentra localizada entre los Municipios de Yuriria, Salvatierra y Valle de Santiago, al sur del estado de Guanajuato. Es un humedal artificial alimentado principalmente por las aguas del río Lerma mediante el Canal de La Cinta. En la zona predomina el clima templado subhúmedo con lluvias durante el verano. La laguna abarca una superficie aproximada de 80 km² y tiene una capacidad de almacenamiento de 188 hectómetros cúbicos. Sus dimensiones aproximadas son 17 kilómetros de largo por 6 kilómetros de ancho. En su cuenca predominan actividades agrícolas intensivas dedicadas al cultivo de maíz, sorgo, trigo y hortalizas, las cuales representan una posible fuente de ingreso

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

de plaguicidas al ecosistema. La ubicación geográfica se presenta en la Figura 1, donde se muestra la localización de la Laguna de Yuriria dentro del estado de Guanajuato, México.

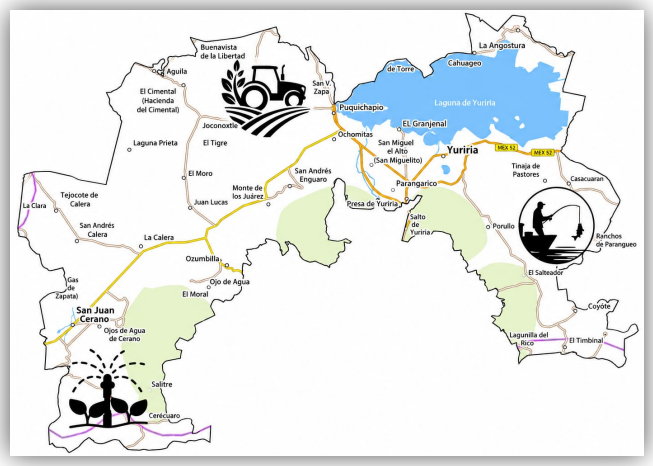


Figura 1. Representación esquemática del área de estudio y de las principales actividades desarrolladas en la zona. Fuente: adaptada de (Sample maps of Yuriria generated with map cropping [masking], 2024).

Muestreo

Los puntos de muestreo se seleccionaron de manera estratégica con el fin de cubrir la mayor parte del perímetro de la laguna, de modo que fuera posible obtener muestras representativas de las diferentes áreas del cuerpo de agua. Esta distribución permitió considerar la variabilidad del ecosistema, dado que sus características físicas no son uniformes y pueden presentar diferencias espaciales derivadas de las actividades antropogénicas, de los distintos tipos de escorrentía que recibe y de la dinámica hidrológica propia del sistema. Lo anterior contribuye a reducir posibles sesgos en el muestreo, lo que permite obtener resultados más confiables en el análisis. A continuación, se muestra la distribución de los sitios de muestreo, mientras que la información correspondiente a sus coordenadas y parámetros registrados se presentan en la Tabla 1.

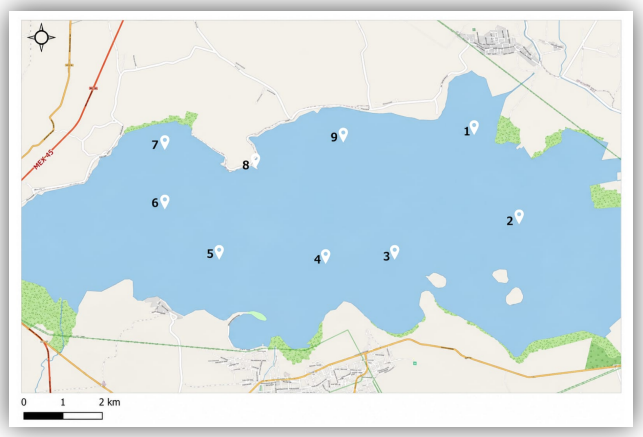


Figura 2. Localización puntos de muestreo establecidos en la Laguna de Yuriria, Guanajuato. Fuente: elaboración propia.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Tabla 1. Datos característicos correspondientes a puntos de muestreo establecidos en la Laguna de Yuriria, Guanajuato.
Fuente: elaboración propia

Punto	Coordenadas		pH	Temperatura (°C)
	Norte	Este		
			7.88	20.33
1	0281588	2242699	7.93	19.33
			8.08	19.33
			8.14	19.09
2	0282617	2240340	8.21	20.1
			8.22	18.85
			8.31	18.25
3	0279607	2239422	8.46	18.48
			8.38	18.25
			8.07	17.77
4	0277926	2239365	8.39	17.77
			8.37	17.73
			7.8	18.45
5	0275285	2239563	8.12	18.81
			8.05	18.66
			7.48	18.43
6	0273958	2240900	7.89	19.56
			7.8	18.56
			7.81	18.86
7	0273964	2242459	8	19.55
			7.99	19
			8.12	18.43
8	0276196	2241901	8.4	19.33
			8.38	19.53
			7.93	18.24
9	0278335	2242614	8.33	20.2
			8.31	19.51
	Promedio		**8.11**	**18.90**

Se recolectó 1 kg de sedimento por punto, empleando una draga Van Veen, y las muestras se colocaron en bolsas de polietileno selladas, las cuales se conservaron a 4°C de temperatura hasta su traslado al laboratorio. En cada punto se llevó a cabo la recolección de datos como son coordenadas del punto, pH y temperatura.

Secado de muestras

Una vez en el laboratorio, los sedimentos se transfirieron a recipientes de aluminio con el fin de llevar a cabo un secado natural a temperatura ambiente (entre 26 y 31 °C). Este proceso tuvo una duración aproximada de un mes. Una vez secas las muestras se procesó a realizar una molienda y tamizado en tamiz número 10 (2mm) y se procesó a realizar una hominización y cuarteo hasta llegar a aproximadamente 30 g, las muestras

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

fueron colocadas en frascos ámbar y guardas a -20° hasta su análisis. La Figura 4 muestra el aspecto de las muestras de sedimento después del proceso de secado previo a su preparación para el análisis.



