



Universidad César Vallejo

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Materiales emergentes para la eliminación de mercurio en el
medio hídrico, suelo y aire-Revisión sistemática**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL

DE:

Ingeniero Ambiental

AUTORES:

Choque Soto, Santiago Carlos (ORCID: 0000-0001-9706-3611)

Velásquez Velita, Aracelly Alexandra (ORCID: 0000-0002-5606-
8536)

ASESOR:

Mgtr. Reyna Mandujano, Samuel Carlos (ORCID: 0000-0002-0750-2877)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y gestión de los residuos

LIMA – PERÚ

2022

Dedicatoria

Dedico esta tesis a Dios por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional, a mis Padres Celso Choque y Celia Soto por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional sin importar diferencias de opiniones.

A mi querida hija Illari Nazly Choque que me impulso a seguir superándome profesionalmente y así concluir una meta más en mi vida personal.

A mi pareja Lysbeth Mamani por alentarme y brindarme su apoyo incondicional.

Mis hermanos Roxana y Abel que siempre han estado conmigo durante el proceso académico apoyándome, corrigiéndome y alentándome.

Santiago Choque Soto

Dedicado a Dios por haberme permitido llegar hasta este momento tan importante de mi vida profesional, agradezco a mis padres Luis Ugarte y Mery Velásquez por estar siempre ahí para mí y brindarme ese apoyo incondicional a pesar de las cosas que se presentaron en mi camino.

A mis hermanos Alessandro y Rayson que me motivaron a seguir creciendo profesionalmente y a no darme por vencida, aprendiendo siempre al lado de ustedes mis amores.

Agradezco a mi novio Jhon Portilla por su apoyo incondicional y a la vez ser mi soporte.

Mis tíos, tías, abuelito y primas que siempre me han motivado y estado durante el proceso académico, siempre dándome los mejores valores.

Alexandra Velásquez Velita

Agradecimiento

Agradezco a Dios, por haberme dado la vida y permitirme llegar a culminar esta etapa importante de mi vida. A mi familia, mi pareja e hija, quienes estuvieron apoyándome en cada momento para culminar mi carrera.

Santiago Choqqe Soto

Agradezco a Dios, quien me permitió llegar hasta este momento. A mi familia, quienes estuvieron apoyándome en cada etapa para poder alcanzar esta meta.

Alexandra Velásquez Velita

Índice de contenidos

Carátula.....	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenidos.....	iv
Índice de tablas	v
Índice de Figuras	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO	3
III. METODOLOGÍA	15
3.1 Tipo y diseño de investigación	15
3.2 Categoría, subcategoría y matriz de categorización.....	15
3.3 Escenario de estudio.....	17
3.4 Participantes	17
3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	17
3.6 Procedimiento	18
3.7 Rigor científico.....	19
3.8 Método de análisis de información	19
3.9 Aspectos éticos	20
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
V. CONCLUSIONES	35
VI. RECOMENDACIONES.....	36
VII. REFERENCIAS	37
ANEXOS	48

Índice de tablas

Tabla 1: Formas físicas y químicas del mercurio: Algunas vías recientes y actuales de exposición humana	8
Tabla 2: Matriz de Categorización Apriorística	16
Tabla 3: Procedimiento de recolección de artículos	18
<i>Tabla 4: Materiales emergentes más usados</i>	<i>21</i>
<i>Tabla 5: Capacidad de adsorción de materiales emergentes</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 6: Material de apoyo en los materiales emergentes</i>	<i>30</i>

Índice de Figuras

Figura 1: Transferencia entre fases y transporte de mercurio en suelo, agua y aire	9
Figura 2: Eliminación de mercurio del sistema acuoso utilizando materiales de sílice mesoporosos cúbicos.....	11
Figura 3: División de tres tipos de nanomateriales	12
Figura 4: Mecanismo de interacción entre los iones de metales pesados y los grupos de azufre en un polímero orgánico covalente suspendido en agua.....	13

RESUMEN

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo analizar la importancia que presentan los materiales emergentes para la eliminación de mercurio en el medio hídrico, suelo y aire. La metodología fue aplicada, donde se recolectaron 75 estudios a nivel mundial, de los cuales quedaron 40 artículo.

Se descubrió que, los materiales emergentes más utilizados son los nanomateriales basados en carbono, como los nanotubos de carbono. Así también, se encontró que las nanopartículas de óxido ferroférico son otro material emergente para la remediación de Hg, que poseen algunas propiedades sobresalientes, como facilidad de recuperación, super paramagnetismo y gran área de superficie. La capacidad de adsorción de los materiales emergentes es alta, debido a su tamaño pequeño y otras propiedades eléctricas, mecánicas y químicas únicas. Además, se obtuvo que el mercurio más tratado es el Hg 2+, mientras que el Hg (0) es tratado en un 24%. El material de apoyo presente en los materiales emergentes son los polímeros orgánicos; como los polímeros orgánicos porosos, los nanotubos de carbono de paredes múltiples y grafeno. Debido a que, el uso de polímeros orgánicos tiene ventajas que incluyen una mayor tasa de sedimentación, menores costos, mejor calidad del agua tratada y propiedades deshidratantes del lodo.

Palabras clave: materiales emergentes, contaminación por mercurio, medio acuático, contaminación del suelo, contaminación del aire

ABSTRACT

The objective of this research work was to analyze the importance of emerging materials for the elimination of mercury in water, soil and air. The methodology was applied, where 75 studies were collected worldwide, of which 40 articles remained.

It was found that the most widely used emerging materials are carbon-based nanomaterials, such as carbon nanotubes. Also, ferric oxide nanoparticles were found to be another emerging material for Hg remediation, which possess some outstanding properties, such as ease of recovery, super paramagnetism and large surface area. The adsorption capacity of the emerging materials is high, due to their small size and other unique electrical, mechanical and chemical properties. In addition, it was obtained that the most treated mercury is Hg 2+, while Hg (0) is treated by 24%. The supporting material present in the emerging materials are organic polymers; such as porous organic polymers, multi-walled carbon nanotubes and graphene. Because, the use of organic polymers has advantages that include higher sedimentation rate, lower costs, better treated water quality and sludge dewatering properties.

Keywords: emerging materials, mercury contamination, aquatic environment, soil contamination, air contamination

I. INTRODUCCIÓN

La rápida evolución de las industrias en muchos países ha puesto de manifiesto el grave problema medioambiental que suponen los metales pesados en el agua, suelo y aire (Abbas K. et al., 2018, p.3). Esto debido a que los iones de mercurio (Hg (II)) se consideran uno de los metales pesados más ubicuos y peligrosos en los recursos del ecosistema (Bao Shuangyou et al., 2017, p.1).

El daño de la contaminación por mercurio a la salud humana y al medio ambiente se conoce desde hace mucho tiempo (Morosini C. et al., 2021, p.1). En los últimos años, la combinación de actividades industriales y transporte atmosférico a largo plazo ha resultado en un aumento sostenido de las concentraciones de mercurio en los suelos (Liu Sijia et al., 2021, p.1).

