

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v6i11.0086>

MÉTODOS PARA LA DEGRADACIÓN DE PESTICIDAS (CARBAMATOS) EN MATRICES ACUOSAS

METHODS FOR THE DEGRADATION OF PESTICIDES (CARBAMATES) IN AQUEOUS MATRICES

Cevallos-de la Cruz Richard Esneyder^{1*}; García-Mujica Patricio Gabriel¹; Gómez-Salcedo Yunet¹; Rodríguez-Díaz Joan Manuel¹

¹Carrera de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, UTM. Portoviejo, Ecuador.

*Correo: rcevallos4863@utm.edu.ec

Resumen

El crecimiento poblacional que registra el mundo en los últimos años generó la necesidad de incrementar la producción agrícola de alimentos. Esto tiene asociado el empleo de pesticidas sintéticos que tienen como objetivo la protección de los cultivos y aumentar volumen de producción. Entre los productos químicos sintéticos para la protección de los cultivos se encuentran los carbamatos, que son pesticidas derivados de ácidos N-metil o dimetil carbámico, con propiedades óxido reductoras que incluyen nematicidas, insecticidas, herbicidas y fungicidas. Estos son pesticidas con una toxicidad aguda media, aunque dentro de esta familia hay compuestos que son altamente tóxicos. Como consecuencia del uso indiscriminado de pesticidas, en la actualidad se hallan residuos de estas sustancias en los cuerpos de agua y representan un riesgo potencial para la salud humana y animal, así como para el ambiente. Se han desarrollado varios métodos de remoción de carbamatos como son: oxidación, adsorción, biodegradación con microorganismos y procesos de oxidación avanzada (POAs). El objetivo de este trabajo es analizar los métodos que se proponen para el tratamiento de matrices acuosas con presencia de carbamatos, a través de la valoración de las ventajas y desventajas de cada uno en cuanto a la eficiencia de remoción del pesticida.

Palabras clave: Carbamatos, oxidación, adsorción, biodegradación con microorganismos, procesos de oxidación avanzada.

Abstract

The population growth promoted increases in agricultural production. This is associated with the use of synthetic pesticides that aim to protect crops and increase production volume. Synthetic crop protection chemicals include carbamates, which are pesticides derived from N-methyl or dimethyl carbamic acids, with oxide reducing properties and include nematicides, insecticides, herbicides, and fungicides. These are pesticides with a medium acute toxicity. However, in this family, there are compounds that are highly toxic. As a consequence of the indiscriminate use of pesticides, currently residues of these substances are found in water bodies and represent a potential risk to human and animal health, as well as to the environment. Several methods of carbamate removal have been developed, such as: oxidation, adsorption, biodegradation with microorganisms and advanced oxidation processes (AOPs). The objective of this work is to analyze the methods that are proposed for the treatment of aqueous matrices with the presence of carbamates, through the evaluation of the advantages and disadvantages of each one in terms of the efficiency of pesticide removal.

Keywords: Carbamates, oxidation, adsorption, biodegradation with microorganisms, advanced oxidation processes.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 28 de julio de 2021.

Fecha de aceptación: 09 de septiembre de 2021.

Fecha de publicación: 10 de enero de 2023.

1. Introducción

Entre los años 1900 y 2000, el crecimiento poblacional a nivel mundial se disparó de 1500 millones a aproximadamente 6100 millones, correspondiendo a un incremento tres veces mayor al registrado históricamente (Carvalho, 2017). Asociado a este crecimiento poblacional, se implementó un modelo agrícola industrial basado en el empleo intensivo y extensivo de productos químicos sintéticos (Benítez-Díaz, 2013). En este contexto, el impacto de este modelo en la producción de alimentos es positivo en términos de rendimiento agrícola, constituyendo una herramienta para erradicar el hambre en el mundo (Benítez-Díaz, 2013). La producción de plaguicidas incrementa en un 11% anualmente e incluyen varios grupos como los organoclorados, organofosforados, carbamatos, peretroides, reguladores de crecimiento, neonicotinoides, y en la actualidad bioplaguicidas (Carvalho, 2017).

Los pesticidas fueron diseñados para funcionar con un riesgo mínimo sobre la salud de las personas que trabajan directamente con estas

sustancias y de los consumidores de los productos agrícolas, así como sobre el ambiente (Cruz Aquino & Placencia Medina, 2019). Sin embargo, como consecuencia del uso indiscriminado de pesticidas, en la actualidad se hallan residuos de estas sustancias en los cuerpos de agua y representan un riesgo potencial en la salud humana y animal (Cruz-González et al., 2017). La contaminación de los cuerpos de agua se relaciona a fuentes puntuales o fuentes difusas (Cossi, 2018). Las fuentes puntuales incluyen la descarga de residuos industriales durante el proceso de producción, por la descarga de las aguas del lavado de equipos, por su aplicación directa al agua (intencional o accidentalmente) y por las aplicaciones aéreas en superficies cercanas a los cuerpos de agua (Arroyave Rojas & Garcés Giraldo, 2011). Las fuentes no puntuales incluyen la difusión en un campo agrícola o en un gran área de césped, y en las fuentes subterráneas ocurren cuando las corrientes superficiales contaminadas tienen interacción con aguas subterráneas poco profundas (Cossi, 2018). El 98% de los insecticidas y el 95% de los

herbicidas no cumplen con el objetivo de llegar a los cultivos ya que se dispersan a través del viento y el agua, durante su aplicación. Por otra parte, los plaguicidas tienen transformaciones químicas posteriores a la de su manipulación en el campo, además de ser resistentes a la degradación por su naturaleza química estable (Campos, 2018). Actualmente los peligros de uso inadecuado de pesticidas comprometen la sostenibilidad de la agricultura, siendo los países en vías de desarrollo los más afectados debido a que el incremento de la producción agrícola repercute en el deterioro de los recursos naturales y la salud pública (Benítez-Díaz, 2013).

Un grupo de plaguicidas de interés son los carbamatos, desarrollados para reemplazar a los pesticidas organofosforados (Piel et al., 2019). Poseen un amplio espectro de actividad biológica como insecticidas, fungicidas o herbicidas (Rodríguez-Rodríguez et al., 2017). Sin embargo, son potentes contaminantes de los recursos hídricos superficiales debido a su elevada toxicidad (Raut-Jadhav et al., 2016a). Esta problemática

asociada al empleo de plaguicidas obliga a que estas sustancias deban ser sometidas a estudios para evaluar los riesgos ambientales y sanitarios que generan, así como obtener información que permita tomar decisiones sobre su gestión y manejo (Montico, 2015). El objetivo de este trabajo es analizar los métodos que se proponen para el tratamiento de matrices acuosas con presencia de carbamatos, a través de la valoración de las ventajas y desventajas de cada uno en cuanto a la eficiencia de remoción del pesticida.