Figura 4. Secado de muestras. Fuente: elaboración propia.

Extracción de los analitos

Esta etapa comenzó por un proceso de molienda con la finalidad de obtener una textura más fina en las muestras de suelo. La extracción de los analitos de suelo se llevó a cabo mediante el método de extracción asistida por ultrasonido, para la cual se colocaron 2 gramos de muestra en un vaso de precipitado de 50 mL y se adiciono 50 mL de Diclorometano HPLC (J.T. Baker). Posteriormente, la muestra y el solvente fueron sonicados por 5 minutos en un dispositivo ultrasónico (Cole-Parmer) con una potencia de 500 Watts y una punta cónica de 1/8", operando con un ciclo de trabajo del 30%. Al terminar la sonicación, el extracto fue separado por decantación y colocado en un matraz bola. A la muestra restante se le agrego nuevamente 50 mL de Diclorometano, repitiendo todo el proceso dos veces más, obteniendo un volumen total de 150 mL de muestra. Los extractos resultantes en cada repetición se colocaron en el mismo matraz. Después, el matraz con los extractos fue sometido a evaporación mediante un roto vapor a 70°C hasta reducir el volumen del extracto aproximadamente a 2 mL. Posteriormente al extracto concentrado se adicionó nuevamente diclorometano para aumentar el volumen de la muestra, lo que facilito el proceso de filtración. La muestra se transfirió a tubos cónicos y se filtró mediante un sistema de extracción en fase sólida (SPE) con colector de vacío. Una vez terminada la filtración, el extracto se concentró colocando el tubo cónico en un baño de agua a una temperatura máxima de 60 °C y aplicando una corriente de nitrógeno hasta reducir el volumen a 200 µL. Por último, el extracto se transfirió a un vial ámbar de 200 µL y se almacenó a −20 °C para su posterior conserva y análisis mediante cromatografía. A continuación, se adjunta la representación esquemática del procedimiento experimental empleado para la extracción y el procesamiento de las muestras de sedimento.



Figura 5. Proceso de extracción de analitos en laboratorio. Fuente: elaboración propia.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Análisis Instrumental

Los análisis de las muestras estuvieron basados en metodologías propuestas para Cromatografía de Gases acoplada a Espectrometría de Masas (GC-MS); usando un espectrómetro de masas Perkin 560s, acoplado a una columna capilar directa Elite -5MS (30 m * 0.25 mm * 0.25 µm de grosor de película). Se inyectaron un total de 11 muestras, de las cuales; 9 correspondieron a las muestras recolectadas y 2 a blancos de lavado (hexano y acetona), utilizados con la finalidad de evitar contaminación cruzada entre cada inyección. Para cada una de las muestras se aplicaron tres métodos cromatográficos: volátiles, semivolátiles y pesticidas. Empleando el mismo volumen de inyección de 1.0 µL mediante un muestreador automático. Para el método de compuestos volátiles, el tiempo de corrida fue de 17.27 minutos. Inicialmente el horno de la columna se mantuvo por 5 min a 35°C, seguido de un incremento de 11°C/min, hasta alcanzar una temperatura de 60°C sin tiempo de mantenimiento; posteriormente, se aumentó la temperatura de 20°C/min hasta llegar a 220°C, manteniéndose constante durante 2 min. En el método de compuestos semivolátiles, el tiempo de corrida fue de 19.60 minutos. El programa de horno comenzó con una temperatura de 40°C por 1 min, seguido de un incremento de 25°C/min, hasta alcanzar una temperatura de 280°C sin mantenimiento; para pasar a un segundo aumentó de 5°C/min hasta llegar a 320°C, con un mantenimiento final de 1 min. Finalmente, para el análisis del método de pesticidas, el tiempo total de corrida fue de 25.67 min. El programa de temperatura inició a 100 °C durante 2 min, seguido de un aumento de 20 °C/min hasta llegar a 200 °C; posteriormente, hubo un segundo incremento de 7 °C/min hasta 270 °C y por último un tercer aumento de 15 °C/min hasta 310 °C, manteniéndose constante por 6 min.

Procesamiento de Datos

Una vez finalizadas las corridas cromatográficas, se obtuvo un total de 27 cromatogramas, correspondientes a las muestras analizadas mediante los tres métodos cromatográficos empleados. Cada cromatograma fue procesado utilizando el software del equipo, donde se identificaron los picos cromatográficos más representativos mediante la asignación de colores distintivos para facilitar su visualización. Una vez identificados los picos de interés, la información generada fue transferida a una hoja de cálculo de Excel, donde se registró el tiempo de retención y el compuesto asociado a cada pico, de acuerdo con la identificación realizada por el sistema cromatográfico. La base de datos obtenida se utilizó para organizar y comparar los compuestos detectados en las diferentes muestras, constituyendo la información empleada para el análisis e interpretación de los resultados del presente estudio. A continuación, se incluye un cromatograma representativo derivado del análisis realizado (Figura 6).