Así también la contaminación por mercurio en el agua y el aire se asocia con una posible toxicidad para los seres humanos y los ecosistemas, donde, las actividades industriales, como la combustión del carbón, han llevado a un aumento de las concentraciones de mercurio (Hg) en diferentes medios ambientales (Wang F. et al., 2016, p.2).

La contaminación por metales pesados como el mercurio (Hg 2+ módulo de adsorción de Hg 2+ después de detectar Hg 2+) representa una grave amenaza para la seguridad alimentaria en todo el mundo debido al enriquecimiento a través de la cadena alimentaria y, finalmente, al cuerpo humano (Beckers F. et al., 2017, p.2).

Convirtiéndose el mercurio en motivo de gran preocupación debido a su efecto tóxico en la salud humana; entre las formas de mercurio inorgánico, el catión mercúrico, Hg 2+, ha demostrado ser un agente tóxico predominante que puede causar daño a los riñones y los pulmones (De Oliveira D. et al., 2022, p.3).

Por tal motivo se busca resolver el siguiente problema: ¿Cuál es la importancia que presentan los materiales emergentes para la eliminación de mercurio en el medio hídrico, suelo y aire?

Así mismo se elaboraron las siguientes preguntas, como problemas específicos del estudio:

PE1: ¿Cuáles son los materiales emergentes más utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire?

PE2: ¿Cuál es la capacidad de adsorción de los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire?

PE3: ¿Cuál es el material de apoyo presente en los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire?

Es así como se planteó el objetivo de estudio: Analizar cuál es la importancia que presentan los materiales emergentes para la eliminación de mercurio en el medio hídrico, suelo y aire. De igual manera se plantearon los siguientes objetivos específicos:

OE1: Clasificar cuáles son los materiales emergentes más utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire

OE2: Analizar cuál es la capacidad de adsorción de los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire

OE3: Determinar cuál es el material de apoyo presente en los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire

El objetivo del estudio es sobre la base de estudios actualizados que traten de los materiales emergentes, por lo cual este trabajo presenta una justificación teórica; enfocándonos en los futuros investigadores para servir de base a nuevos trabajos de investigación científica que se deseen ampliar respecto a materiales emergentes como nanomateriales, humedales, nanotubos de carbono (CNT), nanoláminas, grafeno, el biocarbón, entre otros, para la eliminación de mercurio; con la finalidad de ayudar a brindar una amplia propuesta de métodos amigables con el ecosistema y medio ambiente.

II. MARCO TEÓRICO

Los antecedentes a nivel mundial de investigadores que aplicaron materiales emergentes para la eliminación de mercurio en el medio hídrico, suelo y aire, se muestran a continuación:

Ahamad T. et al., (2017); en su estudio estudió el efecto de diferentes parámetros de adsorción. Donde, se preparó un fosfato de zirconio magnético mesoporoso para la remoción de Hg^{2+} del medio acuoso y la magnetización de saturación de Fe_3O_4 puro y $Fe_3O_4@ZrP$ se observó en 82,9 y 62,4 emu/g, respectivamente. Los datos cinéticos se ajustaron a los modelos de pseudo primer y pseudo segundo orden, mientras que el proceso de adsorción se ajustó mejor al modelo de pseudo segundo orden. Por lo tanto, los presentes estudios sugirieron que $Fe_3O_4@ZrP$ tiene un potencial notable para la eliminación de Hg^{2+} del agua contaminada.

Alijani H. y Shariatnia Z., (2018); en su trabajo se estudió el efecto de variar la cantidad de agua sobre el rendimiento y la calidad de los SWCNT. Donde la síntesis asistida por agua de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNT) de alta calidad y alto rendimiento se realizó sobre un catalizador de Co-Mo/MgO mediante el método de deposición química de vapor (CVD). Se utilizó para adsorber el mercurio los SWCNT ya sintetizados empleando una solución acuosa, elaborándose dos nanohíbridos de magnetita con el fin de optimizar el proceso de adsorción. Al realizar esto se encontró que incrementando la relación agua – metano a 8% de volumen la calidad y efectividad de los nanotubos llegó al máximo nivel, pero al elevarse el vapor de agua al 20% se generó una considerable disminución de la calidad y rendimiento.

Behjati M. et al., (2018); en su estudio se propuso un adsorbente eficiente para la remoción de mercurio de aguas salinas contaminadas con iones de mercurio. Se modificaron nanopartículas de Fe_3O_4 utilizando tetraetilenpentamina y disulfuro de carbono para incorporar el grupo funcional ditiocarbamato en la superficie del adsorbente. Con el fin de mejorar este proceso se empleo metodología de superficie de respuesta, derivando en un

modelo cuadrático significativo con el efecto de la dosis de absorbente en la concentración inicial de Hg (II) siendo más representativo que el empleado en pH. Teniéndose como resultado un incremento en la capacidad de absorción al incrementar el pH obteniéndose exitosamente la recuperación del absorbente al usar HCl 0.5 mol L⁻¹.

Kenawy I. et al., (2018); en su investigación sobre la adsorción de Cd (II) y Hg (II) por nanopartículas de sílice mesoporosas modificadas con ácido tioglicólico preparadas por el procedimiento sol-gel. El comportamiento morfológico del sorbente preparado (MCM-41-TgA) se identificó mediante imágenes SEM y TEM, así como análisis de área de superficie BET y las propiedades químicas propuestas fueron confirmadas por análisis elemental, FT-IR, XRD y potencial zeta empleo espectros EDX y FT-IR para verificar este proceso. Se tuvo como resultado que la fase sólida posee una capacidad de absorción aproximadamente alta siendo esta de 91,3 y 42,8 mg g⁻¹ para Cd (II) y Hg (II) ajustándose al modelo de isoterma de Langmuir a los experimentos realizados verificándose la formación de una monocapa con espacios de adsorción homogéneos.

Bhatti A. et al., (2018); en su estudio ha sintetizado con éxito un nuevo material híbrido mesoporoso de un solo recipiente que contiene nanopartículas de hierro fabricadas con quitosano y *p*-sulfonato dansyl calix areno compuesto (Fe₃O₄@Chitosan-*p*SDCalix). Estas nanopartículas de hierro de fluorescencia mesoporosas se aplicaron para la detección y eliminación de iones Hg²⁺ tóxicos para el medio ambiente de medios acuosos. Aplicándose diferentes técnicas para verificar la preparación de Fe₃O₄ como HRTEM, TGA/DTA, FTIR y XRD encontrándose que las nanopartículas sintetizadas presentan un tamaño de 17nm con un poro de 0.19nm de acuerdo a lo obtenido por las imágenes HRTEM. Se concluye que el Fe₃O₄ sintetizado es un material híbrido que presenta eficiencia para detectar y eliminar Hg²⁺ en medios acuosos.

