

# Avances y desafíos en la remoción de plaguicidas en el medio ambiente

Gabriela Peña-Velasco<sup>1</sup> y Alejandro A. Peregrina-Lucano<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Politécnica de la Zona Metropolitana de Guadalajara, Facultad de Ingeniería en Biotecnología, Av. Adolf Bernard Horn Junior 8941, C.P. 45670 Cajititlán, Jalisco, México., [gabriela.pena@upzmg.edu.mx](mailto:gabriela.pena@upzmg.edu.mx)

<sup>2</sup> Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Departamento de Farmacobiología, Blvd. Marcelino García Barragán #1421, C.P. 44420, Guadalajara, Jalisco, México, [aaron.peregrina@academicos.udg.mx](mailto:aaron.peregrina@academicos.udg.mx)

## Resumen

El crecimiento de la población y el desarrollo industrializado de nuestra sociedad ha traído consigo un aumento significativo en la demanda de alimentos. Para enfrentar este desafío, se ha recurrido al uso indiscriminado de plaguicidas en la producción agrícola con el fin de proteger a los cultivos de malezas, plagas, aumentar su productividad y contribuir a la disminución de enfermedades transmitidas por vectores. Entre los más utilizados se encuentran los plaguicidas de amplio espectro que, además de ser identificados como altamente tóxicos, no son selectivos, lo que causa daño tanto a las plagas como a otros organismos vivos con los que entran en contacto tras su aplicación. El uso intensivo y generalizado de estos plaguicidas implica un alto riesgo de contaminación del suelo, aire y agua, afectando a la flora, fauna y seres humanos, siendo además un problema de salud pública. Este trabajo analiza las tecnologías y avances recientes en la remoción y disminución de plaguicidas en los compartimentos ambientales, así como los retos que enfrenta su aplicación para actualizar el marco regulatorio del uso de plaguicidas.

**Palabras clave—** *Plaguicidas, Riesgo ambiental, Salud pública, Tecnologías.*

## Abstract

The population growth and the industrial development of our society have led to a significant increase in the demand for food. For this challenge, the excessive use of pesticides in agricultural production has been employed to safeguard crops from weeds and pests, boost their productivity, and aid in reducing vector-borne diseases. Among the most used are broad-spectrum pesticides. They are highly toxic and non-selective, causing harm to both targeted pests and other living organisms that come into contact with them after application. The extensive and widespread use of these pesticides indicates a significant risk of contaminating soil, air, water, vegetation, and humans. Therefore, they also pose a public health concern. This work examines recent technologies and advancements in the removal and reduction of pesticides in the environment, addressing the challenges in their application and updating the regulatory framework for pesticide use.

**Keywords—** *Environmental risk, Pesticides, Public health, Technologies.*

## I. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población en las últimas décadas ha sido paralelo al incremento en la producción de alimentos, siendo la agricultura una de las principales actividades económicas para contrarrestar la demanda alimentaria a nivel mundial. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), los plaguicidas son compuestos químicos de origen natural o sintético que se utilizan en actividades agrícolas para contrarrestar la presencia de plagas, incluidos insectos, roedores, hongos y plantas no deseadas (malezas) que dañan los cultivos, así como en salud pública para matar vectores de enfermedades, como los mosquitos; estableciendo que en todo el mundo se utilizan más de 1,000 plaguicidas diferentes. Se estima que, un tercio de los productos agrícolas se producen dependiendo de la aplicación de plaguicidas, es decir, sin el uso de estos, habría una pérdida del 78% en la producción de frutas, del 54% en la producción de hortalizas y del 32% en la producción de cereales [1]. Bajo este contexto, es necesario dimensionar la importancia de los plaguicidas de uso actual en el aumento de la productividad de los cultivos y su efectividad en la reducción de enfermedades transmitidas por vectores.

Por lo tanto, existe un creciente interés en el ámbito de la investigación en conocer su comportamiento una vez que

ingresan al medio ambiente, debido a que cuando son utilizados sobre un cultivo en específico pueden sufrir procesos de transferencia (o movimiento), tales como adsorción, lixiviación, volatilización, e incluso su parcial degradación, dando lugar a la producción de nuevas sustancias químicas que se trasladan de un compartimento ambiental a otro, incluyendo agua, suelo y atmósfera [2,3]. Es así como la detección de plaguicidas en agua, suelo y aire ha sido previa y ampliamente reportada [4–6], y desde 1984 se incluye su análisis en los “*Compendios de métodos para la determinación de compuestos orgánicos tóxicos en el ambiente*” de la Agencia de Protección del Medio Ambiente en USA (EPA 600/4-89-018) [7]. Para la primera década del siglo XXI, incrementaban los esfuerzos por monitorear residuos de plaguicidas en aguas superficiales durante temporadas de uno hasta cuatro años, evidenciando su presencia en distintos cuerpos acuáticos alrededor del mundo [8–10]. Recientemente, existen reportes de su detección en suministros de agua potable derivados de la recolección de lluvia en regiones semiáridas [11] lo que representa un riesgo potencial procedente de una exposición directa de consumo humano y un inminente problema de salud pública. Particularmente en México, García *et al* en [12] realizaron una recopilación de investigaciones relacionadas al uso de los plaguicidas y su efecto en el ambiente y la salud humana en las