2. Carbamatos

Los carbamatos son ésteres derivados de los ácidos N-metil o dimetil carbámico, tiene propiedades oxidoreductoras e incluyen insecticidas, nematocidas, herbicidas y fungicidas. Estos pesticidas pueden formar compuestos mutágenos potentes como los N-nitrosocarbamato (Blanco & Marquina, 2013). Se caracterizan por ser liposolubles y presentar toxicidad variable en humanos. Estas sustancias ingresan al organismo por vía respiratoria, digestiva o cutánea y ejercen un efecto inhibitorio de la acetilcolinesterasa

(AChE), enzima que degrada la acetilcolina, la que actúa como neurotransmisor en mamíferos e insectos. A pesar de ello, no se acumulan en el organismo ya que tienen una vida media corta (Blanco & Marquina, 2013).

En Latinoamérica, de manera general, se ha registrado un incremento en el uso de los plaguicidas pertenecientes a la familia de los carbamatos (Díaz et al., 2017). Estos pesticidas son utilizados para el control de plagas en diversos cultivos de esta parte del mundo (Martínez-Valenzuela & Gómez-Arroyo, 2007). Según Benítez-Díaz (2013), en Venezuela,

Colombia, Ecuador y México se ha detectado la presencia de plaguicidas, entre los que destacan los carbamatos, en aguas superficiales que se encuentran cerca de la zona de producción agrícola, en concentraciones superiores a las 100 ppb, valor que establece la Organización Mundial de la Salud (OMS) como límite permisible en los cuerpos de aguas superficiales. En la tabla 1 se presentan los carbamatos empleados en diferentes países de Latinoamérica. La información se obtuvo de las fuentes oficiales de comunicación de los ministerios encargados de la regulación de los pesticidas en esos países.

Tabla 1.
Lista de carbamatos utilizados en Latinoamérica.

Países de Latinoamérica	Carbamatos empleados
Bolivia	Ethomyl, Thiodicarb, Cabofuran, Pirimicarb, Carbosulfan, Carbendazim, Benomyl.
Chile	Carbaryl, Methomyl, Oxamyl, Pirimicarb, Fenoxicarb
Colombia	Carbaryl, Methiocarb, Methomyl, Oxamyl, Thiodicarb, Cabofuran, Propamocarb, Carbendazim, Benomyl
Ecuador	Carbaryl, Methiocarb, Methomyl, Oxamyl, Thiodicarb, Carbosulfan, Carbendazim, Benomyl
México	Carbaryl, Methiocarb, Methomyl, Oxamyl, Thiodicarb, Cabofuran, Propamocarb, Pirimicarb, Aldicarb, Bendiocarb, Fenoxicarb, Propoxur, Carbosulfan, Carbendazim, Benomyl, Fenoxicarb.
Perú	Carbaryl, Methomyl, Thiodicarb, Propamocarb, Carbendazim, Benomyl

Fuente: Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad Alimentaria de Bolivia (2011), Servicio Agrícola y Ganadero de Chile (2021), Instituto Colombiano Agropecuario (2020), Ministerio de Agricultura Ganadería Agua y Pesca de Ecuador (2020), Gobierno de México (s. f.) y Ministerio de Agricultura de Perú (s.f.).

Como se observa en la tabla 1, México es el único país de Latinoamérica que tiene permitido el uso del Aldicarb a pesar de que es el pesticida carbamato que representa un mayor riesgo para la salud humana. El Carbofuran que se considera un carbamato de toxicidad aguda está autorizado por Bolivia y México para la actividad agrícola pese al gran riesgo para la salud de los agricultores que lo manejan. El Carbarilo y el Metomilo son los pesticidas más comunes en la región, ya que se usan para la protección de cultivos cítricos, maíz, papa, tomate, manzana, lenteja, frejol, melón, algodón y trigo.

Muchos de los carbamatos que son empleados en América Latina están restringidos y prohibidos en Europa debido a la alta peligrosidad que representan para el ambiente y la salud de los seres humanos. Estudios realizados han demostrado que estos pueden causar problemas de fertilidad, malformaciones, cáncer, daños en el sistema respiratorio y alergias, entre otras patologías (Mena-Espino, 2015). Entre los pocos carbamatos que se emplean en la Unión Europea están el Bendiocarb, Propoxur, Pirimicarb,

Carbendazim y Carbaryl (RAINFOREST ALLIANCE, 2017). Estos se caracterizan por tener una solubilidad entre 40-2700 ppm, valores inferiores al del Aldicarb, por ejemplo, que alcanza los 60000 ppm (Rani & Shanker, 2018). Por otra parte, sus formulaciones no presentan criterios de cancerigenocidad, mutagenicidad ni toxicidad reproductiva en el hombre ni en animales de importancia para el ecosistema como las abejas (RAINFOREST ALLIANCE, 2017).

2.1. Problemas de contaminación y toxicidad por carbamatos

La toxicidad de los carbamatos para la salud humana y el ecosistema constituye un problema que preocupa a instancias internacionales como la OMS y la Organización Panamericana de la Salud (OPS) (Montes et al., 2018). El uso generalizado de plaguicidas produce residuos que se detectan en diversas matrices ambientales incluidos el suelo, agua y aire; son absorbidos por los animales que finalmente son consumidos por los seres humanos. Muchos de estos compuestos son genotóxicos y cancerígenos, que pueden ser causantes de daños respiratorios y

neurológicos leves o graves (Chowdhury et al., 2012; Klein et al., 2019).

En el suelo su estabilidad depende del pH, siendo la degradación más lenta en suelos ácidos que en alcalinos. Las investigaciones de Blanco & Marquina (2013) demuestran que altos contenidos de carbono orgánico incrementan la persistencia de carbamatos en el suelo. En cuerpos de agua con naturaleza alcalina la vida media de los carbamatos es de hasta 5 semanas (Ahmed Ibrahim & Şolpan, 2019a) (Rodríguez-Rodríguez et al., 2017).

Los más tóxicos son el Carbofurano, Metomilo, Oxamilo y Aldicard. De los carbamatos antes mencionados los tres primeros tienen una toxicidad aguda según lo establece la OMS, mientras que el Aldicard tiene una toxicidad crónica, ya que éste es un disruptor endócrino que altera el equilibrio hormonal en el organismo (Solá, 2004). La toxicidad que tienen estos compuestos para aquellas personas que los manejan llega a tener efectos crónicos en la salud (Guzmán-Plazola et al., 2016). Entre las vías de acceso al organismo de los carbamatos, la oral es la menos

común, pero es la que presenta mayor número de caso fatales; mientras que los índices de mortalidad asociados a las otras vías son relativamente bajos, no exento de causar daños en la salud humana (Rosa et al., 2016). La intoxicación por carbamatos a consecuencia del trabajo agrícola ha sido reconocida como un gran problema de salud pública en los agricultores del mundo. Según un informe de Organización de las Naciones Unidas (ONU) en el mundo se registran doscientas mil muertes por año como resultado de envenenamiento agudo por plaguicidas; donde cerca del 99% de dichas muertes se produjeron en países en desarrollo, los cuales presentan reglas de salud seguridad y medio ambiente más débiles (Guzmán-Plazola et al., 2016). Además, estas intoxicaciones son más frecuentes en niños, agricultores y trabajadores de manufactura (Guzmán-Plazola et al., 2016). Éstos tienen una liposolubilidad menor a la de otros pesticidas, por esta razón no tienen la capacidad de acumularse en los tejidos grasos; su concentración es muy grande en los órganos implicados en su biotransformación

como el hígado, riñones, piel e intestinos (Marrero et al., 2017; Klein et al., 2019).