Chen G. et al., (2017); en su estudio utilizó nanopartículas de oro (Au NP) y la membrana de filtro correspondiente como quimiosensores y adsorbentes para la detección de amplificación de señal dual y la eliminación rápida de Hg

2+. Este sistema se justificó al formarse amalgama de oro al lado de una reacción entre rodamina B (RhB) y NaBH_4 con la capacidad de detectar fluorescencia y colorimetría. Esta se puede apreciar al cambiar gradualmente la concentración de Hg^{2+} y tornándose incoloro teniéndose como límite 1,16 nM y 2,54 nM para Hg^{2+} . Por ello se llega a la conclusión que las NP de oro al encontrarse inmóviles en la membrana de filtro facilitan eliminar de forma rápida los iones de mercurio presentes en el agua alcanzando una efectividad del 99%.

Gen Biyao et al., (2017); en su artículo fabricó un adsorbente de tipo aerogel de nano celulosa funcionalizado con tiol para la captura altamente eficiente de iones $\text{Hg}(\text{II})$ a través de una fácil liofilización de 2,2,6,6-tetrametilpiperidina-1-oxilo (TEMPO) derivado del bambú. Este producto pudo eliminar eficazmente iones $\text{Hg}(\text{II})$ en un porcentaje mayor al 92% no viéndose comprometida la capacidad del aerogel para producir adsorción. En referencia a las aguas residuales con cloro – álcali que tienen iones de $\text{Hg}(\text{II})$ este adsorbente tuvo una eficacia para eliminarlos del 97.8% no deteriorándose su capacidad de adsorción.

Ghasemi E. et al., (2017); en su estudio se sintetizó y utilizó un nuevo nanosorbente superparamagnético de alta eficiencia, nanopartículas de Fe_3O_4 funcionalizadas con EDTA para la adsorción y eliminación de algunos metales pesados de muestras ambientales. Las propiedades de las nanopartículas magnéticas sintetizadas se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FT-IR) y difracción de rayos X en polvo (XRD). Después del proceso de adsorción, la separación de Fe_3O_4 Las nanopartículas @EDTA de la solución acuosa se lograron simplemente aplicando un campo magnético externo. En las condiciones óptimas, las eficiencias y capacidades de adsorción de los nanoadsorbentes superparamagnéticos Fe_3O_4 @EDTA hacia $\text{Ag}(\text{I})$, $\text{Hg}(\text{II})$, $\text{Mn}(\text{II})$, $\text{Zn}(\text{II})$, $\text{Pb}(\text{II})$ y $\text{Cd}(\text{II})$ fueron en el rango de 96–104% y 71–169 mg g⁻¹, respectivamente. La eficiencia de adsorción promedio y la capacidad para

eliminar simultáneamente los iones objetivo fueron $\geq 99\%$ y $\geq 112 \text{ mg g}^{-1}$, respectivamente.

Ma Yaguang et al., (2018); en su artículo preparó nanopartículas de óxido mixto de Fe-Ce soportadas por nanotubos de carbono de pared múltiple (Fe (2) Ce (0,5) O_x /MWCNT) utilizando el método de impregnación con etanol para la eliminación de DeNO_x y Hg⁰. Las eficiencias de remoción de NO y Hg⁰ sobre el catalizador alcanzaron 99.1% y 88.9% a 240 °C y una velocidad espacial de 30 000 h⁻¹. Los óxidos mixtos Fe-Ce soportados tanto dentro como fuera de los MWCNT en forma altamente dispersa con un tamaño de partícula de 3 a 5 nm. El Ce⁴⁺ existía en los MWCNT en dos formas, algunas de las cuales son el cristal CeO₂ similar a la fluorita; la otra porción de Ce⁴⁺ entró en la estructura de espinela de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ y condujo a la distorsión de la red $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$.

Maia Luiz F. et al., (2019); preparó nanopartículas de $\delta\text{-FeOOH}$ funcionalizadas con L-cistina (Cys- $\delta\text{-FeOOH}$) mediante un método económico y sencillo para usar como adsorbente de Hg (II) en solución acuosa. La difracción de rayos X (XRD), la espectroscopia infrarroja de reflectancia total atenuada (ATR-IR) y la espectroscopia Raman confirmaron que Cys- $\delta\text{-FeOOH}$ se sintetizó con éxito. Cys- $\delta\text{-FeOOH}$ con un tamaño de cristal de 14 nm, 34 m² g⁻¹ se produjeron un área superficial y un tamaño de poro de 9 nm. La funcionalización de la superficie de $\delta\text{-FeOOH}$ con cisteína disminuye el punto de carga cero del oxihidróxido de hierro de 8,4 en $\delta\text{-FeOOH}$ a 5,7 en Cys- $\delta\text{-FeOOH}$, lo que es beneficioso para la adsorción de Hg (II) cerca de pH neutro y la capacidad máxima de adsorción de Hg (II) de $\delta\text{-FeOOH}$ y Cys- $\delta\text{-FeOOH}$ a pH 7 resultó ser de 35 mg g⁻¹ y 217 mg g⁻¹, respectivamente.

Manna B. et al., (2018); en su estudio demostró la detección electroquímica selectiva de Hg (II) y su eliminación utilizando óxido de grafeno reducido dopado con azufre tridimensional poroso (p S-rGO). El recocido térmico de óxido de grafeno en presencia de disulfuro de dibencilo y plantilla de sílice a una temperatura controlada de 900 °C produce p S-rGO, y tiene una gran área superficial de 449,43 m² g⁻¹ y 9,96 % de azufre en el carbono la red.

La interacción favorable de Hg (II) con pDebido a la estructura porosa y la presencia de una gran cantidad de azufre tiofénico, S-rGO se aprovecha para la detección electroquímica y la eliminación de Hg (II). La detección electroquímica selectiva de Hg (II) se demuestra al potencial de 0,2 V sin ninguna interferencia de otros iones metálicos coexistentes. La eliminación de Hg (II) del agua se demuestra con éxito con p S-rGO. Tiene una alta capacidad de captación de Hg (II) de $829,27 \pm 7,19 \text{ mg g}^{-1}$, que es mayor que la capacidad de absorción de rGO poroso no dopado y S-rGO no poroso.

Ante los estudios realizados se pudo observar la problemática existente por la contaminación de los recursos agua, suelo y aire, debido al Hg; ante ello a continuación se extiende la información de la problemática y propuesta de solución del presente estudio.

El amplio uso de soluciones de metales pesados en muchas actividades industriales (fabricación de baterías, pintura, etc) da lugar a la generación de grandes cantidades de efluentes que contienen altos niveles de metales pesados (Wu Q. et al., 2017, p.2). La mayoría de ellos son agentes tóxicos y cancerígenos y su presencia en el ecosistema acuático supone un riesgo para la salud humana debido a su naturaleza no degradable y persistente (Mallongi A. et al., 2020, p.2).

Así también el Hg en el aire, de acuerdo con el informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), se estima que las emisiones globales de mercurio a la atmósfera de fuentes antropogénicas en 2015 fueron de unas 2220 toneladas (Gyamfi O. et al., 2021, p.3).

Entre estos iones metálicos los iones de mercurio (Hg (II)) se consideran uno de los metales pesados más ubicuos y peligrosos en las masas de agua, así también en cadena generando la rápida contaminación del suelo y hasta el aire (Mohan M. et al., 2021, p.2).