últimas dos décadas. En dicho estudio, se reporta la presencia de residuos de plaguicidas en ecosistemas costeros, suelos, fauna silvestre y en muestras biológicas provenientes de trabajadores agrícolas, mujeres en edad reproductiva, niños, floricultores, expendedores y aplicadores urbanos.

Una vez corroborada su presencia en el medio ambiente, es conveniente precisar que la diversa naturaleza química de los plaguicidas marca su comportamiento e impacto ecotoxicológico, si bien algunos son identificados con una toxicidad aguda baja, muestran también una capacidad significativa para acumularse en tejidos y persisten en causar daños a largo plazo en especies acuáticas e incluso mamíferos [1,13,14]. Con relación a la salud humana existen estudios que asocian la exposición continua de plaguicidas con daño genético (directo e indirecto) y alteraciones cromosómicas, capaces de interferir con los sistemas corporales normales pudiendo provocar un amplia gama de tipos de cáncer [15,16].

En consecuencia, el presente trabajo tiene como objetivo la recopilación de los recientes avances que se han implementado en la búsqueda de la remoción de plaguicidas en distintos compartimentos del medio ambiente, donde se analizan las vías de acceso al medio ambiente, los tratamientos utilizados y eficiencias de remoción alcanzadas, así como los principales desafíos que representa su aplicación.

## II. PRINCIPALES VÍAS DE ACCESO AL MEDIO AMBIENTE Y EXPOSICIÓN HUMANA.

El debate sobre el uso de plaguicidas ha recobrado importancia en los últimos años. Por una parte, su aplicación se ha vuelto imprescindible para asegurar el cumplimiento de la demanda alimentaria y la disminución de enfermedades transmitidas por vectores, sin embargo, el empleo excesivo y deficientemente regulado ha provocado su recurrente ingreso al medio ambiente, tanto al sistema hidrológico, como al suelo y a la atmósfera. La Fig. 1 muestra de manera generalizada las principales fuentes de acceso al medio ambiente de los plaguicidas y las posibles vías de exposición humana. Entre las identificadas vías de acceso de los plaguicidas al medio ambiente se ha clasificado como difusas, a aquellas que derivan del uso cotidiano de los mismos sobre las cuales no se cuenta con un total control; siendo las puntuales aquellas que corresponden a una deficiente gestión de residuos tras la fabricación, distribución y desecho de residuos de plaguicidas.

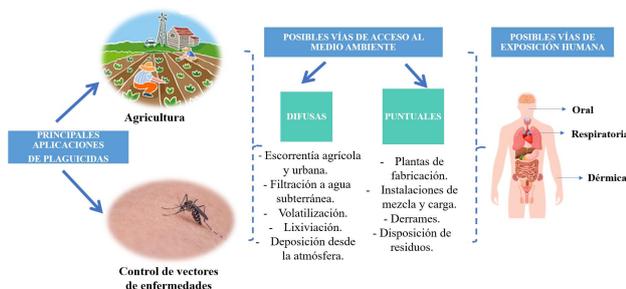


Fig. 1. Principales vías de acceso al medio ambiente de los plaguicidas y las posibles vías de exposición humana.

Tan pronto como el plaguicida ha sido utilizado para su fin en concreto, puede mantenerse e incluso transportarse en el medio ambiente conforme a sus propiedades fisicoquímicas, tales como la vida media ( $DT_{50}$ ), el coeficiente de distribución ( $K_{oc}$ ), coeficiente de partición octanol-agua ( $K_{ow}$ ), solubilidad en agua, índice de lixiviación, constante de disociación ( $pK_a$ ), grado de fotólisis ( $AP$ ) e hidrólisis acuosa ( $AH$ ), presión vapor ( $VP$ ), entre otras, lo que determinará que sea mayormente afín a encontrarse en cuerpos de agua, fijado en suelos o en la atmósfera [17,18]. De esta manera se ha implementado la evaluación del riesgo ambiental enfocado en relacionar la estimación de la máxima concentración de plaguicida que se libera al medio ambiente en condiciones reales de aplicación ( $PEC$ ) y la concentración ambiental sin efecto ( $PNEC$ ) sobre organismos acuáticos y terrestres; estableciendo que  $PEC/PNEC \geq 1$  se considera que el plaguicida de interés es una sustancia de alto riesgo [19]. Investigaciones previas demuestran la presencia de plaguicidas detectados a concentraciones que representan un riesgo ambiental de acuerdo con los establecido por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [8,20]. En este sentido es también de importancia considerar la exposición a mezclas de compuestos químicos, es decir, cuerpos de agua contaminados con diversos contaminantes, tales como plaguicidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos, fármacos, disruptores endócrinos, entre otros, ya que al ser evaluados sus efectos de manera individual, se podría estar generando resultados poco realistas o pobremente relevantes para las condiciones ambientales reales [21]. Dadas las circunstancias previamente descritas en el siguiente apartado de este documento se detallan una variedad de tratamientos que han sido desarrollados en búsqueda de la remoción de plaguicidas en el medio ambiente. Posteriormente se analizan las necesidades y perspectivas específicas de investigación futura que favorezcan a mejorar dicha problemática.