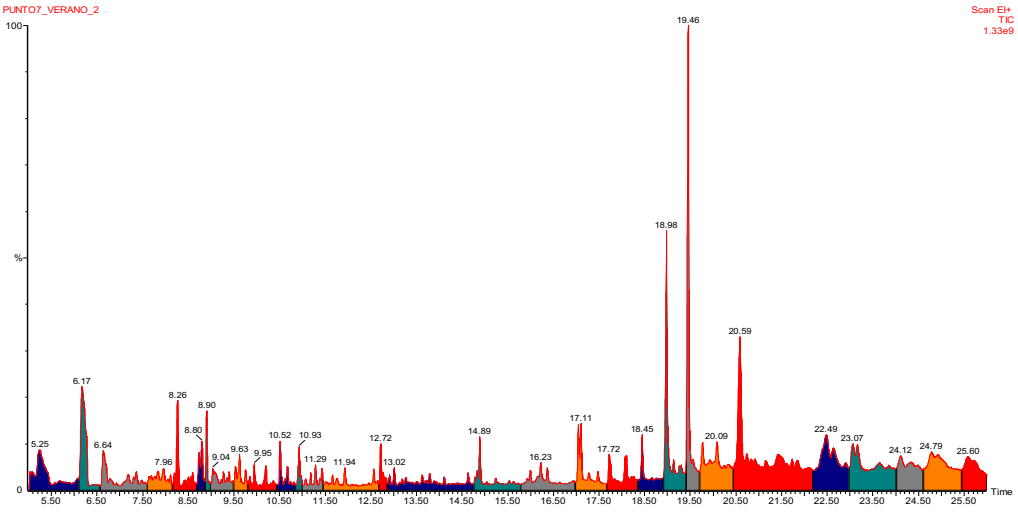


Figura 6. Picos cromatográficos identificados en “Punto 7_Pesticidas”. Fuente: elaboración propia.

Resultados

A partir de los 945 compuestos identificados en las 9 muestras analizadas y los 27 cromatogramas obtenidos, se realizó una clasificación para cada método utilizado (volátiles, semivolátiles y pesticidas), con el fin de categorizar posteriormente aquellos compuestos derivados de pesticidas, ya fuera de forma directa o indirecta. A partir de esta clasificación, se llevó a cabo un análisis de los datos con el objetivo de correlacionar cada compuesto con su frecuencia de detección en los distintos métodos. Como resultado, se generaron dos tipos de gráficos (de barras y circular), en los cuales es posible observar los compuestos con mayor tendencia de aparición; estos se presentan a continuación.

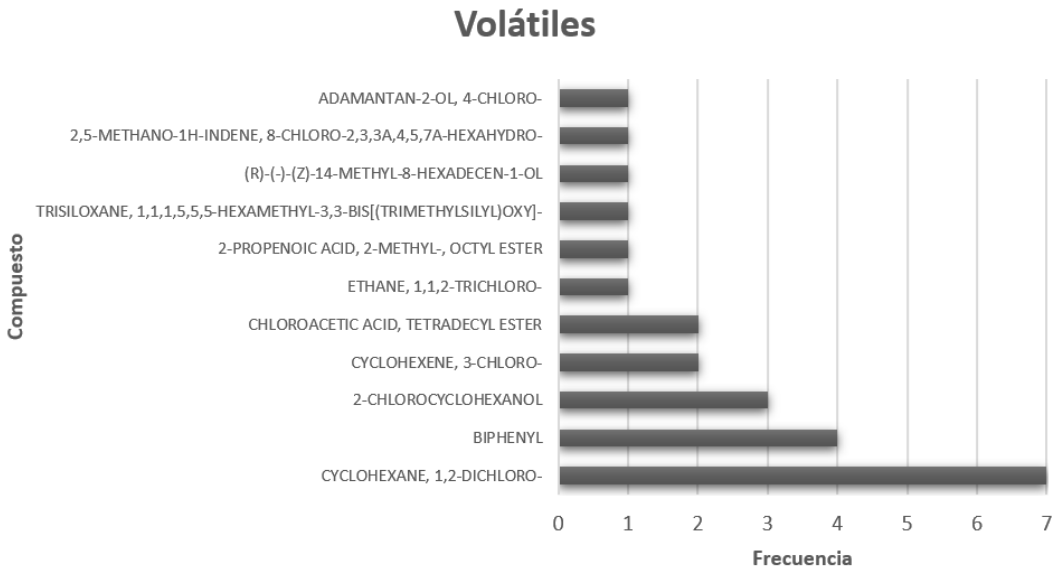


Figura 7. Perfil de compuestos volátiles detectados y su frecuencia relativa de aparición en las muestras estudiadas.
Fuente: elaboración propia.

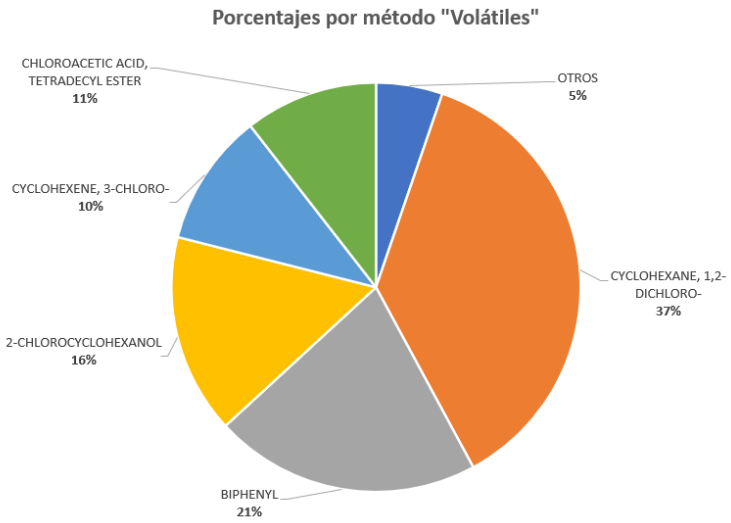


Figura 8. Porcentaje de participación de los compuestos identificados mediante el método de análisis de volátiles.
Fuente: elaboración propia.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