El mercurio (II) y sus compuestos han planteado durante mucho tiempo un dilema a los interesados en aprovechar sus numerosas y variadas propiedades (Song Wenjuan et al., 2021, p.1). Por un lado, el mercurio tiene

muchas propiedades atractivas y útiles, pero por otro lado presenta un riesgo de efectos tóxicos (Voros Dominik et al., 2018, p.2).

Es así que el Hg ocupa el sexto lugar entre las sustancias químicas más tóxicas de la lista de compuestos peligrosos (Mills William F. et al., 2022, p.4). Mediante la tabla 1 se resume las principales formas químicas y físicas del mercurio.

Tabla 1: Formas físicas y químicas del mercurio: Algunas vías recientes y actuales de exposición humana

Mercurio inorgánico		
Vapor de Hg	Mercurioso	Mercúrico
Hg⁰	Hg-Hg ₂ ,+	Hg ₂ ,+
Ocupacional	Laxantes	Cremas para la piel
amalgama dental	Dentición polvos	
Mercurio orgánico		
Alquilo de cadena corta	Otros orgánicos	
CH₃(CH₂)_n-Hg⁺	(R-C-Hg ⁺)	
Metilmercurio en el pescado	Fenil Hg antiséptico	
Etilmercurio en conservantes	Mercurio diuréticos	

Fuente: Mills William F. et al., (2022)

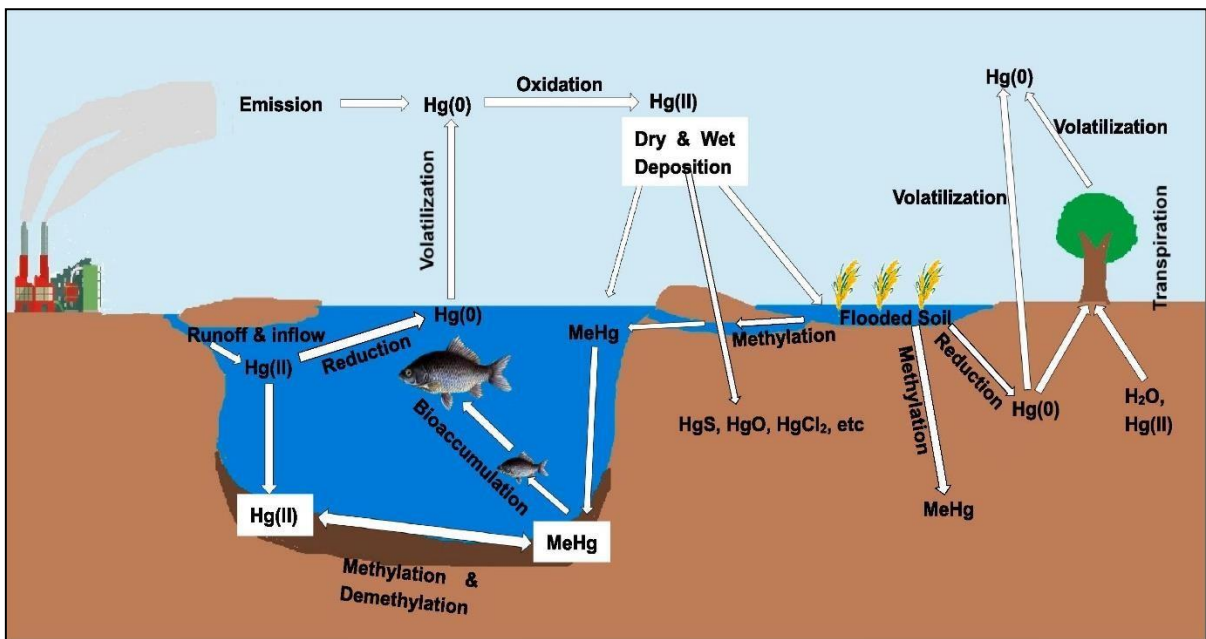
En su estado de oxidación cero, Hg⁰, existe en su forma líquida plateada como el único metal que es un líquido a temperatura ambiente; el líquido es volátil y libera un gas monatómico que suele denominarse vapor de mercurio (Lewis Ariel S. et al., 2016, p.3).

Una vez emitido a la atmósfera, el Hg se puede transportar y mezclar completamente en su forma elemental [Hg (0)] y el principal sumidero de mercurio elemental es la deposición en el suelo o cuerpos de agua después de la oxidación a mercurio divalente [Hg (II)] (Ver figura 1).

Por causa de ello, el nivel de concentración de Hg en la columna de agua se ve afectado principalmente por la ubicación de la zona respecto a sus fuentes puntuales de contaminación (Ma Yanju et al., 2021, p.2).

Esto puede atribuirse a las grandes cantidades de sílice generadas y emitidas, al flujo de viento hacia el lugar y a la producción continua de cemento de la planta que utiliza la sílice como materia prima básica (Rimondi V. et al., 2019, p.1). Así también, la magnitud del Hg en el aire puede atribuirse directamente a las emisiones de la planta y a los residuos industriales volátiles (Seelen Emily A. et al., 2021, p.4).

Figura 1: Transferencia entre fases y transporte de mercurio en suelo, agua y aire



Fuente: He Feng et al., (2016)

Entre las fuentes antropogénicas generadoras de Hg, la combustión estacionaria de combustibles fósiles representa el 24 % de las emisiones estimadas, principalmente de la quema de carbón (21 %) (Beau Frpederic et al., 2019, p.1). También las actividades industriales, como la producción de cloro y sosa cáustica, y las aplicaciones eléctricas, como las lámparas, los rectificadores de arco y las células de mercurio, como fuentes de Hg(II) (Mantey J. et al., 2020, p.2)

Otras fuentes antropogénicas incluyen la producción de cemento, la producción de hierro y acero, la fundición de metales no ferrosos, la producción de oro, la industria cloroalcalina, la eliminación de residuos, así

como la producción directa de mercurio (Mahbub Khandaker R. et al., 2020, p.3).

Pero, entre las formas de mercurio inorgánico, el catión mercúrico, Hg^{2+} , ha demostrado ser un agente tóxico predominante que puede causar daño a los riñones y los pulmones (Beckers D. et al., 2017, p.2). Debido a ello, la contaminación por mercurio es motivo de gran preocupación en todo el mundo debido a su efecto tóxico en la salud humana (Wu Qingru et al., 2018, p.2).

Los efectos toxicológicos y cancerígenos de los iones de Hg(II) , incluso en forma de ultratrazas (nivel permitido: $1 \mu\text{g/L}$ a $10 \mu\text{g/L}$), pueden destruir el sistema nervioso central y provocar la muerte (Siric I. y Falandysz J., 2020, p.3). También, el Hg(II) deteriora la función pulmonar, además de inducir disnea y dolor en el pecho (Balón Pauline et al., 2022, p.2).

Así también una vez transformado en sus formas organomercúricas, como el metilmercurio (MeHg), el Hg actúa como una potente neurotoxina que altera la función cerebral. Aparte de la alta toxicidad de esta forma de mercurio, ha suscitado especial preocupación por su capacidad para biomagnificar la cadena alimentaria (O Connor D. et al., 2019, p.3).