## III. TRATAMIENTOS PARA LA REMOCIÓN DE PLAGUICIDAS EN COMPARTIMENTOS AMBIENTALES.

Se han propuesto diversos tratamientos para la remoción e incluso eliminación de plaguicidas en el medio ambiente, los cuales han sido clasificados de manera general como físicos, químicos o biológicos, así como su potencial aplicación en agua, suelo y aire [22].

La Tabla I muestra brevemente los tratamientos mayormente aplicados de acuerdo con reportes previos en la literatura, como puede observarse los procesos avanzados de oxidación podrían considerarse un tratamiento para la eliminación de plaguicidas en agua, suelo y aire; sin embargo, se requiere la formación de agentes altamente oxidantes que permiten no solamente la degradación de este tipo de compuestos químicos sino también la formación de metabolitos altamente tóxicos, inclusive más que el plaguicida original, aunado a bajos porcentajes de eficiencia en suelo y aire [6].

En cuanto a los tratamientos biológicos, estos son considerados atractivos por su bajo costo y respeto con el medio ambiente en comparación con los tratamientos físicos y químicos. Así mismo se describen tres tipos de biorremediación

con microorganismos aplicados principalmente en suelo de acuerdo a la Tabla I: remediación mediante atenuación natural mejorada (aprovechando las capacidades naturales de los microorganismos presentes en la matriz), bioaumentación (introducción de microorganismos no nativos y/o modificados genéticamente) y bioestimulación (adición de nutrientes) [1,22]. En relación con la viabilidad de la eliminación de plaguicidas organoclorados (OCPs) en suelo, mediante bioestimulación, Islas *et al.*, detectaron un consorcio de bacterias y hongos tolerantes a concentraciones de hasta 20 mg/Kg de OCPs [23]. De igual forma, se han desarrollado biosurfactantes a partir de microorganismos como *Pseudomonas* y *Rhodococcus* para su aplicación en la degradación de herbicidas tales como clorpirifos y trifluralina, donde se reportan porcentajes de degradación del 39 al 51% [24]. No obstante, es relevante y previamente reportado que diversos factores propios del compartimento ambiental pueden influir en la eficiencia de los tratamientos biológicos, además de presentar desventajas relacionadas a largos procesos de degradación, baja implementación a nivel escala, requerimientos de grandes áreas para contener el agua o suelo contaminado, así como producción de malos olores.

Por su parte, dentro de los tratamientos físicos, la adsorción representa una de las técnicas de bajo costo, aplicación a nivel escala y con los mayores porcentajes de remoción de contaminantes [25–27]. La obtención y versatilidad de los materiales adsorbentes en la actualidad ha permitido altas tasas de eficiencia en la remoción de los plaguicidas, principalmente en agua, donde han sido frecuentemente detectados debido a su transporte desde el suelo y la atmósfera [28]. Tal como lo demuestra desde 1996 Zheng *et al.*, donde evaluaron la adsorción y desorción de dos herbicidas (metolaclor y pendimetalina) y un nematocida (cadusafos) en seis tipos de suelos (ferralsol, regosol, andosol, fluvisol y dos vertisoles), obteniendo el siguiente orden de adsorción de los tres plaguicidas: pendimetalina < cadusafos < metolaclor e identificando que los suelos con mayor contenido de arcilla o arena mostraron tendencia a adsorber los tres plaguicidas: vertisoles > ferralsol > regosol > andosol > fluvisol. Finalmente, los autores del estudio indicaron que la pendimetalina podría considerarse como un compuesto no lixiviable, mientras que cadusafos y el metolaclor exhiben una tendencia moderada a la lixiviación [29]. Por estas razones a continuación, se detallan características de materiales adsorbentes de diverso origen, así como estudios donde los implementaron en la remoción de plaguicidas en matrices ambientales.