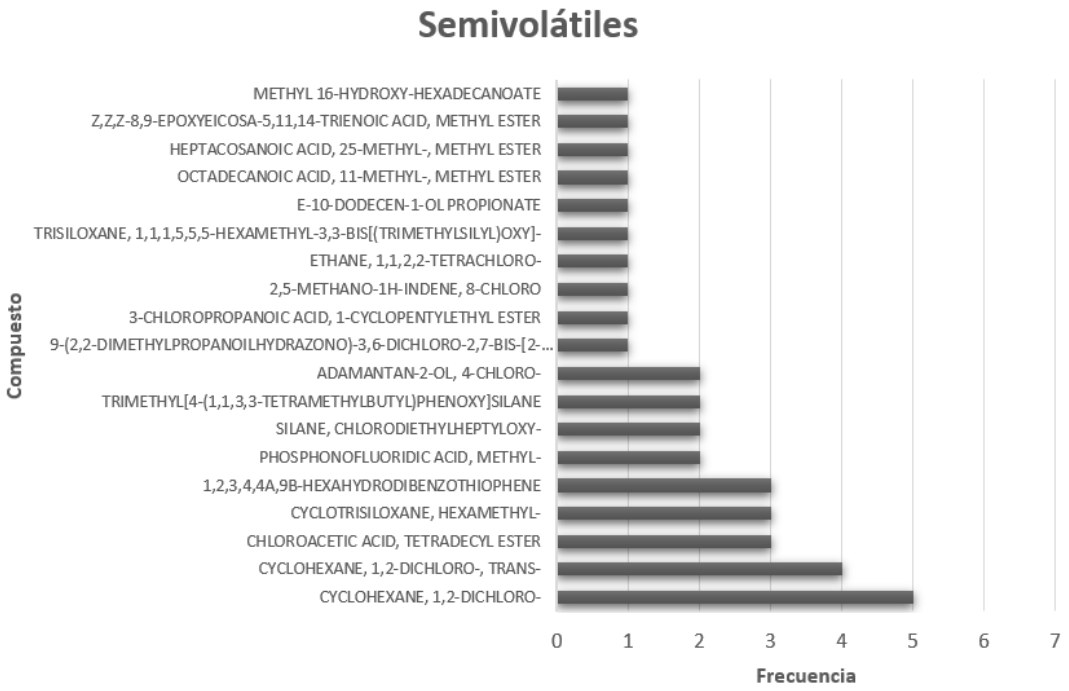


Figura 9. Perfil de compuestos semivolátiles detectados y su frecuencia relativa de aparición en las muestras estudiadas.
Fuente: elaboración propia.

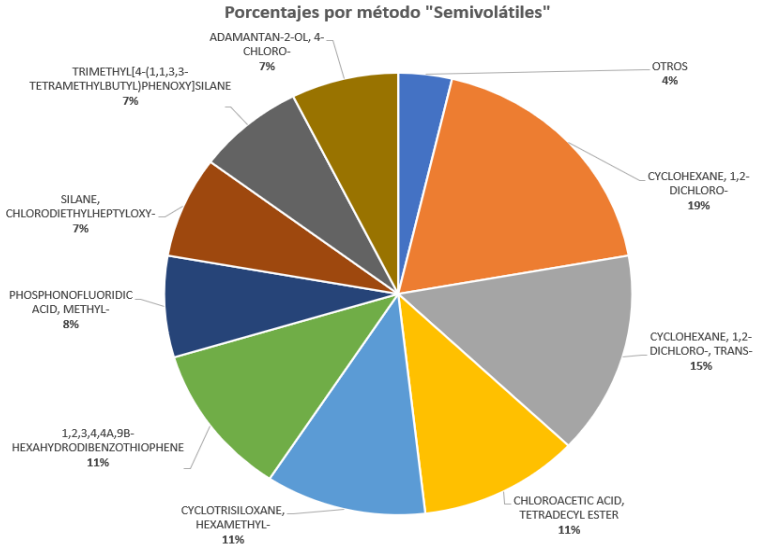


Figura 10. Porcentaje de participación de los compuestos identificados mediante el método de análisis de semivolátiles.
Fuente: elaboración propia.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

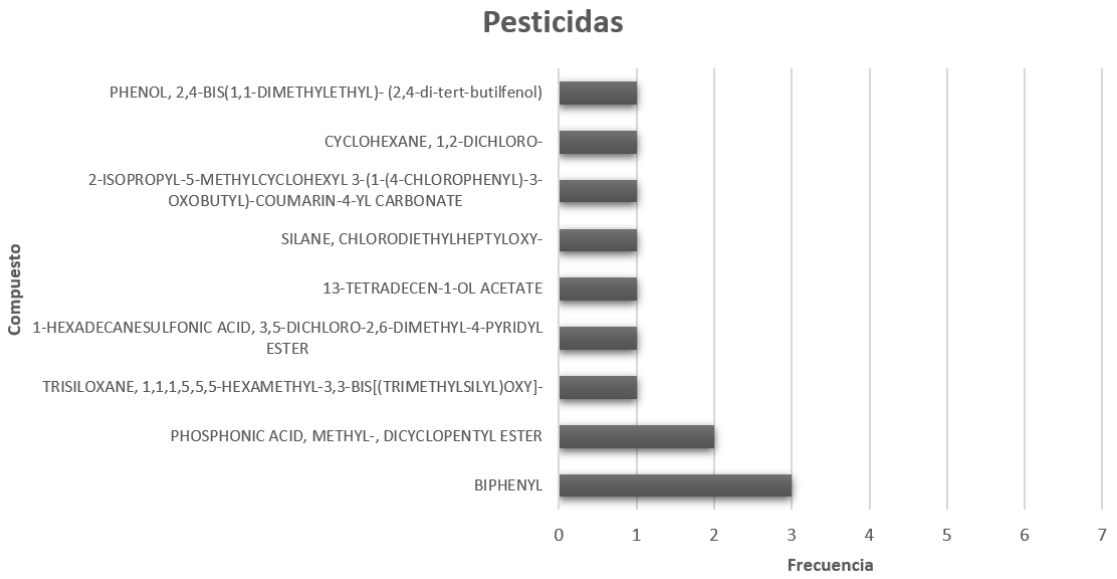


Figura 11. Perfil de compuestos pesticidas detectados y su frecuencia relativa de aparición en las muestras estudiadas.
Fuente: elaboración propia.