Sin embargo, los esfuerzos de control por parte de las agencias gubernamentales se han centrado principalmente en los peces y los mamíferos marinos, donde el ión Hg(II) sigue siendo un producto de alto riesgo de contaminación principalmente en los seres acuáticos (De Almeida R. et al., 2019, p.5).

Los iones Hg(II) también provocan la rotura de cromosomas en los seres humanos, así como defectos genéticos en la división celular, lo que da lugar a la aparición de enfermedades. Como, por ejemplo; defectos genéticos con la división celular, lo que resulta en una distribución anormal de los cromosomas (Pinzone M. et al., 2019, p.4).

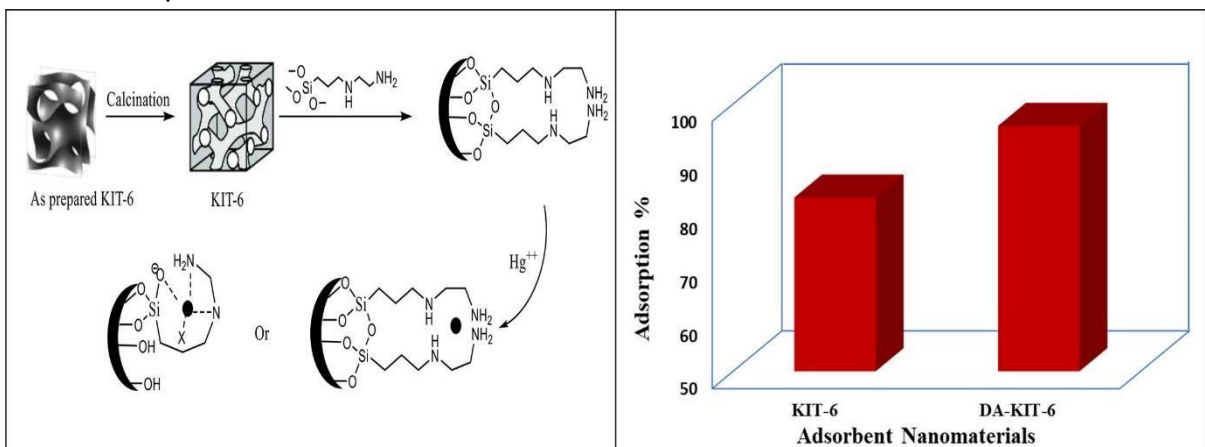
Ante la problemática mencionada los materiales emergentes en comparación con las tecnologías de remediación convencionales han demostrado ser más

rentables y respetuosos con el medio ambiente. Ante ello, los materiales con una alta área superficial una gran porosidad y sitios activos para la adsorción, se han examinado exhaustivamente en estudios recientes (Kumar N. et al., 2019, p.1).

Entre estos los nanomateriales basados en el carbono, es decir, el grafeno y los nanotubos de carbono (CNT), desde su descubrimiento se ha producido una investigación muy intensa en el mundo basada en su síntesis y aplicaciones (Wang Hong et al., 2016, p.2). Y es que presentan importantes características como su pequeña dimensión, a su resistencia y a la vez ligereza y a otras propiedades eléctricas, mecánicas y químicas únicas (Bhattacharya K. et al., 2016, p.1). Ver figura 2.

Entre los diversos nanomateriales basados en el carbono, los nanotubos de pared simple (SWNT) son especialmente intrigantes, ya que tienen una estructura atómicamente bien definida y constituyen un modelo ideal de nanoestructuras de baja dimensión (Schneider V. et al., 2016, p.1). Además, se han desarrollado diversas técnicas para la síntesis de CNT, pero se producen principalmente por descarga de arco, ablación por láser y deposición (Gomulya Widianta et al., 2016, p.3).

Figura 2: Eliminación de mercurio del sistema acuoso utilizando materiales de sílice mesoporosos cúbicos

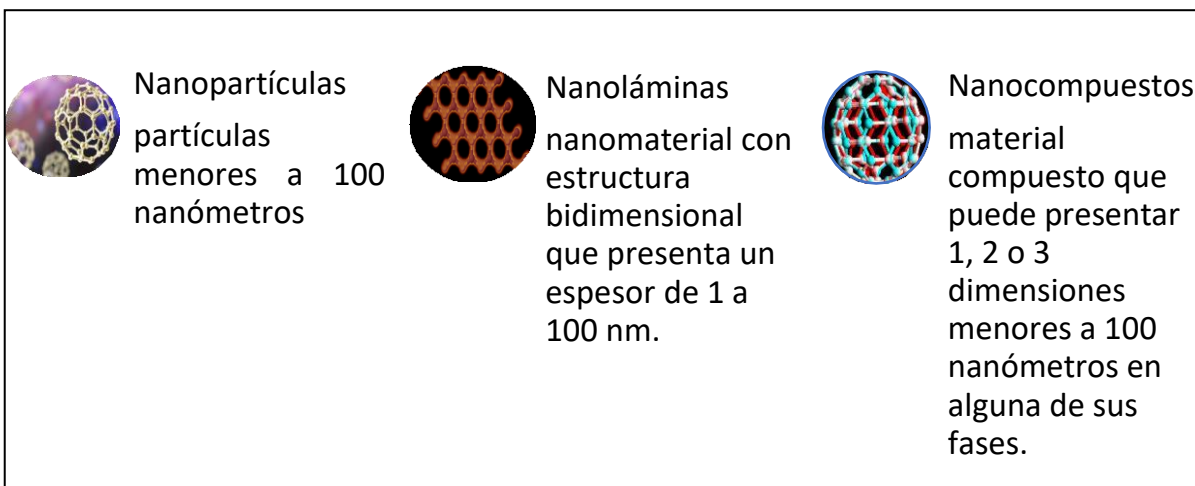


Fuente: Rabie A. et al., (2019)

En la figura 2 se muestra la remoción de Hg 2+ por adsorción aplicando diversas condiciones donde la optimización de parámetros mostró que la tasa de Hg 2+ por la adsorción de DA-KIT-6 es mejor que la de KIT-6 mesoporoso, que proporcionó una tasa de adsorción de equilibrio del 95,9 % y 82,5 %, respectivamente, después de 60 min a temperatura ambiente.

Así mismo, los materiales mesoporosos que tienen una alta área superficial y una alta porosidad se consideran un material prometedor en el campo del tratamiento de aguas residuales y eliminación de mercurio (Li Guoliang et al., 2017, p.2). Siendo clasificados los nanomateriales como se observa en el gráfico 1.