De manera generalizada, los materiales adsorbentes con aplicaciones en la remediación del medio ambiente reportados en la literatura incluyen al carbón activado, residuos agrícolas e industriales, polímeros sintéticos y naturales, arcillas, zeolitas y materiales adsorbentes inorgánicos, mejor conocidos como redes organometálicas (MOFs) [30]. El éxito de las MOFs en su empleo sobre la remoción de plaguicidas es derivado de su alta porosidad y gran área de superficie de contacto, factores que deben estudiarse previamente para su control en aplicaciones a nivel escala [31]. La Tabla II concentra los resultados obtenidos en investigaciones previas, donde se

detalla la eficiencia de los distintos materiales adsorbentes desarrollados hasta el momento. Es así como Liu *et al.* [32] fabricaron un material adsorbente organometálico ZIF-8/nanotubos de carbón magnético (MWCNT) para eliminación de ocho plaguicidas organofosforados en mezcla (triazofos, diazinon, fosalone, profenofos, metidation, etoprop, sulfotep e isazofos) del agua y suelo, removiendo hasta 2 mg/L de cada plaguicida con tan solo 15 min de contacto, lo que podría considerarse un potencial aporte para la remediación de dos compartimentos ambientales con un solo material, además de la posibilidad de remover una mezcla de plaguicidas que es una práctica usual en las actividades agrícolas. Otra de las aplicaciones de materiales adsorbentes inorgánicos es el trabajo realizado por Yang *et al.* [33] donde desarrollaron un adsorbente capaz de detectar y eliminar glifosato en agua, identificado como  $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{SiO}_2@\text{UiO}-67$  con una capacidad de adsorción de 256.54 mg/g, pudiendo ser reutilizado, además de poder detectarlo en muestras acuosas hasta en un límite de 0.093 mg/L, concluyendo los autores que los adsorbentes basados en MOFs son prometedores para la detección y eliminación sincrónica de plaguicidas organofosforados, presentando una opción viable para monitorear la calidad del agua y tratamiento de aguas residuales. De igual forma, se ha estudiado la viabilidad de fabricar adsorbentes mixtos, a partir de redes organometálicas y residuos agrícolas, tales como MIL-101(Fe)/bagazo de caña de azúcar utilizado en la remoción de fosfatos provenientes de plaguicidas, los resultados mostraron una capacidad de adsorción mucho mayor que los materiales utilizados de manera individual, alcanzando el 99.5% de remoción en una muestra simulada de agua residual y manteniendo esta eficiencia hasta por cinco ciclos de reúso [34]. En cuanto a la implementación de materiales adsorbentes de origen natural, en el estudio realizado por Harabi *et al.* [35] se analiza la adsorción del ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) y carbofurano mediante el uso de carbones activados obtenidos a partir de huesos de durazno, dicho material bajo condiciones de síntesis controladas alcanzó un área superficial de 1182 m<sup>2</sup>/g, confirmando un alta porosidad, propiedad esencial para su aplicación en la remoción de plaguicidas, obteniendo una mayor capacidad de adsorción para el 2,4-D en comparación con el carbofurano (aprox. 500 y 250 mg/g, respectivamente). En comparación, bioadsorbentes fabricados a partir de aserrín y residuos de corcho alcanzaron capacidades máximas de adsorción de 85.47 mg/g en la remoción de 4,4'-Dichlorodiphenyltrichloroethane (DDT) [36]. Además de una remoción del 54% del halosulfuron metil mediante la adsorción a partir de semillas del árbol de Neem [36].

Con respecto al empleo de subproductos industriales como adsorbentes, en el estudio realizado por Hu *et al.* [37] se investigó la adsorción de glifosato por lodo de aluminio en forma deshidratada (DAS) y en forma líquida (LAS), el cual es un subproducto del tratamiento de agua residual.

Los resultados indicaron que el lodo de aluminio tuvo una capacidad de adsorción de 85.9 mg/g para DAS y 113.6 mg/g para LAS, demostrando el potencial uso como adsorbente eficiente y rentable para la eliminación de glifosato en comparación del humus, minerales arcillosos e hidróxidos

dobles estratificados (LDH). Finalmente, dentro de los avances más novedosos en la remoción de plaguicidas se encuentra la fabricación de materiales adsorbentes soportados a base de MOFs, aglutinantes y plastificantes conocidos como monolitos reportando aplicaciones en la eliminación del ácido metilclorofenoxipropiónico (MCP) en agua utilizando quitosano/UiO-66 en dicho formato [39].