3. Métodos de eliminación de carbamatos

Para la eliminación de los pesticidas carbamatos de matrices acuosas, con el fin de garantizar la calidad de las mismas, existen diferentes métodos de tratamientos físicos, químicos y bioquímicos. En esta clasificación se destacan la adsorción, oxidación con ozono y los bióticos, donde se elimina el pesticida con microorganismos capaces de degradar los carbamatos, respectivamente (Colasurdo, 2020). Los procesos de oxidación avanzada como son la fotólisis, proceso fenton, catálisis heterogénea y el proceso de peróxido de hidrogeno/UV, son estudiados debido a que presentan mejores resultados que los métodos convencionales de eliminación de pesticidas carbamatos (Yufra Picardo, 2013). La revisión bibliográfica sobre los métodos de tratamiento expuestos en el presente trabajo abarca el periodo comprendido en el año 2011 hasta 2021.

3.1. Métodos físicos

Entre los métodos de eliminación física está la técnica propuesta por Bakka et al. (2016). Este trabajo plantea la eliminación del Carbaryl utilizando cáscaras de huevo tratadas como biosorbente. Para el estudio se empleó Carbaryl con una pureza del 99%. Las cáscaras usadas como biosorbente se sometieron a varias etapas consecutivas de procesos termodinámicos tanto en medio ácido (HCl 0,1 M) como en medio alcalino (NaOH al 50%) para posteriormente ser pulverizadas secadas y tamizadas. Las pruebas de adsorción se realizaron mezclando 37 mg del biosorbente y 25 ml de solución del plaguicida con concentración entre 5 y 20 ppm, a una velocidad de 120 rpm y 295 °K. Las muestras se retiraron a intervalos de 15 min para posteriormente filtrarlas y realizar el análisis de concentración de Carbaryl. En ese trabajo se logró la remoción del 87.35% en un tiempo de contacto de 60 min.

En su investigación, Chatteraj et al. (2014) propone la remoción del Carbaryl empleando *Pistia stratiotes* como biosorbente. La *P. stratiotes* se

recolectó y lavó con agua destilada varias veces; se secó al sol por un periodo de 7 días, seguido de otro secado en un horno de aire caliente a 343 ± 1 °K durante dos días. El material seco se trituró y se tamizó con una malla de 250 para tener un tamaño uniforme de partícula. El material tamizado se lavó con agua desionizada para eliminar cualquier impureza. Posteriormente se secó y almacenó en botellas de vidrio cerradas y estériles. Los experimentos de adsorción del Carbaryl se realizaron con 100 ml de muestra con concentraciones iniciales de Carbaryl de 5, 10, 15, 20 ppm, un rango de pH de 2 a 8, tiempos de contacto de 1, 5, 10, 20, 30, 60 min y dosis de adsorbente de 0.05, 0.1, 0.5, 0.8 g. Se recogieron muestras de los matraces en intervalos de tiempo predeterminados para analizar la concentración de Carbaryl residual y de esa manera conocer el porcentaje de remoción del mismo. Las condiciones en las que se alcanzó la mayor remoción de Carbaryl (91%) fueron las siguientes: pH 2.01, una dosis de 0.72 g de adsorbente y un tiempo de contacto de 30 min.

Estos estudios tienen en común los elevados porcentajes de remoción del pesticida, sin embargo, suponen complejas etapas de pretratamiento del material adsorbente.

3.2. Métodos bioquímicos

Chin-Pampillo et al. (2016) reportan la degradación de Carbofuran con una mezcla biológica a base fibra de coco/compost luego de un envejecimiento. En este trabajo la fuente de Carbofuran fue Furadan 48SCal 48% p/v y el clorpirifos fue el Solver 48EC al 48% p/v. Para la preparación de la biomezcla se utilizó suelo arcilloso (arena 40%, limo 27% y arcilla 33%) de la capa superior de un campo de cebolla, ésta se secó y se tamizó en un tamiz de 2 mm. La mezcla biológica se preparó con fibra de coco y suelo post y pre expuesto con la siguiente proporción volumétrica 50:25:25 y humedecido al 75% del máximo de su capacidad de retención de agua (capacidad máxima de retención 0.77 ml de agua/g de biomezcla). Posteriormente la biomezcla se separó en lotes y se almacenó por 10 días a 25 °C. La degradación se llevó a cabo en tubos de propileno de 50 ml donde la mezcla fue enriquecida con Carbofuran y Clorpirifos

comerciales con 20 mg/kg de cada uno. Las mezclas se homogenizaron manualmente y se incubaron en la oscuridad a 25 °C, durante 8 días. La degradación de Carbofuran fue analizada por duplicado los días 2, 4 y 8. La máxima degradación que se reporta en el estudio es de 97%, al octavo día.

Rodríguez-Rodríguez et al. (2017) proponen la posibilidad de eliminar tres carbamatos: Aldicard, Methomyl y Methiocard, mediante el hongo *Ligninolytic trametes versicolor* bioaumentado. Los pesticidas empleados para esa investigación se obtuvieron de tiendas agroquímicas. El hongo se mantuvo cultivado al 2% en un agar extracto de malta con un pH de 4.5 a 25 °C, en un lapso de 30 días, para posteriormente inocular 250 ml de caldo *Sabouraud* con 1 ml de cultivo y someterlo a una agitación continua de 130 rpm, a 25 °C, durante 7 días.

Para la degradación de los pesticidas se realizó una experimentación por triplicado en soluciones de 100 ml con concentraciones de 15 ppm de Aldicard y Methomyl, y 3 ppm de Methiocard, las cuales fueron inoculadas con 10 g de micelio

húmedo y se incubaron en condiciones de agitación continua de 130 rpm y 25 °C en total oscuridad. La degradación de los plaguicidas fue de 87% para el Aldicard, 97% para Methomyl y 99% para Methiocard.