Figura 3: División de tres tipos de nanomateriales



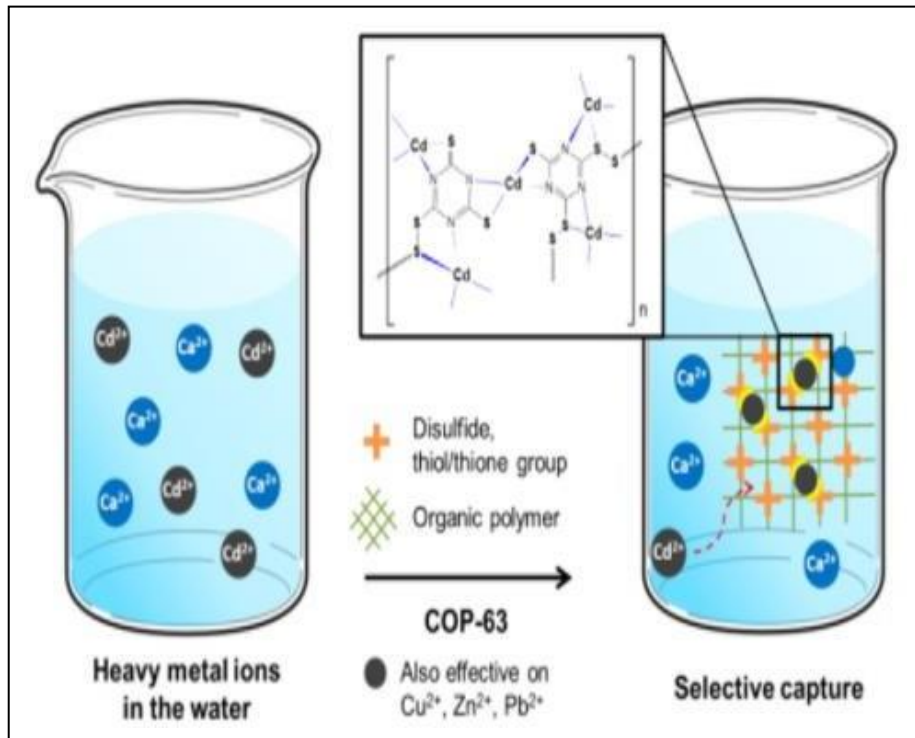
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, teniendo en cuenta diversos desafíos el uso de polímeros orgánicos porosos (POPs) viene siendo investigado como un adsorbente prometedor para la descontaminación de metales pesados (Mthombeni N. et al., 2016, p.6). Los POPs son una clase floreciente de material poroso, que ofrece una diversidad estructural, tamaño de poro ajustable, alta superficie y estabilidad química (Sherlala A. et al., 2018, p.2).

Además, los polímeros orgánicos, que son macromoléculas de cadena larga compuestas por muchas unidades monómeras repetitivas, se usan comúnmente en la purificación del agua hoy en día (Yadav A. y Sinha N.,

2021, p.2). Su aplicación habitual en la purificación de agua potable es como coagulantes primarios o coadyuvantes de coagulación y estos compuestos tienden a adsorber fuertemente las partículas sobre su superficie en una suspensión acuosa. (Ver figura 3).

Figura 4: Mecanismo de interacción entre los iones de metales pesados y los grupos de azufre en un polímero orgánico covalente suspendido en agua



Fuente: Maiti Abhijit et al., (2021)

Los POPs han sido considerados como material estable para la descontaminación eficaz de mercurio; sin embargo, se requieren cantidades estequiométricas de catalizador para la síntesis del marco y se requiere una modificación postsintética de varios pasos, lo que contribuye a la impracticabilidad en aplicaciones a gran escala (Aguila B. et al., 2017, p.2).

Además, los materiales poliméricos orgánicos se clasifican en gran medida en polímeros biodegradables naturales y polímeros sintéticos biodegradables no tóxicos (Donga C. et al., 2019, p.4). Y para mejorar el rendimiento de los polímeros orgánicos prístinos, sus estructuras naturales se modifican

mediante enzimas, productos químicos y tratamiento térmico (Rullyani Cut et al., 2018, p.2).

Es así que, tanto los polímeros orgánicos naturales, como el quitosano de la desacetilación alcalina de la quitina, como los polímeros orgánicos sintéticos, como la polivinilpirrolidona (PVPy), la polilactida y la polianilina (PAN), no son tóxicos, son biocompatibles, químicamente estables y ambientalmente benignos (Rullyani et al., 2018, p.2).

Estas cualidades hacen que los polímeros de ingeniería orgánica sean aplicables en una amplia gama de áreas en el campo científico, como la eliminación de iones de metales de transición y tintes de aguas residuales, y en la construcción de membranas antibacterianas (Bhunias P. et al., 2018, p.1).

III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de investigación

El tipo de investigación usado fue la investigación aplicada, siendo este descrito como el conocimiento adquirido de información teórica y práctica de estudios científicos en los que se aplican los datos adquiridos a la solución de un problema en específico que involucre a la sociedad (Tomayo T., 2006, p.2). Por tal motivo, se aplicó el tipo de investigación aplicada, ya que, mediante la recolección y análisis de estudios como artículos científicos acerca de los materiales emergentes para la eliminación de mercurio en el medio hídrico, suelo y aire se buscará resolver la problemática planteada.

Además, el diseño usado fue el narrativo de tópico; siendo este el tipo de diseño que va a narrar y contar pasas de vida de uno o un grupo de personas, para para brindar nuevos conocimientos, sin ser alterada la información (Hernández, 2016, p.702). Dicho ello se menciona que el estudio utilizó el diseño narrativo de tópico porque se centró en un fenómeno en especial el cual es contar de qué manera los materiales emergentes sirven para la eliminación de mercurio en el medio hídrico, suelo y aire.

3.2 Categoría, subcategoría y matriz de categorización

Las sub categorías alboradas en base a las categorías son informaciones pre establecidas que se buscaron para desarrollar los problemas y objetivos específicos. (Ver tabla1).

Tabla 2: Matriz de Categorización Apriorística

Objetivos específicos	Problemas específicos	Categoría	Subcategoría	Unidad de análisis
Clasificar cuáles son los materiales emergentes más utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire	¿Cuáles son los materiales emergentes más utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire?	Materiales emergentes más utilizados (De Oliveira D. et al., 2022, p.3)	Nanotubos de carbono (CNT) Fe 3 O 4 nanopartícula Nanopartícula Ti-Al-Ce (Alijani H. y Shariatinia Z., 2018, p.2)	De acuerdo a la capacidad de remoción
Analizar cuál es la capacidad de adsorción de los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire	¿Cuál es la capacidad de adsorción de los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire?	Capacidad de adsorción de los materiales emergentes (Ahamad T. et al., 2017, p.4)	Capacidad de adsorción alta Capacidad de adsorción media Capacidad de adsorción baja (Behjati M. et al., 2018, p.3)	De acuerdo a la especie de mercurio tratada
Determinar cuál es el material de apoyo presente en los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire	¿Cuál es el material de apoyo presente en los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire?	Material de apoyo presente en los materiales emergentes (Kenawy I. et al., 2018, p.2)	Polímero orgánico poroso Quitosano MWCNT (Beckers F. et al., 2017, p.2).	De acuerdo al material emergente utilizado

Fuente: Elaboración propia

3.3 Escenario de estudio

El escenario al ser la descripción y características del lugar donde se realiza un estudio, fue tomado por la presente investigación a los laboratorios, lugares de muestreo, campus universitarios, entre otros lugares encontrados en los artículos científicos estudiados, debido a que este es una revisión sistemática, serán los escenarios los diversos lugares donde estos estudios revisados llegaron a cabo sus estudios de eliminación de Hg.