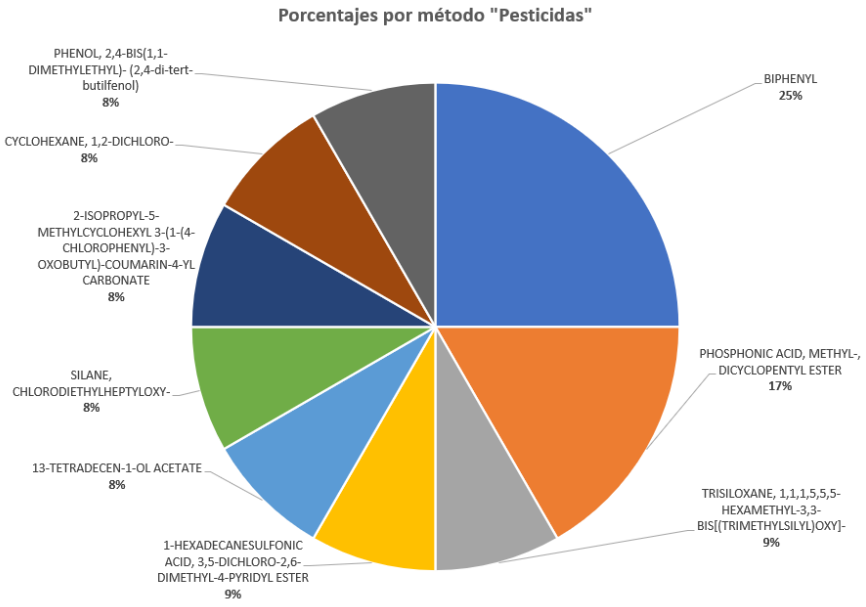


Figura 12. Porcentaje de participación de los compuestos identificados mediante el método de análisis de pesticidas.
Fuente: elaboración propia.

Con el fin de interpretar de manera rigurosa los compuestos tentativamente identificados mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas, se clasificó cada uno según su origen químico y su relación con los plaguicidas (directa, indirecta, nula o no concluyente), evitando así atribuir significado ambiental a compuestos cuya presencia responde a artefactos instrumentales o a fuentes de contaminación no agroquímicas. En la tabla 2 se puede observar esta información.

VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Tabla 2. Compuestos de mayor relevancia identificados en los picos cromatográficos. Fuente: elaboración propia.

Compuesto	Origen	Relación con plaguicidas	Impacto
Biphenyl	Compuesto aromático de uso industrial y agrícola	**Directa** Fungistato en cítricos; precursor de PCB	Persistente; tóxico para hígado, riñón y SNC; evidencia sugerente de carcinogenicidad.
Cyclohexane, 1,2-dichloro- (cis y trans)	Ciclohexano clorado	**Indirecta** Metabolito de degradación del lindano/HCH	Persistencia y bioacumulación heredadas del organoclorado parental; posible neurotoxicidad/disrupción endocrina.
2-Chlorocyclohexanol	Ciclohexanol clorado	**Indirecta** Metabolito hidroxilado de HCH	Menor documentación específica; preocupación heredada de la familia HCH.
Cyclohexene, 3-chloro-	Ciclohexeno clorado	**Indirecta** Intermediario de degradación anaerobia de HCH	Persistencia moderada, dependiente del grado de cloración remanente.
Chloroacetic acid, tetradecyl ester	Éster graso de ácido cloroacético	**Indirecta** El ácido cloroacético es precursor de dimetoato, 2,4-D	Altamente tóxico para vida acuática; irritante/corrosivo en humanos.
Phosphonic acid, methyl-, dicyclopentyl ester	Éster de ácido metilfosfónico	**Indirecta** Marcador de la familia organofosforada	Inhibición de acetilcolinesterasa; toxicidad neurológica; móvil en agua tras hidrólisis.
Trisiloxane, hexamethyl-bis[(trimethylsilyl)oxy]-	Surfactante de silicona	**Directa** Coadyuvante en formulaciones de plaguicidas	Bajo perfil toxicológico propio y es indicador de aplicación reciente de agroquímico formulado.
1-Hexadecanesulfonic acid, dicloro-dimetil-piridil ester	Estructura piridínica sulfonada	**No concluyente**	-
13-Tetradecen-1-ol acetate	Acetato de alcohol graso insaturado	**Directa** Feromona sexual usada en monitoreo y control de plagas	Bajo riesgo
Silane, chlorodiethylheptyloxy-	Organosilano	**No concluyente**	-
Coumarin-4-yl carbonate (derivado de coumaclor)	Éster carbonato de 4-hidroxicumarina	**Directa** Corresponde al coumaclor; un rodenticida anticoagulante	Bloquea la coagulación y riesgo de bioacumulación trófica en fauna.
Phenol, 2,4-di-tert-butyl-	Fenol antioxidante	**Directa** Producto de degradación documentado de la bifentrina (piretroide)	Estrés oxidativo en moluscos y toxicidad hepática en ratas.
Cyclotrisiloxane, hexamethyl- (D3)	Siloxano cíclico	**Nula** Sangrado típico de columnas capilares de GC	-
1,2,3,4,4a,9b-Hexahydrodibenzothiophene	PAH azufrado hidrogenado	**Nula** Marcador geoquímico de petróleo	Indica contaminación petrogénica *in Situ.*
Phosphonofluoridic acid, methyl-	Ácido organofosforado fluorado	**No concluyente**	-