Lira & Orlanda (2020) describieron en su investigación la degradación del Carbofuran utilizando el hongo *Syncephalastrum racemosum*. El aislamiento de la cepa se hizo a partir del suelo de un cultivo de soya y se mantuvo en agar patata-dextrosa y glicerina al 1%, a 4 ± 0.1 °C para mantener su viabilidad. El inóculo fúngico se preparó del cultivo puro de *Syncephalastrum racemosum* con transferencia de discos individuales de micelio de 7 mm de diámetro a cajas Petri con agar patata-dextrosa y se incubaron a 28 ± 0.1 °C durante 21 días. Después del periodo de incubación se preparó una suspensión de esporas en la concentración de 1×10^6 esporas/ml. Los experimentos de biodegradación del Carbofuran se realizaron en un matraz Erlenmeyer de 250 ml que contenían 69.9 ml de medio de cultivo líquido con 20 ml de Carbofuran con concentraciones entre 15 y 100 µg/ml, 10 ml de

inóculo fúngico y 0.1 ml de solución traza en condiciones aeróbicas. Los matraces se incubaron en un agitador orbital a 25 ± 0.1 °C, 15xg durante 7 días. Las muestras se tomaron diariamente, centrifugando a 8000xg durante 10 minutos para posteriormente analizar los residuos de Carbofuran y de esta manera conocer el porcentaje de remoción. Se logró una remoción del 93.02% del Carbofuran, en un periodo de 7 días.

3.3. Métodos químicos

La eliminación del Methiocard mediante oxidación con ozono fue investigada por Cruz-Alcalde et al. (2017). Los experimentos realizados en este trabajo se hicieron a 20 ± 2 °C y a pH 7 en agua milli-Q. Las operaciones de ozonización se realizaron con un método multireactor, el cual tuvo éxito en varios estudios anteriores. Los experimentos se realizaron por triplicado en viales de 25 ml con 20 μ M de Methiocard y 20 μ M de sulfato metoxanol, sustancia que se agregó para evitar reacciones no deseadas. Las dosis de solución stop de ozono que se inyectaron en cada vial fueron de 5 a 50 μ M. Esta investigación tuvo

como resultado una remoción del 99% del Methiocard.

Raut-Jadhav et al. (2016a) plantea la remoción del Methomyl empleando los procesos fenton y fotofenton combinándolos con procesos de cavitación ultrasónica y aditivos intensificadores. Se utilizó Methomyl de calidad comercial como modelo contaminante. El peróxido de hidrógeno al 30 p/v y el sulfato ferroso heptahidratado de grado AR se obtuvieron de Tomas Baker, Mumbai, India. Los experimentos se realizaron en un reactor de cuarzo equipado con un procesador ultrasónico, un indicador de temperatura, fuente UV y una pantalla UV de madera. Las condiciones de cavitación se dieron en frecuencia de 20 kHz, con una temperatura de 28 °C; la radiación UV se usó en caso del proceso fotofenton. Todos los experimentos se realizaron con 250 ml de solución acuosa de Methomyl a una concentración inicial de 20 ppm; el rango de pH varió de 2.5 a 7.5, logrando la remoción del 100% de este pesticida con ambos métodos.

Raut-Jadhav et al. (2016b) establece la degradación del Methomyl con procesos de reactivos fenton

combinados con cavitación hidrodinámica. Los experimentos se realizaron en un dispositivo de cavitación equipado con una línea de derivación, manómetros y un tanque de almacenamiento rodeado con una chaqueta de enfriamiento para controlar la temperatura. Las condiciones para la experimentación fueron las siguientes: 5 L de solución acuosa con 25 ppm de concentración y 120 minutos de tiempo de reacción. Este experimento se realizó en un rango de pH de 2 a 6 para poder determinar el pH óptimo, variando la presión de entrada de 2 a 7 bar y con diferentes proporciones molares y reactivos fenton. Se obtuvo como resultado una remoción del 100% del Methomyl.

Lu et al. (2011) propone una técnica para la eliminación del Carbofuran utilizando el proceso fotofenton. La solución madre de Carbofuran se preparó disolviendo 200 mg de Carbofuran, de grado HPLC, con 98% de pureza, en 1 L de agua destilada. En este trabajo se utilizó un fotorreactor de doble pared de 1,6 L en todos los experimentos, con puntos de acceso para alimentar el reactivo y toma de muestras. Se

trabajó con temperatura y pH constantes. En el reactor al que se instaló un agitador para mezclar la solución a 165 rpm y lámparas de UV monocromáticas con rango de emisión entre 280 y 360 nm. Los experimentos se hicieron a pH 3 y con una concentración de 50 ppm de Carbofuran. Se retiró 8 ml de muestra del reactor, en un tiempo determinado; para luego hacer el análisis del Carbofuran residual. Con lo cual se logró una remoción total del Carbofuran.

Ahmed Ibrahim & Şolpan (2019b) reportan la eliminación completa de Carbofuran mediante oxidación con radiación UV/peróxido de hidrogeno. El pesticida utilizado en esa investigación fue Carbofuran con un 98% de pureza y el agente oxidante fue el peróxido de hidrógeno al 30% p/p. El proceso de degradación fotoquímica se llevó a cabo en un fotorreactor UV que se rodeó con una chaqueta de enfriamiento para mantener la temperatura en 25°C. La fuente de luz fue una monolampara de mercurio cromática de 16 watts de potencia y 254 nm de longitud de onda máxima. El reactor fue cargado con 400 ml de solución acuosa a 50 ppm. Las soluciones acuosas de

Carbofuran se expusieron a luz ultravioleta entre 15 y 200 minutos y se les agregó peróxido de hidrógeno al $4.8 \pm 0,1 \mu\text{M}$.

4. Comparación de los métodos de tratamiento para la eliminación de carbamatos

En los últimos diez años se han estudiado varios métodos para la eliminación de pesticidas

carbamatos. En la tabla 2 se puede observar la compilación de técnicas para la eliminación del carbofurano y aldicarb, los cuales son considerados los pesticidas más tóxicos de la familia de los carbamatos. También se resumen los métodos empleados para la remoción del metomilo y carbarilo, carbamatos usados en todos los países de Latinoamérica.

Tabla 2.
Técnicas para la eliminación de carbamatos.