3.4 Participantes

Los participantes que fueron considerados en este trabajo fueron: Redalyc, Sciencedirect y Pubmed. Siendo estos los portales y bibliotecas virtuales de mayor acceso y confiables que permiten obtener estudios indizados como artículos científicos a nivel nacional e internacional.

3.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Una de las técnicas usadas en el presente estudio es la técnica de análisis documental, en el cual; el cual ha representado de manera sistemática los documentos originales, para facilitar de esa manera, las consultas y su recuperación de información.

Así mismo, el instrumento usado fue la ficha de análisis de contenido; siendo este documento utilizado en el presente trabajo a través de la cual se realizó el análisis documental permitiéndonos recolectar los datos de forma analítica.

3.6 Procedimiento

Tabla 3: Procedimiento de recolección de artículos

ARTICULOS DE REVISION LITERARIA					
TIPO DE DOCUMENTO	PALABRAS CLAVE	FUENTE	INCLUSION	EXCLUSION	TOTAL
Artículos científicos	emerging materials, mercury contamination, water environment, soil contamination, air contamination.	Sciencedirect (31)	<ul style="list-style-type: none"> - Investigaciones potencialmente relevantes al tema - Por ser leídos de manera completa 	<ul style="list-style-type: none"> - Por duplicidad - Por no contar con el año de antigüedad requerido - No presentar los materiales carbonosos - No presentar la activación de los persulfatos 	Total de artículos incluidos en la presente investigación después de la inclusión y exclusión.
		Redalyc (17)			
		Pubmed (27)			
Cantidad		75	17	52	40

Fuente: Elaboración propia

3.7 Rigor científico

El rigor científico busca la integridad de los datos plasmados y que las conclusiones reflejen lo recopilado, por ello se busca transparencia y veracidad de la información. Existen tres criterios que permiten evaluar la autenticidad de una investigación, la credibilidad, confirmabilidad y transferibilidad (Arias M., Giraldo C., 2011, p. 504).

El criterio credibilidad permite que los datos obtenidos puedan ser reconocidos por los sujetos que participaron, donde habrá congruencia entre los resultados obtenidos en el trabajo de investigación y los sucesos recopilados por el investigador. Se infieren conclusiones que son reconocidos por los participantes (Salgado Lévano, 2007, p. 6).

El criterio confirmabilidad tiene como fin garantizar la neutralidad con la que se proyecta los datos recopilados donde los resultados reflejen la transparencia en la que se emitieron las descripciones por los sujetos participantes. Además, con este criterio se puede conocer las limitaciones o alcances que encuentra el investigador para controlar posibles juicios y mantener la neutralidad sobre los sucesos o participantes (Salgado Lévano, 2007, p.5).

El criterio transferibilidad permite que los resultados de una investigación puedan ser transferidos a otros contextos, es decir si bien los fenómenos surgen en un determinado tiempo y espacio y estos no son transferibles, a través de descripciones detalladas y el conocimiento que tenga de ellas el investigador se puede lograr la transferibilidad (Castillo y Vásquez, 2009, p.4). Logrando así descubrir lo común y comparar con otros estudios el contexto, tiempo y participantes vinculados al fenómeno.

3.8 Método de análisis de información

Para el presente estudio de investigación se usó el procedimiento de búsqueda nacional e internacional en diversos idiomas como español, inglés y portugués; ello en base a la importancia que presentan los materiales emergentes para la eliminación de mercurio en el medio hídrico, suelo y aire;

donde, de acuerdo a los problemas y objetivos específicos, se dividió en categorías y sub categorías que se muestran a continuación:

Categorías:

C1: Materiales emergentes más utilizados

C2: Capacidad de adsorción de los materiales emergentes

C3: Material de apoyo presente en los materiales emergentes

Sub categorías:

SC1: Nanotubos de carbono (CNT), Fe₃O₄ nanopartícula, Nanopartícula Ti-Al-Ce

SC2: Capacidad de adsorción alta, Capacidad de adsorción media, Capacidad de adsorción baja

SC3: Polímero orgánico poroso, Quitosano, MWCNT

3.9 Aspectos éticos

Los aspectos éticos fueron cumplidos siguiendo con la referencia bibliográfica establecida de acuerdo a la Norma ISO 690-2, así mismo cumpliendo con el código de ética de la Universidad Cesar Vallejo; por último, se pasó por el programa antiplagio Turnitin para brindar la certeza que la información proporcionada en este estudio es auténtica y no se incumple con los derechos a la autoriza de ningún estudio usado.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo general es analizar cuál es la importancia que presentan los materiales emergentes para la eliminación de mercurio en el medio hídrico, suelo y aire; para lo cual, para el desarrollo de este problema de estudio se desarrollarán los 3 problemas específicos.

Siendo estos detallados mediante la tabla 4, materiales emergentes más utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire; así mismo, en la tabla 5, donde se analiza cual es la capacidad de adsorción de los materiales emergentes utilizados y por último, mediante la tabla 6, donde se determina mediante la comparación de estudios el constituyente activo presente en los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire.

Tabla 4: Materiales emergentes más usados

Escriba	Proceso de síntesis	Tamaño de poro (nm)	Capacidad de adsorción (mg/g)	Capacidad de remoción de Hg	Referencia
Nanohoja de MoS ₂	Método hidrotérmico de un paso	0.94	2563	99,8% (inicial 10 mg/L Hg ²⁺)	(Ai et al., 2016)
Nanotubos de carbono (CNT)	Síntesis hidrotérmica	2.70	58.8	91,7% (inicial 10)	(Moghadam y

	ermal simpl e			mg/L Hg ²⁺)	Pakizeh, 2015) (Alimoha mmady M. et al., 2018; Hadavifa r M. et al., 2016; Deb A. et al., 2017)
Fe ₃ O ₄ nan opartícula	Sínte sis hidrot ermal simpl e	5– 20	52.1	97,8% (inicial 60 mg/L Hg ²⁺)	(Venkat eswarlu y Yoon, 2015) (Bao S. et al., 2017; G hasemi E. et al., 2017; Zarei S. et al., 2018)
Sílice mesoporosa	méto do sol- gel	2.35	42.8	95% (inicial 10 mg/L Hg ²⁺)	(Kenawy et al., 2018) (Awual M. et al., 2016 y Shafiaba

					di et al., 2016)
Ti-Al-Ce nanoparticle	método sol-gel	5	n / A	80,5 % (inicial 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ Hg(0))	(Zhang et al., 2017b)
Nanocelulosa	Hidrólisis ácida	45–75	98	98,6% (inicial 100 mg/L Hg ²⁺)	(Ram y Chauhan , 2018)

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla 4, se tiene que los materiales emergentes más utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire son los nanomateriales basados en carbono, como los nanotubos de carbono (CNT). De acuerdo con Hadavifar M. et al., (2016, p.6), están ganando mucho interés y, para mejorar su interactividad, se introducen grupos amina o tiol mediante funcionalización química.