TABLA I  
TRATAMIENTOS APLICADOS A LA ELIMINACIÓN DE PLAGUICIDAS EN EL MEDIO AMBIENTE. [31,38]

Compartimento Ambiental	Tipos de Tratamientos	
Agua	Físicos:	Adsorción. Filtración. Tecnología de membranas.
	Químicos:	Coagulación. Procesos avanzados de oxidación. Tratamientos electroquímicos. Lodos activados.
	Biológicos:	Reactores anaerobios. Biosurfactantes.
Suelo	Físicos:	Lavado de suelos.
	Químicos:	Tratamientos electroquímicos. Procesos avanzados de oxidación.
	Biológicos:	Bioaumentación. Bioestimulación. Bioventeo.
Aire	Físicos:	Adsorción. Tecnología de membranas.
	Químicos:	Procesos avanzados de oxidación.
	Biológicos:	Biofiltros. Biolavadores.

#### IV. DESAFÍOS EN LA ELIMINACIÓN DE PLAGUICIDAS EN EL MEDIO AMBIENTE

Bajo el contexto expuesto, autores han propuesto que los esfuerzos a nivel mundial para la eliminación de plaguicidas en el medio ambiente deberían ser enfocados al uso y emisión de los mismos [40]. Lo primordial entonces, es entender que los procesos de aplicación y disposición de los residuos generados del uso de plaguicidas influyen significativamente en la permanencia y movimiento de estos a través de los diversos compartimentos ambientales. Fred Fishel *et al.* en [4] propone una serie de recomendaciones prácticas para reducir las emisiones de plaguicidas principalmente en compartimentos acuosos, iniciando por un manejo íntegro de las principales plagas causantes de daño potencial en cultivos, de esta manera podrían ser efectivamente identificadas, buscando así la utilización de la concentración mínima posible del plaguicida seleccionado rigurosamente y que presente menor impacto ambiental; posteriormente sugiere evaluar la vulnerabilidad del

área y el clima de la temporada dónde será aplicado el plaguicida; por último, un escrupuloso almacenamiento y manejo de los residuos generados. Si bien las regulaciones a nivel nacional [41] e internacional [42] han establecido límites permisibles en el medio ambiente y adecuado manejo de los residuos de plaguicidas, las investigaciones alrededor del mundo demuestran que estos han sido excedidos. Es precisamente uno de los primeros desafíos, contar con la metodología e infraestructura analítica para una exacta, precisa y confiable determinación de plaguicidas en compartimentos del medio ambiente [43], aunado al hecho de que las matrices ambientales requiere análisis de mayor complejidad debido a su propia naturaleza, las posibles interferencias presentes y bajas concentraciones en las que pueden encontrarse los plaguicidas dentro de las mismas [44]. En última instancia, uno de los mayores desafíos a vencer, es el contexto socioeconómico, de acuerdo con Peña *et al.* [45] en los últimos diez años en Latinoamérica se han incrementado los estudios sobre la presencia y el impacto toxicológico de contaminantes en el medio ambiente, evidenciando que los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales agrícolas e industriales presentan el mayor número de contaminantes detectados.

TABLA II  
APLICACIÓN DE MATERIALES ADSORBENTES EN LA REMOCIÓN DE PLAGUICIDAS.

Plaguicida(s)	Material Adsorbente	Eficiencia de Remoción (%) y Compartimento Ambiental	Referencia
Triazofos Diazinon Fosalona Profenofos Metidation Etoprop Sulfotep Isazofos	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> - MWCNT	Remoción: 96.18 % Muestras: agua y suelo.	[32]
Glifosato	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> @ UiO-67	Remoción: 90.6 – 100.9 % Muestras: agua.	[33]
Glifosato	MIL-101(Fe) / bagazo de caña	Remoción: 99.5 % Muestras: agua.	[34]
2,4-D Carbofurano	Carbón activado (huesos de durazno)	Capacidad de adsorción: Glifosato 500 mg/g Carbofurano 250 mg/g Muestras: agua.	[35]
Glifosato	Lodo de aluminio	Capacidad de adsorción: 113.6 mg/g Muestras: agua.	[37]

#### V. CONCLUSIONES

Los niveles de plaguicidas en el entorno ecológico y con directa exposición humana siguen incrementando a niveles críticos, por esta razón el desarrollo e implementación de tecnologías que permitan su eliminación, en términos de degradación o remoción requieren de un mayor número de investigaciones, apoyos económicos, aplicaciones escalables y

riguroso manejo para evitar daños mayores. En este sentido, la selección de un método de tratamiento para la eliminación de plaguicidas en el medio ambiente dependerá de su origen y afinidad con la zona donde es detectado. Hasta el momento, el empleo de técnicas de eliminación híbridas (es decir, que puedan conjuntar tratamientos fisicoquímicos y biológicos) ofrece oportunidades potenciales para desarrollar técnicas innovadoras en la eliminación de plaguicidas, reduciendo así, los tiempos de remediación y costos. Así mismo, se reportan muchas técnicas asequibles, como la remoción mediante lodos activados y adsorbentes agrícolas para la eliminación de altos niveles de diferentes plaguicidas. La recopilación de estos estudios refleja la importancia de contar con técnicas que puedan mejorar las condiciones de los compartimentos ambientales y disminuir el impacto ecológico y de salud pública derivado del uso excesivo de plaguicidas.