Pesticida	Método	Técnica	% de remoción	Tiempo de Remoción	Referencias
Carbofurano	POA	$\text{NaNbO}_3\text{-Au-Sn}_3\text{O}_4/\text{UV}$	73%	120 min	(Li et al., 2020)
	Químico	Bio-MnOx	90.63%	4 días	(Liu et al., 2017)
	POA	GAC-TiO ₂ /H ₂ O ₂ /UV	100 %	68 min	(Vishnuganth et al., 2017)
	Bioquímico	<i>Enterobacter sp</i> inmovilizadas	100%	9 días	(Umar Mustapha et al., 2020b)
	POA	Fe ₃ O ₄ -GO/UV	85%	120 min	(Tabasum et al., 2018)
	Bioquímico	<i>Esfingbio sp.</i> Cepa CFD-1	95%	60 h	(Jiang et al., 2020)
	POA	FeNT / PMS / Vis LED	100%	2 min	(Abdelhaleem & Chu, 2019)
	POA	Polvo de raíces de cúrcuma / UV	77.50%	140 min	(Kumar & Luxmi, 2020)
	Físico	Sistema de carbón activado granular por microondas	97.40	4.10 min	(Remya & Lin, 2017)
	Bioquímico	<i>Enterobacter sp.</i> /superficie de respuesta	95%	6 días	(Umar Mustapha et al., 2020a)
	POA	Proceso tipo foto-Fenton de LED visible	76%	24 min	(Abdelhaleem & Chu, 2020)
	Bioquímico	<i>Cupriavidus sp.</i> Cepa ISTL7	98%	96 h	(Gupta et al., 2019)
	POA	H ₂ O ₂ /UV	100%	180 min	(Ahmed Ibrahim & Şolpan, 2019b)

	Físico	Nanofiltro	95%		(Tateoka et al., 2018)
	Bioquímico	Consorcio microbiano de una mezcla biológica	100%	23 h	(Castro-Gutiérrez et al., 2016)
Aldicarb	POA	Vacío ultravioleta /ultravioleta	98%	30 min	(Yang et al., 2018)
	Bioquímico	<i>Enterobacter cloacae</i> cepa TA7 inmovilizada	100%	72 h	(Fareed et al., 2017)
	Bioquímico	<i>Pseudomonas plecoglossicida</i> . (TA3) inmovilizada	100%	96 h	(Fareed et al., 2019)
	POA	Nitrógeno azufre catalizador codopado (NS-TiO ₂)/UV	80%	30 min	(Kattiparambil Manoharan & Sankaran, 2018)
	Bioquímico	Biomezclas bioaumentadas con el hongo <i>Ligninolytic Trametes versicolor</i>	99%	8 días	(Rodríguez-Rodríguez et al., 2017)
	Bioquímico	<i>Ascochyta sp.</i>	88%	40 días	(Kaur & Balomajumder, 2019)
Metomilo	Físico	Nanofiltro	95%	-	(Tateoka et al., 2018)
	Físico	Biofilms	99.2%	10 días	(Tien et al., 2013)
	Físico	Carbón activado granular	100%	48 h	(Alves et al., 2020)
	POA	TiO ₂ /Uv	100%	90 min	(Juang & Chen, 2014)
	POA	TiO ₂ dopado con CdSO ₄ /Uv	93%	60 min	(Barakat et al., 2014)
	Físico	Carbón activado de tallos de algodón	87.9%	2.5 h	(El-Geundi et al., 2013)
	POA	Fenton	80%	30 min	(Fan et al., 2013)
Carbarilo	Físico	Polímero de impresión molecular de superficie (SMIP)	100%	40 min	(So et al., 2018)
	Físico	Carbón activado de semilla de mandarina (TSAC)	99.82%	12 min	(Wang et al., 2020)
	Bioquímico	Lacasa inmovilizada de <i>Trametes versicolor</i>	100%	24 h	(Bayramoglu & Arica, 2019)
	Bioquímico	<i>Bacillus licheniformis</i> B-1	91.21%	72 h	(Hu et al., 2020)
	POA	Radiación gamma	100%	-	(Khedr et al., 2019)
	Físico	Arcilla	75%	120 min	(Ouardi et al., 2013)
	POA	H ₂ O ₂ /UV	100%	75 min	(Ibrahim & Şolpan, 2020)

	Bioquímico	Cápsulas de <i>Rhodopseudomonas</i>	100%	5 días	(Wu et al., 2019)
	Químico	Ozono	65%	75 seg	(Şolpan et al., 2020)
	Físico	Nanofiltro	95%		(Tateoka et al., 2018)
	Bioquímico	<i>Enterobacter cloacae</i> cepa TA7 inmovilizada	100%	72 h	(Fareed et al., 2017)
	Bioquímico	<i>Pseudomonas plecoglossicida</i> . (TA3) inmovilizada	100%	96 h	(Fareed et al., 2019)

El análisis de la tabla 2 evidencia que los métodos bioquímicos y los POAs son los que más se han investigado en los últimos 10 años. Esto se debe a que los métodos convencionales de remoción de contaminantes no son tan eficientes en la eliminación de los pesticidas carbamatos, por lo que se busca métodos que tengan una mayor efectividad en la eliminación de dichos contaminantes. Las técnicas analizadas en el presente trabajo alcanzan porcentajes de remoción de los carbamatos superiores al 65%. La oxidación avanzada ofrece la mayor eficiencia de remoción debido a que es capaz de eliminar en su totalidad los pesticidas contenidos en matrices acuosas, en un periodo de tiempo relativamente corto. Sin embargo, no son las más factibles para el tratamiento de aguas residuales industriales debido a los

altos costos de implementación, como establece Bes-Monge et al. (2018).

Los métodos físicos tienen una gran eficiencia en la remoción de carbamatos, con un rango de remoción del 75-100%, como lo reportan varias investigaciones (tabla 2). Éstos presentan como desventaja un largo periodo de preparación del material que se va a utilizar para llevar a cabo la eliminación del carbamato. La principal ventaja de estas técnicas es la facilidad de conseguir el material con el cual se van a llevar a cabo las mismas.

Las técnicas bioquímicas presentan un rango de mayor eficiencia a los métodos físicos, esto se infiere porque el rango de remoción reportado por los autores que han investigado estas técnicas es del 88-

100% de eliminación de pesticidas carbamatos. Sin embargo, la principal desventaja de estos métodos es la dificultad de aislamiento y desarrollo de los microorganismos que se van a emplear en el proceso de eliminación de los carbamatos, otra desventaja que presentan estas técnicas es el largo tiempo usado para poder aislar y lograr que los microorganismos se encuentren listos para aplicar la técnica. La ventaja primordial de los métodos bioquímicos es que no se generan subproductos que puedan ser nocivos para el ambiente.

Se considera que los procesos de oxidación son los más factibles de realizar a una escala industrial debido a que tienen un buen rango de remoción (65-99%), siendo menor la efectividad a la de los otros métodos de remoción, no obstante, los costos de estas técnicas son menores en comparación de las técnicas bioquímicas y de oxidación avanzada. Para llevar a cabo el proceso de oxidación no es necesario realizar ningún pretratamiento al reactivo que se va a usar, ni a la matriz que va a ser tratada. Además, los reactores son más simples, lo que representa un

menor costo de los mismos y al no requerir una previa preparación del agua que se va a tratar los costos operacionales serán menores. La principal desventaja del método de oxidación es que de no aplicarse la dosis correcta de oxidante este método podría generar subproductos no deseados que puedan ser incluso más tóxicos que el propio pesticida.