Compuesto	Origen	Relación con plaguicidas	Impacto
Trimethyl[4-(1,1,3,3-tetramethylbutyl)phenoxy]silane	Derivado TMS de 4-tert-octilfenol	**Indirecta** Surfactante usado ocasionalmente en formulaciones de plaguicidas	Disruptor endocrino; feminización y vitelogénesis en peces.
Adamantan-2-ol, 4-chloro-	Diamondoide clorado	**Nula** Hidrocarburo diamondoide de origen petrogénico	Indica contaminación petrogénica *in Situ.*

El hallazgo más consistente y mejor respaldado por la literatura corresponde a los derivados clorados del ciclohexano (1,2-diclorociclohexano en sus isómeros cis y trans, 3-cloro-ciclohexeno y 2-clorociclohexanol), los cuales representaron proporciones considerables en los tres métodos analizados. Estos compuestos no constituyen plaguicidas *per se*, sino productos de transformación del lindano (γ-HCH), generados mediante procesos de deshalogenación e hidroxilación enzimática durante su degradación ambiental. La detección reiterada de estos metabolitos en distintas fracciones cromatográficas, más que un hallazgo puntual, sugiere la presencia de un contaminante heredado y ampliamente distribuido en el sedimento de la laguna, consistente con antecedentes de uso agrícola de organoclorados (actualmente restringidos o prohibidos en la mayoría de los países), lo que reforzaría su origen histórico más que una fuente de aplicación activa reciente.

Consecuente a esto, se identificaron compuestos asociados (directa o indirectamente) con al menos otras tres familias de plaguicidas. En primer lugar, un éster del ácido metilfosfónico, marcador estructural típico de la degradación de insecticidas organofosforados como el clorpirifós. En segundo lugar, el 2,4-di-*tert*-butilfenol, identificado en la literatura como un producto de degradación documentado de la bifentrina, un insecticida piretroide, cuya presencia en aguas superficiales se ha asociado con estrés oxidativo en organismos bentónicos y toxicidad hepática en modelos murinos. En tercer lugar, un derivado carbonatado correspondiente estructuralmente al coumaclor, un rodenticida anticoagulante de primera generación. A esto se suma la detección de bifenilo, empleado directamente como fungistato en la industria citrícola, y de 13-tetradecen-1-il acetato, componente feromonal utilizado en el monitoreo y control biológico de plagas de suelo. En conjunto, esta diversidad química sugiere una historia de manejo agrícola heterogénea en la cuenca que alimenta el cuerpo de agua, en contraposición a una fuente única y puntual de contaminación. Aunque para el caso de exposición para el hombre Weitekamp et al. (2021) concluyeron que la ingesta dietética continúa siendo la principal vía de exposición a PCB para la población general, aunque la inhalación en ambientes interiores ha adquirido una importancia creciente.

Un hallazgo relevante fue la detección de compuestos ajenos al grupo de los plaguicidas, pero indicativos de fuentes adicionales de contaminación en la laguna. Entre ellos se identificaron el 1,2,3,4,4a,9b-hexahidrodibenzotiofeno y el 4-cloroadamantan-2-ol, compuestos asociados a hidrocarburos petrogénicos. En particular, la presencia de hexahidrodibenzotiofeno y de compuestos tipo adamantano en los sedimentos sugiere una contribución de contaminación derivada de petróleo y sus combustibles, ya que los dibenzotiofenos sulfurados y los diamondoides son biomarcadores ampliamente utilizados en geoquímica del petróleo y forensia ambiental para la identificación de crudos y combustibles fósiles (Wang et al., 1999; Peters et al., 2005). En conjunto, estos resultados indican que la laguna recibe una carga contaminante mixta, probablemente asociada a escorrentías urbanas, actividad vehicular y/o embarcaciones con motor en la cuenca, además de los aportes de origen agrícola.

De manera complementaria, se detectaron compuestos vinculados a formulaciones comerciales de agroquímicos. Entre ellos destaca el trisiloxano hexametilado, un surfactante organosiliconado utilizado como coadyuvante para mejorar la dispersión, adhesión y eficacia de las aplicaciones de plaguicidas (Green y Beestman, 2007). Asimismo, se identificó 4-tert-octilfenol en su forma derivatizada, un compuesto derivado de surfactantes alquilfenólicos ampliamente empleados en aplicaciones industriales y en determinadas formulaciones agroquímicas, reconocido además por su actividad como disruptor endocrino (Diel et al., 2002). La coexistencia de estos aditivos de formulación con los residuos de plaguicidas organoclorados y organofosforados previamente identificados constituye una evidencia corroborativa indirecta de la presencia y uso histórico o reciente de productos fitosanitarios comerciales en la zona de estudio. Este tipo de

compuestos suele acompañar a los ingredientes activos en las formulaciones comerciales, por lo que su detección fortalece la interpretación de una influencia agroquímica sobre la calidad de los sedimentos, al tiempo que revela la concurrencia de otras fuentes de contaminación asociadas a hidrocarburos.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten caracterizar a la laguna estudiada como un cuerpo de agua con un perfil de contaminación crónico y acumulativo, dominado por residuos persistentes de organoclorados (lindano/HCH), con evidencia secundaria de exposición histórica a organofosforados, piretroides y un rodenticida anticoagulante, y una contaminación cruzada de origen petrogénico. Este patrón es coherente con lo esperado en cuerpos de agua ubicados en cuencas de uso mixto agrícola-urbano, donde el sedimento actúa como reservorio a largo plazo de contaminantes poco biodegradables, incluso décadas después de su aplicación o descarga original.