## REFERENCIAS

- [1] M. Tudi, H.D. Ruan, L. Wang, J. Lyu, R. Sadler, D. Connell, C. Chu, D.T. Phung, Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment, *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 18 (2021) 1–24. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>.
- [2] I. Vázquez-Tapia, T. Salazar-Martínez, M. Acosta-Castro, K.A. Meléndez-Castolo, J. Mahlknecht, P. Cervantes-Avilés, M. V. Capparelli, A. Mora, Occurrence of emerging organic contaminants and endocrine disruptors in different water compartments in Mexico – A review, *Chemosphere*. 308 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136285>.
- [3] J.M. Galindo-Miranda, C. Guizar-González, E.J. Becerril-Bravo, G. Moeller-Chávez, E. León-Becerril, R. Vallejo-Rodríguez, Occurrence of emerging contaminants in environmental surface waters and their analytical methodology - A review, *Water Sci. Technol. Water Supply*. 19 (2019) 1871–1884. <https://doi.org/10.2166/ws.2019.087>.
- [4] M. Kristoforović-Ilić, Pesticides and the environment., *Med. Pregl*. 57 (2004) 523–535. <https://doi.org/10.2298/MPNS0412523K>.
- [5] V. Yusá, C. Coscollá, W. Mellouki, A. Pastor, M. de la Guardia, Sampling and analysis of pesticides in ambient air, *J. Chromatogr. A*. 1216 (2009) 2972–2983. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2009.02.019>.
- [6] D.P. Baldissarelli, G.D.L.P. Vargas, E.P. Korf, L. Galon, C. Kaufmann, J.B. Santos, Remediation of soils contaminated by pesticides using physicochemical processes: A brief review, *Planta Daninha*. 37 (2019) 1–13. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582019370100054>.
- [7] EPA Method TO, Method TO-10A: Compendium of Methods for the Determination of Toxic Organic Compounds in Ambient Air Second Edition Compendium Method TO-10A Determination Of Pesticides And Polychlorinated Biphenyls In Ambient Air Using Low Volume Polyurethane Foam (PUF, System. (1999) 1–37.
- [8] J.B. Leyva Morales, J.B. Valdez Torres, P. de J. Bastidas Bastidas, M.Á. Angulo Escalante, J.I. Sarmiento Sánchez, A.L. Barraza Lobo, C. Olmeda Rubio, C. Chaidez Quiroz, Monitoring of pesticides residues in northwestern Mexico rivers, *Acta Univ*. 27 (2017) 45–54. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1203>.
- [9] A. Deknock, N. De Troyer, M. Houbraken, L. Dominguez-Granda, I. Nolivos, W. Van Echelpoel, M.A.E. Forio, P. Spanoghe, P. Goethals, Distribution of agricultural pesticides in the freshwater environment of the Guayas river basin (Ecuador), *Sci. Total Environ*. 646 (2019) 996–1008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.185>.
- [10] A. Derbalah, R. Chidya, W. Jadoon, H. Sakugawa, Temporal trends in organophosphorus pesticides use and concentrations in river water in Japan, and risk assessment, *J. Environ. Sci. (China)*. 79 (2019) 135–152. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.11.019>.
- [11] L.I. Mas, V.C. Aparicio, E. De Gerónimo, J.L. Costa, Pesticides in water sources used for human consumption in the semiarid region of Argentina, *SN Appl. Sci*. 2 (2020) 1–18. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2513-x>.
- [12] J. García Hernández, J.B. Leyva Morales, I.E. Martínez Rodríguez, M.I. Hernández Ochoa, M.L. Aldana Madrid, A.E. Rojas García, M. Betancourt Lozano, N.E. Perez Herrera, J.H. Perera Rios, Estado actual de la investigación sobre plaguicidas en México, *Rev. Int. Contam. Ambient*. 34 (2018) 29–60. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.esp01.03>.
- [13] Occurrence, spatio-temporal distribution, and human health risk assessment of pesticides in fish.pdf, (n.d.).
- [14] P. Benítez, L. Miranda, Contaminación de aguas superficiales por residuos de plaguicidas en Venezuela y otros países de latinoamérica, *Rev. Int. Contam. Ambient*. 29 (2013) 7–23.