5. Conclusión

Los agentes pesticidas de la familia carbamato presentan una toxicidad aguda media y un tiempo de vida relativamente corto a comparación con otros pesticidas, a pesar de esto se consideran contaminantes ambientales debido a que ciertos pesticidas de esta familia generan metabolitos que son altamente tóxicos y resistentes a la degradación, por lo que es necesario la implementación de métodos de eliminación eficaces de los carbamatos con el fin de disminuir la contaminación producida por los mismos que además de causar daños ambientales originan problemas de salud en los seres humanos. En Latinoamérica se emplean ciertos pesticidas carbamatos que están prohibidos por

legislaciones en países desarrollados como los países pertenecientes a la unión europea (UE), debido a que son altamente tóxicos para el ser humano; como lo son el carbofurano, aldicarb, metiocarb y el metomilo, de los cuales el aldicarb es de toxicidad crónica y los tres restantes de toxicidad aguda. En la actualidad se han desarrollado métodos para la eliminación de los pesticidas carbamatos en matrices acuosas, siendo la oxidación el método más factible para su remoción, debido a que presenta un buen rango de remoción y tiene costos bajos de operación lo que la hace la mejor opción para llevarla a escala industrial.

Bibliografía

- Abdelhaleem, A., & Chu, W. (2019). Insights into peroxymonosulfate activation for carbofuran degradation under visible LED via a double-component photocatalyst of Fe (III) impregnated N-doped TiO₂. *Chemosphere*, 237, 124487. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124487>
- Abdelhaleem, A., & Chu, W. (2020). Prediction of carbofuran degradation based on the hydroxyl radical's generation using the FeIII impregnated N doped-TiO₂/H₂O₂/visible LED photo-Fenton-like process. *Chemical Engineering Journal*, 382, 122930. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122930>
- Ahmed Ibrahim, K. E., & Şolpan, D. (2019a). Removal of carbofuran in aqueous solution by using UV-irradiation/hydrogen peroxide. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102820. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102820>
- Ahmed Ibrahim, K. E., & Şolpan, D. (2019b). Removal of carbofuran in aqueous solution by using UV-irradiation/hydrogen peroxide. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102820. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102820>
- Alves, A. A. de A., Ruiz, G. L. de O., Nonato, T. C. M., Pelissari, C., Dervanoski, A., & Sens, M. L. (2020). Combined microfiltration and adsorption process applied to public water supply treatment: Water quality influence on pesticides removal. *Environmental Technology*, 41(18), 2382-2392. <https://doi.org/10.1080/0959330.2019.1567605>
- Arroyave Rojas, J. A., & Garcés Giraldo, L. F. (2011).

- Evaluación de la degradación del pesticida Mertect empleando procesos avanzados de oxidación (PAO). *Producción + Limpia*, 6(2), 9-18.
- Bakka, A., Mamouni, R., Saffaj, N., Laknifli, A., Benlhachemi, A., Bakiz, B., Haddad, M. E., Taleb, M. A., Roudani, A., & Faouzi, A. (2016). The treated eggshells as a new biosorbent for elimination of carbaryl pesticide from aqueous solutions: Kinetics, thermodynamics and isotherms. *Scientific Study & Research*, 17(3), 271-284.
- Barakat, N. A. M., Nassar, M. M., Farrag, T. E., & Mahmoud, M. S. (2014). Effective photodegradation of methomyl pesticide in concentrated solutions by novel enhancement of the photocatalytic activity of TiO₂ using CdSO₄ nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(2), 1425-1435.
<https://doi.org/10.1007/s11356-013-2027-9>
- Bayramoglu, G., & Arica, M. Y. (2019). Biodegradation of methylene blue and carbaryl by *Trametes versicolor* laccase preparations in the presence of a mediator compound. *Journal of Macromolecular Science, Part A*, 56(3), 277-285.
- <https://doi.org/10.1080/10601325.2019.1565549>
- Benítez-Díaz, P. (2013). Contaminación de aguas superficiales por residuos de plaguicidas en Venezuela y otros países de Latinoamérica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29, 7-23.
- Bes-Monge, S., Silva, A., & Bengoa, C. (2018). *Manual técnico sobre procesos de oxidación avanzada aplicados al tratamiento de aguas residuales industriales*. CYTED.
- Blanco, L., & Marquina, M. E. (2013). Respuestas a la aplicación de carbamatos en dos aislados rizobianos provenientes de mucuchíes, estado Mérida, Venezuela. *Bioagro*, 25(2), 117-128.
- Campos, M. A. R. (2018). El uso de pesticidas en la agricultura y su desorden ambiental. *Revista Enfermería la Vanguardia*, 6(2), 40-47.
<https://doi.org/10.35563/revan.v6i2.210>
- Carvalho, F. P. (2017). Pesticides, environment, and food safety. *Food and Energy Security*, 6(2), 48-60.
<https://doi.org/10.1002/fes3.108>
- Castro-Gutiérrez, V., Masís-Mora, M., Caminal, G., Vicent, T., Carazo-Rojas, E., Mora-

- López, M., & Rodríguez-Rodríguez, C. E. (2016). A microbial consortium from a biomixture swiftly degrades high concentrations of carbofuran in fluidized-bed reactors. *Process Biochemistry*, 51(10), 1585-1593.
<https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.07.003>
- Chattoraj, S., Mondal, N. K., Das, B., Roy, P., & Sadhukhan, B. (2014). Biosorption of carbaryl from aqueous solution onto *Pistia stratiotes* biomass. *Applied Water Science*, 4(1), 79-88.
<https://doi.org/10.1007/s13201-013-0132-z>
- Chin-Pampillo, J. S., Masís-Mora, M., Ruiz-Hidalgo, K., Carazo-Rojas, E., & Rodríguez-Rodríguez, C. E. (2016). Removal of carbofuran is not affected by co-application of *chlorpyrifos* in a coconut fiber/compost based biomixture after aging or pre-exposure. *Journal of Environmental Sciences*, 46, 182-189.
<https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.12.026>
- Chowdhury, M. A. Z., Banik, S., Uddin, B., Moniruzzaman, M., Karim, N., & Gan, S. H. (2012). Organophosphorus and Carbamate Pesticide Residues Detected in Water Samples Collected from Paddy and Vegetable Fields of the Savar and Dhamrai Upazilas in Bangladesh. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(9), 3318-3329.
<https://doi.org/10.3390/ijerph9093318>
- Colasurdo, D. D. (2020). Estudio de la adsorción de los pesticidas Pendimetalina y Metolaclor sobre materiales carbonosos y silíceos para su eliminación de aguas contaminadas [Doctor en Ciencias Exactas, área Química, Universidad Nacional de La Plata].
<https://doi.org/10.35537/10915/106589>
- Cossi, P. (2018). Efectos de la exposición subcrónica a concentraciones ambientales de contaminantes de relevancia en un gasterópodo nativo de agua dulce: *Biomphalaria straminea*. Universidad de Buenos Aires.
- Cruz Aquino, L. M., & Placencia Medina, M. D. (2019). Caracterización de la intoxicación ocupacional por pesticidas en trabajadores agrícolas atendidos en el Hospital Barranca Cajatambo 2008—2017. *Horizonte Médico (Lima)*, 19(2), 39-48.
<https://doi.org/10.24265/horizmed.2019.v19n2.06>
- Cruz-Alcalde, A., Sans, C., & Esplugas, S. (2017). Exploring ozonation as treatment alternative for