Conclusión

El presente estudio permitió caracterizar el perfil de contaminación presente en los sedimentos de la Laguna de Yuriria mediante la aplicación de técnicas cromatográficas GC-MS, identificando una amplia diversidad de compuestos asociados directa e indirectamente con actividades agrícolas y otras fuentes antropogénicas. A partir del análisis de nueve puntos de muestreo distribuidos estratégicamente en el cuerpo de agua, se detectaron evidencias de residuos químicos persistentes que reflejan la influencia histórica y actual de las actividades desarrolladas en la cuenca.

Los resultados mostraron que los compuestos más relevantes corresponden principalmente a metabolitos de degradación de plaguicidas organoclorados, particularmente derivados del lindano (γ -HCH), lo que sugiere una contaminación heredada y de larga permanencia ambiental. Asimismo, se identificaron indicadores relacionados con otras familias de plaguicidas, tales como organofosforados, piretroides y rodenticidas anticoagulantes, además de compuestos utilizados como coadyuvantes en formulaciones agrícolas. Estos hallazgos evidencian que la contaminación del sistema no proviene de una fuente única, sino que responde a un historial complejo de uso y manejo de agroquímicos en la región.

De manera adicional, la presencia de marcadores de contaminación petrogénica indica que la laguna también recibe aportes derivados de actividades urbanas, de transporte y del uso de combustibles, configurando un escenario de contaminación mixta. Esta situación resulta especialmente relevante debido a la importancia ecológica, económica y social de la Laguna de Yuriria, reconocida como sitio RAMSAR y fuente esencial para actividades como la pesca, el turismo y el riego agrícola.

En conjunto, los resultados confirman que los sedimentos actúan como reservorios de contaminantes persistentes capaces de permanecer durante largos periodos en el ecosistema, representando un riesgo potencial para la calidad ambiental, la biodiversidad acuática y los servicios ecosistémicos que proporciona la laguna. Por ello, se enfatiza la necesidad de implementar programas permanentes de monitoreo ambiental, ampliar los estudios hacia agua, biota y otros compartimentos ambientales, así como fortalecer las estrategias de gestión integral de la cuenca para reducir el ingreso de contaminantes y contribuir a la conservación de este importante humedal del estado de Guanajuato.

Bibliografía

1. AgroPages. (2024, 13 de junio). De imidacloprid a sulfoxaflor: las perspectivas del mercado global de los plaguicidas neonicotinoides. AgroPages. https://news.agropages.com/News/NewsDetail---50446.htm
2. Anderson, J.C.; Dubetz, C.; Palace, V.P. Neonicotinoides en el entorno acuático canadiense: Revisión bibliográfica sobre productos de uso actual con un enfoque en el destino, la exposición y los efectos biológicos. Ciencia. Medio Ambiente Total. 2015, 505, 409–422. [Google Scholar] [CrossRef].
3. Atsuda, K.M.; Himomura, M.S.; Hara, M.I.; Kamatsu, M.A.; Attelle, D.B.S. Los neonicotinoides muestran acciones selectivas y diversas sobre sus objetivos de receptores nicotínicos: estudios de electrofisiología, biología molecular y modelado de receptores I. Receptores nicotínicos de acetilcolina de insectos II. Lazos fisicoquímicos y estructurales propios de. *Receptor* 2005, *69*, 1442–1452. [Google Scholar]
4. Belay, C., Tzadok, A., Madmon, M., Shamai Yamin, T., Sod-Moriah, G., Nahum, V., & Weissberg, A. (2025). Determination of methylphosphonofluoridic acid in the environment by derivatization and LC/MS/MS analysis. *Environments, 12*(12), 468. https://doi.org/10.3390/environments12120468
5. Camacho-Pérez, B., Ríos-Leal, E., Rinderknecht-Seijas, N., & Poggi-Varaldo, H. M. (2012). Enzymes involved in the biodegradation of hexachlorocyclohexane: A mini review. *Journal of Environmental Management, 95*, S306–S318. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.047