- [15] D.S. Valbuena, M.P. Meléndez-Flórez, V.E. Villegas, M.C. Sánchez, M. Rondón-Lagos, Daño celular y genético como determinantes de la toxicidad de los plaguicidas, *Cienc. En Desarro*. 11 (2020) 25–42. <https://doi.org/10.19053/01217488.v11.n2.2020.11245>.
- [16] J.A. Kapeleka, E. Sauli, P.A. Ndakidemi, Pesticide exposure and genotoxic effects as measured by DNA damage and human monitoring biomarkers, *Int. J. Environ. Health Res*. 31 (2021) 805–822. <https://doi.org/10.1080/09603123.2019.1690132>.
- [17] Z. Ahmad, H.F. Alkahem Al-Balawi, K.A. Al-Ghanim, F. Al-Misned, S. Mahboob, Risk assessment of malathion on health indicators of catfish: Food and water security prospective research, *J. King Saud Univ. - Sci*. 33 (2021) 101294. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.101294>.
- [18] M. Drahansky, M. Paridah, A. Moradbak, A. Mohamed, F. Abdulwahab taiwo Owolabi, M. Asniza, S.H. Abdul Khalid, We are IntechOpen, the world's leading publisher of Open Access books Built by scientists, for scientists TOP 1 %, *Intech. i* (2016) 13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57353>.
- [19] European Commission, Document on Risk Assessment, *Tech. Guid. Doc. Ris. Assess. Part II*. (2008) 337. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/9aebb292-39c5e4b9c-b4cb-97fb02d9bea2>.
- [20] B.A. Rodríguez-Aguilar, L.M. Martínez-Rivera, R. Muñoz-Valencia, N. Mercado-Silva, L.I. Iñiguez-Dávalos, A.A. Peregrina-Lucano, Pesticide Distribution and Ecotoxicological Risk in the Ayuquila-Armería River, *Rev. Int. Contam. Ambient*. 38 (2022) 301–315. <https://doi.org/10.20937/RICA.54180>.
- [21] M.I. Vasquez, A. Lambrianides, M. Schneider, K. Kümmerer, D. Fatta-Kassinos, Environmental side effects of pharmaceutical cocktails: What we know and what we should know, *J. Hazard. Mater.* 279 (2014) 169–189. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.069>.
- [22] A. Marican, E.F. Durán-Lara, A review on pesticide removal through different processes, *Environ. Sci. Pollut. Res*. 25 (2018) 2051–2064. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0796-2>.
- [23] A. Islas-García, L. Vega-Loyo, R. Aguilar-López, B. Xoconostle-Cázares, R. Rodríguez-Vázquez, Evaluation of hydrocarbons and organochlorine pesticides and their tolerant microorganisms from an agricultural soil to define its bioremediation feasibility, *J. Environ. Sci. Heal. - Part B Pestic. Food Contam. Agric. Wastes*. 50 (2015) 99–108. <https://doi.org/10.1080/03601234.2015.975605>.
- [24] C. Lamilla, H. Schalchli, G. Briceño, B. Leiva, P. Donoso-Piñol, L. Barrientos, V.A.L. Rocha, D.M.G. Freire, M.C. Diez, A pesticide biopurification system: A source of biosurfactant-producing bacteria with environmental biotechnology applications, *Agronomy*. 11 (2021). <https://doi.org/10.3390/agronomy11040624>.
- [25] S. Yao, J. Zhang, D. Shen, R. Xiao, S. Gu, M. Zhao, J. Liang, Removal of Pb (II) from water by the activated carbon modified by nitric acid under microwave heating, *J. Colloid Interface Sci*. 463 (2016) 118–127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.10.047>.
- [26] H.T. Minh Thanh, T.T. Thu Phuong, P.T. Le Hang, T.T. Tam Toan, T.N. Tuyen, T.X. Mau, D.Q. Khieu, Comparative study of Pb (II) adsorption onto MIL-101 and Fe-MIL-101 from aqueous solutions, *J. Environ. Chem. Eng*. 6 (2018) 4093–4102. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.021>.
- [27] P.W. Seo, B.N. Bhadra, I. Ahmed, N.A. Khan, S.H. Jung, Adsorptive Removal of Pharmaceuticals and Personal Care Products from Water with Functionalized Metal-organic Frameworks: Remarkable Adsorbents with Hydrogen-bonding Abilities, *Sci. Rep*. 6 (2016) 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep34462>.
- [28] L.A.M. Mahmoud, R.A. Dos Reis, X. Chen, V.P. Ting, S. Nayak, Metal-Organic Frameworks as Potential Agents for Extraction and Delivery of Pesticides and Agrochemicals, *ACS Omega*. 7 (2022) 45910–45934. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05978>.