- methiocarb and formed transformation products abatement. *Chemosphere*, 186, 725-732. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.040>
- Cruz-González, G., Julcour, C., & Jáuregui-Haza, U. (2017). El Estado actual y perspectivas de la degradación de pesticidas por procesos avanzados de oxidación. *Revista Cubana de Química*, 29(3), 492-516.
- Díaz, S. M., Sánchez, F., Organización Tratado Cooperación Amazónica - OTCA. Brasilia, Brasil, Varona, M., 1. Instituto Nacional de Salud. Bogotá, Colombia, 4. Universidad del Rosario. Bogotá, Colombia, Eljach, V., Secretaria de Salud del Cauca. Valle, Colombia, Muñoz G, Ma. N., & Organización Tratado Cooperación Amazónica - OTCA. Brasilia, Brasil. (2017). Niveles de colinesterasa en cultivadores de papa expuestos ocupacionalmente a plaguicidas, Totoró, Cauca. *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud*, 49(1), 85-92. <https://doi.org/10.18273/revsa.l.v49n1-2017008>
- El-Geundi, M. S., Nassar, M. M., Farrag, T. E., & Ahmed, M. H. (2013). Methomyl Adsorption onto Cotton Stalks Activated Carbon (CSAC): Equilibrium and Process Design. *Procedia Environmental Sciences*, 17, 630-639. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.079>
- Fan, C., Horng, C.-Y., & Li, S.-J. (2013). Structural characterization of natural organic matter and its impact on methomyl removal efficiency in Fenton process. *Chemosphere*, 93(1), 178-183. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.05.027>
- Fareed, A., Riaz, S., Nawaz, I., Iqbal, M., Ahmed, R., Hussain, J., Hussain, A., Rashid, A., & Naqvi, T. A. (2019). Immobilized cells of a novel bacterium increased the degradation of N-methylated carbamates under low temperature conditions. *Heliyon*, 5(11), e02740. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02740>
- Fareed, A., Zaffar, H., Rashid, A., Maroof Shah, M., & Naqvi, T. A. (2017). Biodegradation of N-methylated carbamates by free and immobilized cells of newly isolated strain *Enterobacter cloacae* strain TA7. *Bioremediation Journal*, 21(3-4), 119-127. <https://doi.org/10.1080/10889868.2017.1404964>
- Gobierno de Mexico. (s. f.). Registros Sanitarios de Plaguicidas, Nutrientes Vegetales y LMR. <http://siipris03.cofepris.gob.m>

- characterization. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(21), 20510-20517.
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0350-2>
- Kaur, P., & Balomajumder, C. (2019). Simultaneous biodegradation of mixture of carbamates by newly isolated *Ascochyta* sp. CBS 237.37. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 169, 590-599.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.029>
- Khedr, T., Hammad, A. A., Elmarsafy, A. M., Halawa, E., & Soliman, M. (2019). Degradation of some organophosphorus pesticides in aqueous solution by gamma irradiation. *Journal of Hazardous Materials*, 373, 23-28.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.03.011>
- Klein, B. N., Staudt, K. J., Missio, R., Hammad, M. P. H. P., & Alves, I. A. (2019). Análise do impacto do uso de organofosforados e carbamatos em trabalhadores rurais de um município da região noroeste do estado do Rio Grande do Sul. *Acta Toxicológica Argentina*, 26(3), Article 3.
- Kumar, A., & Luxmi, V. (2020). Novel green photo-catalyst 'turmeric roots' for pesticides degradation: Preparation and characterizations. *Materials Letters*, 262, 127030.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127030>
- Li, S., Liu, Z., Qu, Z., Piao, C., Liu, J., Xu, D., Li, X., Wang, J., & Song, Y. (2020). An all-solid-state Z-scheme $\text{NaNbO}_3\text{-Au-Sn}_3\text{O}_4$ photocatalyst for effective degradation of carbofuran under sunlight irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 389, 112246.
<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112246>
- Lira, R. K. de S., & Orlanda, J. F. F. (2020). Biodegradação do inseticida carbofuran por *Syncephalastrum racemosum*. *Research, Society and Development*, 9(7), e824974932- e824974932.
<https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4932>
- Liu, Z., Wang, J., Qian, S., Wang, G., Wang, J., & Liao, S. (2017). Carbofuran Degradation by Biogenic Manganese Oxides. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 98(3), 420-425.
<https://doi.org/10.1007/s00128-016-1940-2>
- Lu, L.-A., Ma, Y.-S., Kumar, M., & Lin, J.-G. (2011). Photochemical degradation of carbofuran and elucidation of removal mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 166(1), 150-156.

- <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.10.045>
- Marrero, S., González, S., Guevara, H., & Eblen, A. (2017). Evaluación de la exposición a organofosforados y carbamatos en trabajadores de una comunidad agraria. *Comunidad y Salud*, 17(1), 30-41.
- Martínez-Valenzuela, C., & Gómez-Arroyo, S. (2007). Riesgo genotóxico por exposición a plaguicidas en trabajadores agrícolas. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 23(4), 185-200.
- Mena-Espino, X. (2015). Efectos de los plaguicidas utilizados para el control de la *Sigatoka* negra en plantaciones bananeras en México, así como su efecto en el ambiente y la salud pública. *Tecnociencia*, 9(2), 91-98.
- Ministerio de Agricultura (Perú). (s. f.). Registro de plaguicidas. https://servicios.senasa.gob.pe/SIGIAWeb/sigia_consulta_producto.html
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Agua y Pesca (Ecuador). (2020). Reporte de productos e insumos agrícolas. <http://www.agrocalidad.gob.ec/wp-content/uploads/2020/07/List-a-de-plaguicidas-y-productos-afines-registrados-actualizado-02-de-julio-de-2020-1.xlsx>
- Montes, R., Céspedes, F., Gabriel, D., & Baeza, M. (2018). Electrochemical Biosensor Based on Optimized Biocomposite for Organophosphorus and Carbamates Pesticides Detection. *Journal of Nanomaterials*, 2018, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2018/7093606>
- Montico, S. (2015). Efectos de los plaguicidas utilizados para el control de la *Sigatoka* negra en plantaciones bananeras en México, así como su efecto en el ambiente y la salud pública. *Revista de contaminación ambiental*, 31(2), 165-172.
- Organización Mundial de la Salud. (2002). La salud en las Américas (Ed. 2002). Organización Panamericana de la Salud.
- Ouardi, M. E., Alahiane, S., Qourzal, S., Abaamrane, A., Assabbane, A., & Douch, J. (2013). Removal of Carbaryl Pesticide from Aqueous Solution by Adsorption on Local Clay in Agadir. 2013. <https://doi.org/10.4236/ajac.2013.47A010>
- Piel, C., Pouchieu, C., Carles, C., Béziat, B., Boulanger, M., Bureau, M., Busson, A., Grüber, A., Lecluse, Y., Migault, L., Renier, M., Rondeau, V., Schwall, X., Tual, S., Arveux, P., Bara, S., Bouvier, A. M., Busquet, T., Colonna, M., ... Baldi, I.