6. Carreon G. (2024, 11 dic). Laguna de Yuriria: El paraíso ecológico de Guanajuato que pocos conocen | La Silla Rota
7. Cox-foster, D.L.; Conlan, S.; Holmes, E.C.; Palacios, G.; Evans, J.D.; Moran, N.A.; Phenix-Lan, Q.; Briese, T.; Hornig, M.; Martinson, V. Trastorno de colapso. *Science* 2007, *318*, 283–288. [Google Scholar] [CrossRef]
8. Craddock, H.A.; Huang, D.; Turner, P.C.; Quirós-Alcalá, L.; Payne-Sturges, D.C. Tendencias en residuos de pesticidas neonicotinoides en alimentos y agua en Estados Unidos, 1999–2015. *Entorno. Sanar. Glob. Access Sci. Source* 2019, *18*, 1–16. [Google Scholar] [CrossRef].
9. Dabrowski, J.M.; Peall, S.K.C.; Van Niekerk, A.; Reinecke, A.J.; Day, J.A.; Schulz, R. Predicción de la entrada de pesticidas inducidos por la escorrentía en aguas superficiales de subcuencas agrícolas: vinculación de variables de cuenca y contaminación. *Reserva de agua.* 2002, *36*, 4975–4984. [Google Scholar] [CrossRef]
10. Gibbons, D.; Morrissey, C.; Mineau, P. Revisión de los efectos directos e indirectos de los neonicotinoides y el fipronil sobre la fauna vertebrada. Medio ambiente. Ciencia. Contaminación. Res. 2015, 22, 103–118. [Google Scholar] [CrossRef].
11. Jeschke, P.; Nauen, R.; Schindler, M.; Elbert, A. Visión general del estado y la estrategia global de los neonicotinoides. J. Agro, Química Alimentaria. 2011, 59, 2897–2908. [Google Scholar] [CrossRef].
12. Khan, S., Khan, J. A., Shah, N. S., Sayed, M., Ateeq, M., Ansar, S., Boczkaj, G., & Farooq, U. (2023). Determination of lindane in surface water samples and its degradation by hydrogen peroxide and persulfate assisted TiO2-based photocatalysis. RSC Advances, 13(30), 20430–20442. https://doi.org/10.1039/D3RA03610C
13. Li, Z., Hogan, K. A., Cai, C., & Rieth, S. (2016). Human health effects of biphenyl: Key findings and scientific issues. Environmental Health Perspectives, 124(6), 703–712. https://doi.org/10.1289/ehp.1509730
14. Malla, M. A., Dubey, A., Kumar, A., Yadav, S., & Kumari, S. (2023). Modeling and optimization of chlorpyrifos and glyphosate biodegradation using RSM and ANN: Elucidating their degradation pathways by GC-MS based metabolomics. Ecotoxicology and Environmental Safety, 252, 114628. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114628
15. Naug, D. El estrés nutricional debido a la pérdida de hábitat puede explicar los recientes colapsos de colonias de abejas melíferas. Biol. Conserv. 2009, 142, 2369–2372. [Google Scholar] [CrossRef]
16. Peña, A.; Rodríguez-Liébana, J.A.; Mingorance, M.D. Persistencia de dos insecticidas neonicotinoides en aguas residuales y en soluciones acuosas de tensioactivos y materia orgánica disuelta. Quimiosfera 2011, 84, 464–470. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Saénz, S.; Martínez, Z.; Rosales, B.; Zanor. Evaluación de la calidad del agua de la laguna de Yuriria (Guanajuato) y su impacto antrópico. 2021, (p. 1, 2).
18. Sample maps of yuriria generated with map cropping (masking). https://share.google/N93MLhcUIuAvcNf82
19. Selvam, V., & Srinivasan, S. (2019). Neonicotinoid poisoning and management. Indian Journal of Critical Care Medicine, 23(Suppl 4), S260–S262. https://doi.org/10.5005/jp-journals-10071-23308
20. Spivak, M.; Mader, E.; Vaughan, M.; Euliss, N.H., Jr. La difícil situación de las abejas. Medio ambiente. Ciencia. Technol. 2011, 45, 34–38. [Google Scholar] [CrossRef].
21. Sumon, K.A.; Ritika, también conocida como Peeters, E.T.; Rashid, H.; Bosma, R.H.; Rahman, M.S.; Fatema, K.M.; Van den Brink, P.J. Efectos del imidaclobrido en la ecología de microcosmos subtropicales de agua dulce. Entorno. Contaminar. 2018, 236, 432–441. [Google Scholar] [CrossRef].
22. Tomizawa, M.; Casida, J.E. S. Oxididad electiva de N eonicotinoides un ttributable a la especificidad S de I Nsect y M-ammalian N icotinic, R. eceptors. Año. Reverendo Entomol. 2003, 48, 339–364. [Google Scholar] [CrossRef]
23. U.S. Environmental Protection Agency. (2016). Biphenyl (CAS No. 92-52-4): Hazard summary. https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-09/documents/biphenyl.pdf
24. Wu, Z., Wu, J., Liu, D., & Wang, S. (2024). Exposure to environmental levels of 2,4-di-tert-butylphenol affects digestive glands and induces inflammation in Asian clam (*Corbicula fluminea*). *Science of the Total Environment*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170888
25. Žabar, R.; Komel, T.; Fabjan, J.; Kralj, M.B.; Trebše, P. Degradación fotocatalítica con TiO inmovilizado2 de tres insecticidas neonicotinoides seleccionados: Imidacloprido, tiametaxoxam y clothianidina. Quimiosfera 2012, 89, 293–301. [Google Scholar] [CrossRef].
26. Zanor, G.A., Lecomte, K.L., Jesús Puy Y Alquiza, M., Saldaña-Robles, A., Manjarrez-Rangel, C. S., Rubio-Jiménez, C.A., Pussetto, N., 2023,A 16th century artificial reservoir under human pressure: water quality variability assessment in Laguna de Yuriria, central Mexico: Environmental Monitoring and Assessment , 195(1), 182. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10782-6
27. Zhang, W., Lin, Z., Pang, S., Bhatt, P., & Chen, S. (2020). Insights into the biodegradation of lindane (γ-hexachlorocyclohexane) using a microbial system. *Frontiers in Microbiology, 11*, 522. https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00522
28. Camacho-Pérez, B., Ríos-Leal, E., Rinderknecht-Seijas, N., & Poggi-Varaldo, H. M. (2012). Enzymes involved in the biodegradation of hexachlorocyclohexane: A mini review. Journal of Environmental Management, 95(Supplement), S306-S318. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.047
29. Wang, Z., Fingas, M., & Page, D. S. (1999). Oil spill identification. Journal of Chromatography A, 843(1-2), 369-411. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(99)00120-X
30. Peters, K. E., Walters, C. C., & Moldowan, J. M. (2005). The biomarker guide (2nd ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511524868
31. Green, J. M., & Beestman, G. B. (2007). Recently patented and commercialized formulation and adjuvant technology. Crop Protection, 26(3), 320-327. https://doi.org/10.1016/j.cropro.2005.08.021

32. Diel, P., Olff, S., Schmidt, S., & Michna, H. (2002). Effects of the environmental estrogens bisphenol A, o,p'-DDT, p-tert-octylphenol and coumestrol on apoptosis induction, cell proliferation and the expression of estrogen sensitive molecular parameters in the human breast cancer cell line MCF-7. Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology, 80(1), 61-70. https://doi.org/10.1016/S0960-0760(01)00195-2
33. Weitekamp, C. A., Phillips, L. J., Carlson, L. M., DeLuca, N. M., Cohen Hubal, E. A., & Lehmann, G. M. (2021). A state-of-the-science review of polychlorinated biphenyl exposures at background levels: Relative contributions of exposure routes. Science of the Total Environment, 776, 145912. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145912