- [29] S.-Q. Zheng, J.-F. Cooper, Environmental Contamination and Toxicology Adsorption, Desorption, and Degradation of Three Pesticides in Different Soils, *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 30 (1996) 15–20.
- [30] I.A. Saleh, N. Zouari, M.A. Al-Ghouti, Removal of pesticides from water and wastewater: Chemical, physical and biological treatment approaches, *Environ. Technol. Innov.* 19 (2020) 101026. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101026>.
- [31] W. Liu, N.B. Sutton, H.H.M. Rijnaarts, A.A.M. Langenhoff, Pharmaceutical removal from water with iron- or manganese-based technologies: A review, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 46 (2016) 1584–1621. <https://doi.org/10.1080/10643389.2016.1251236>.
- [32] G. Liu, L. Li, X. Huang, S. Zheng, X. Xu, Z. Liu, Y. Zhang, J. Wang, H. Lin, D. Xu, Adsorption and removal of organophosphorus pesticides from environmental water and soil samples by using magnetic multi-walled carbon nanotubes @ organic framework ZIF-8, *J. Mater. Sci.* 53 (2018) 10772–10783. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2352-y>.
- [33] Q. Yang, J. Wang, X. Chen, W. Yang, H. Pei, N. Hu, Z. Li, Y. Suo, T. Li, J. Wang, The simultaneous detection and removal of organophosphorus pesticides by a novel Zr-MOF based smart adsorbent, *J. Mater. Chem. A.* 6 (2018) 2184–2192. <https://doi.org/10.1039/c7ta08399h>.
- [34] R. yi Zhou, J. xia Yu, R. an Chi, Selective removal of phosphate from aqueous solution by MIL-101(Fe)/bagasse composite prepared through bagasse size control, *Environ. Res.* 188 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109817>.
- [35] S. Harabi, S. Guiza, A. Álvarez-Montero, A. Gómez-Avilés, M. Bagané, C. Belver, J. Bedia, Adsorption of Pesticides on Activated Carbons from Peach Stones, *Processes.* 12 (2024). <https://doi.org/10.3390/pr12010238>.
- [36] H.K. Okoro, S. Pandey, C.O. Ogunkunle, C.J. Ngila, C. Zvinowanda, I. Jimoh, I.A. Lawal, M.M. Orosun, A.G. Adeniyi, Nanomaterial-based biosorbents: Adsorbent for efficient removal of selected organic pollutants from industrial wastewater, *Emerg. Contam.* 8 (2022) 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2021.12.005>.
- [37] Y.S. Hu, Y.Q. Zhao, B. Sorohan, Removal of glyphosate from aqueous environment by adsorption using water industrial residual, *Desalination.* 271 (2011) 150–156. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.12.014>.
- [38] V. Geissen, H. Mol, E. Klumpp, G. Umlauf, M. Nadal, M. van der Ploeg, S.E.A.T.M. van de Zee, C.J. Ritsema, Emerging pollutants in the environment: A challenge for water resource management, *Int. Soil Water Conserv. Res.* 3 (2015) 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.03.002>.
- [39] A.A. Rico-Barragán, E. Bretón-Jiménez, E. Soto-Regalado, M. Loredó Cancino, N. Davila-Guzman, Estructuración de armazones organometálicos en monolitos para aplicaciones medioambientales, *Quim. Hoy.* 11 (2022) 1–7. <https://doi.org/10.29105/qh11.02-286>.
- [40] M.Á. Álvarez Merino, F. Carrasco Marín, Aplicaciones de Adsorbentes y Catalizadores en Adcesos Medioambientales y Energéticos, 2016.
- [41] DOF, NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua, *D. Of. La Fed.* (2022) 123.
- [42] D.J. Hamilton, Á. Ambrus, R.M. Dieterle, A.S. Felsot, C.A. Harris, Commission on agrochemicals and the environment \* Regulatory limits for pesticide residues in water (IUPAC Technical Report), *Pure Appl. Chem.* 75 (2003) 1123–1155.
- [43] L. Ravelo Pérez, Metodologías analíticas alternativas para la determinación de plaguicidas en aguas y productos agroalimentarios, 2010.
- [44] G. Peña-Velasco, L. Hinojosa-Reyes, M. Escamilla-Coronado, G. Turnes-Palomino, C. Palomino-Cabello, J. L. Guzmán-Mar, Analytica Chimica Acta Iron metal-organic framework supported in a polymeric membrane for solid-phase extraction of antiinflammatory drugs, 1136 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.09.049>.
- [45] C. Peña-Guzmán, S. Ulloa-Sánchez, K. Mora, R. Helena-Bustos, E. Lopez-Barrera, J. Alvarez, M. Rodriguez-Pinzón, Emerging pollutants in the urban water cycle in Latin America: A review of the current literature, *J. Environ. Manage.* 237 (2019) 408–423. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.100>.