- (2019). Agricultural exposures to carbamate herbicides and fungicides and central nervous system tumour incidence in the cohort AGRICAN. *Environment International*, 130, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.070>
- RAINFOREST ALLIANCE. (2017). Listas para la gestión de plaguicidas. https://www.rainforest-alliance.org/business/wp-content/uploads/2017/11/02_Lists-pesticides-management_sp.pdf
- Rani, M., & Shanker, U. (2018). Degradation of traditional and new emerging pesticides in water by nanomaterials: Recent trends and future recommendations. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 15(6), 1347-1380. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1512-y>
- Raut-Jadhav, S., Pinjari, D. V., Saini, D. R., Sonawane, S. H., & Pandit, A. B. (2016a). Intensification of degradation of methomyl (carbamate group pesticide) by using the combination of ultrasonic cavitation and process intensifying additives. *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 135-142. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.12.015>
- Raut-Jadhav, S., Saini, D., Sonawane, S., & Pandit, A. (2016b). Effect of process intensifying parameters on the hydrodynamic cavitation based degradation of commercial pesticide (methomyl) in the aqueous solution. *Ultrasonics Sonochemistry*, 28, 283-293. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2015.08.004>
- Remya, N., & Lin, J.-G. (2017). Optimization of carbofuran degradation in microwave-granular activated carbon system using response surface methodology. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 4751-4758. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.045>
- Rodríguez-Rodríguez, C. E., Madrigal-León, K., Masís-Mora, M., Pérez-Villanueva, M., & Chin-Pampillo, J. S. (2017). Removal of carbamates and detoxification potential in a biomixture: Fungal bioaugmentation versus traditional use. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 135, 252-258. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.10.011>
- Rosa, M. E. A., Flores, O. M. G., & Jiménez, H. G. P. (2016). Caracterización de intoxicaciones agudas por plaguicidas en el departamento de Intibucá.

- Revista Médica de Honduras*, 84, 92-94.
- Servicio Agrícola y Ganadero (Chile). (2021). Lista de plaguicidas con autorización. http://www.sag.cl/sites/default/files/03_ autorizados_01-02-2021.xlsx
- Servicio Nacional de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad Alimentaria (Bolivia). (2011). Estado del registro de productos agroquímicos. <http://www.senasag.gob.bo/eop/productossv2.html>
- So, J., Pang, C., Dong, H., Jang, P., U, J., Ri, K., & Yun, C. (2018). Adsorption of 1-naphthyl methyl carbamate in water by utilizing a surface molecularly imprinted polymer. *Chemical Physics Letters*, 699, 199-207. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2018.03.059>
- Solá, S. (2004). Estudio de seis suicidios consumados por ingestión de carbamatos en el partido judicial de La Laguna (Tenerife) durante el período 1998-2002. *Revista de Toxicología*, 21(2), 108-112.
- Şolpan, D., Ibrahim, K. E. A., Torun, M., & Mehrnia, M. (2020). The effect of ozonation on the degradation of carbaryl in aqueous solution. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 55(10), 929-939.
- <https://doi.org/10.1080/03601234.2020.1798174>
- Tabasum, A., Zahid, M., Bhatti, H. N., & Asghar, M. (2018). Fe₃O₄-GO composite as efficient heterogeneous photo-Fenton's catalyst to degrade pesticides. *Materials Research Express*, 6(1), 015608. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aae6ab>
- Tateoka, M. S. S., Schöntag, J. M., Petrus, J. C. C., & Sens, M. L. (2018). Removal of carbamates in drinking water by nanofiltration in tangential flow. *Acta Scientiarum. Technology*, 40, e30756-e30756. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v40i1.30756>
- Tien, C.-J., Lin, M.-C., Chiu, W.-H., & Chen, C. S. (2013). Biodegradation of carbamate pesticides by natural river biofilms in different seasons and their effects on biofilm community structure. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 179, 95-104. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.04.009>
- Umar Mustapha, M., Halimoon, N., Johari, W. L. W., & Yunus abd shukur, M. (2020a). Optimization of carbofuran insecticide degradation by *Enterobacter* sp. Using response surface methodology (RSM). *Journal*

- of King Saud University - Science, 32(3), 2254-2262. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.03.002>
- Umar Mustapha, M., Halimoon, N., Wan Johari, W. L., & Abd Shukor, M. Y. (2020b). Enhanced Carbofuran Degradation Using Immobilized and Free Cells of *Enterobacter sp.* Isolated from Soil. *Molecules*, 25(12), 2771. <https://doi.org/10.3390/molecules25122771>
- Vishnuganth, M. A., Remya, N., Kumar, M., & Selvaraju, N. (2017). Carbofuran removal in continuous-photocatalytic reactor: Reactor optimization, rate-constant determination and carbofuran degradation pathway analysis. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 52(5), 353-360. <https://doi.org/10.1080/03601234.2017.1283141>
- Wang, Y., Wang, S., Xie, T., & Cao, J. (2020). Activated carbon derived from waste tangerine seed for the high-performance adsorption of carbamate pesticides from water and plant. *Bioresource Technology*, 316, 123929. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123929>
- Wu, P., Xie, L., Mo, W., Wang, B., Ge, H., Sun, X., Tian, Y., Zhao, R., Zhu, F., Zhang, Y., & Wang, Y. (2019). The biodegradation of carbaryl in soil with *Rhodopseudomonas capsulata* in wastewater treatment effluent. *Journal of Environmental Management*, 249, 109226. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.127>
- Yang, L., Li, M., Li, W., Jiang, Y., & Qiang, Z. (2018). Bench- and pilot-scale studies on the removal of pesticides from water by VUV/UV process. *Chemical Engineering Journal*, 342, 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.02.075>
- Yufra Picardo, V. M. (2013). Evaluación del tratamiento con radiación UV para la eliminación de residuos de plaguicidas en aceite de oliva virgen [Doctoral]. Universidad de Jaén.