Así también, se encontró que las nanopartículas de óxido ferroférico (Fe₃O₄) son otro material emergente para la remediación de Hg, que poseen algunas propiedades sobresalientes, como facilidad de recuperación, superparamagnetismo y gran área de superficie.

Siendo los siguientes autores quienes apoyan las afirmaciones realizadas; Moghaddam y Pakizeh, 2015; Alimohammady M. et al., 2018; Hadavifar M. et al., 2016; Deb A. et al., 2017; usando nanotubos de carbono (CNT) como material emergente para la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire.

Pero, Kenawy et al., (2018); presenta otro contraste, utilizando en su estudio la sílice mesoporosa y señalando mediante su estudio que este material también se aplica con frecuencia debido a una relación de área superficial a

volumen significativamente mayor, pero rara vez se usa sola sin modificaciones. Así también lo respalda Awual M. et al., 2016 y Shafiabadi et al., 2016.

Además, Maia L. et al., (2019, p.4), afirma que después de la funcionalización de diferentes tipos de nanomateriales; ya sean nanohoja de MoS₂, nanotubos de carbono (CNT), Fe₃O₄ nanopartícula, sílice mesoporosa, Ti-Al-Ce nanoparticle o nanocelulosa la capacidad de adsorción de Hg aumenta significativamente.

Lo que es apoyado por los resultados presentes en el estudio de Ram y Chauhan, (2018), quien utilizando nanocelulosa presentó una capacidad de adsorción de 98 mg/g lo que equivale a un porcentaje de remoción del 98.6%.

Así también, Ai et al., (2016), en su estudio aplicó nanohojas de MoS₂ como material emergente para la remediación del mercurio obteniendo una capacidad de adsorción de 2563 mg/g, lo que generó una capacidad de adsorción del 99.8% de Hg; siendo respaldado la afirmación de Maia L. et al., (2019, p.4).

Por otro lado, se determina cuál es el constituyente activo presente en los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire, mediante la elaboración de la tabla 5.

Tabla 5: Capacidad de adsorción de materiales emergentes

Constituyente s activos	Materi al de apoyo	Medios objetiv o	Esp ecie s de mer curi o trat ada s	Capacidad de adsorción (mg/g)	Refere ncia

Azufre	–	Gas de combustión	Hg(0) (G)	0.151 95%	(Abraham A. et al., 2018)
grupo tiol	polímero orgánico poroso	Gas de combustión y Agua	Hg(0), Hg ²⁺	630 [Hg(0)], 1216 (Hg ²⁺)	(Aguilera B. et al., 2017)
L-cisteína	polipirrol	Agua	Hg ²⁺	2042.7 / 97%	(Ballav et al., 2018)
polianilina	Fosforato de Zr(IV)	Agua	Hg ²⁺	153.85	(Bushra R. et al., 2017)
Azufre	1,3-diisopropenil benceno	Agua	Hg ²⁺	96%	(Hasel I T. et al., 2016)
Azufre	–	Agua	Hg ²⁺	84%	(Parker D. et al., 2017)
Polietilenimina	Quitosano	Agua	Hg ²⁺	1594 / 98%	(Zeng H. et al., 2019)
ZRP	Fe ₃ O ₄	Agua	Hg ²⁺	181.8	(Ahmad T. et al., 2017)
átomos de azufre	MoS ₂	Agua	Hg ²⁺	2563	(Ai K. et al., 2016)

Algo	SWCN T	Agua	Hg ²⁺	1666	(Alijan i H. y Shariat inia Z., 2018)
3-aminopirazol	MWC NT	Agua	Hg ²⁺	112 98.3%	(Alimo hamm ady M. et al., 2018)
Grupos que contienen oxígeno	MWC NT	Agua	Hg ²⁺	186.97	(Alom ar M. et al., 2017)
Ligando orgánico de amonio	MS	Agua	Hg ²⁺	164.22	(Awua I Md. et al., 2016)
Grupos amina y tiol	Si-Fe	Agua	Hg ²⁺	355	(Bao S. et al., 2017)
grupo funcional ditiocarbamato	Si-Fe	Agua	Hg ²⁺	82	(Behja ti M. et al., 2018)
nitrógeno y amida	Fe ₃ O 4	Agua	Hg ²⁺	86.8	(Bhatti A. et al., 2018)
Oro	FP	Agua	Hg ²⁺	99%	(Chen G. et al., 2017)
grupo funcional tiol	NC	Agua	Hg ²⁺	718.5	(Geng B. et

					al., 2017)
EDTA	Fe ₃ O ₄	Suelo	Hg ²⁺	112	(Ghasemi E. et al., 2017)
Grupos amino y funcionales	MWCNT	Agua	Hg ²⁺	204.64	(Hada vifar M. et al., 2016)
ácido tioglicólico	MS	Agua	Hg ²⁺	42.8	(Kena wy I. et al., 2018)
ZnS	ZnS	Suelo	Hg(0)	0.50	(Li H. et al., 2016)
UiO-66-NH₂	Pt	Agua	Hg ²⁺	206.25	(Li H. et al., 2017)
Óxidos mixtos Fe-Ce	MWCNT	Gas de combustión	Hg(0)	69.4%	(Ma Y. et al., 2018)
L-cisteína	FeOOH	Agua	Hg ²⁺	217	(Maia L. et al., 2019)
átomos de azufre	GO	Agua	Hg ²⁺	829.27	(Maná B. y Raj C., 2018)
grupo OH y Al-O-Si	WTR	Suelo	Hg ₂ (OH) ₂ , Hg ₂	93.89%	(Moha rem M. et al., 2019)

			CO ₃		
ácido 3-mercaptopropiónico	NC	Agua	Hg ²⁺	98.6	(Ram B. y Chauhan G., 2018)
polipirrol	MS	Agua	Hg ²⁺	200	(Shafiqabadi M. et al., 2016)
amidoamina	MWCNT	Agua	Hg ²⁺	101.35	(Deb A. et al., 2017)
átomos de azufre	MoS ₂	Agua	Hg ²⁺	425.5	(Song Y. et al., 2018)
FeS	NC	Agua	Hg ²⁺	1989	(Sun et al., 2018)
Óxido binario de hierro-manganeso magnético	CNF	Gas de combustión	Hg(0)	90%	(Yang J. et al., 2018a)
CuS	CuS	Gas de combustión	Hg(0)	122.4	(Yang Z. et al., 2018)
nanocelulosa	Fe ₃ O ₄	Agua	Hg ²⁺	926.3	(Zarei S. et al., 2018)

Ce⁴⁺ / Ce³⁺	T-A-C	Gas de combustión	Hg(0)	80.54%	(Zhang J. et al., 2017)
MoS₂	γ-Al ₂ O ₃	Gas de combustión	Hg(0)	18.95	(Zhao H. et al., 2016)
MoS₂	γ-Al ₂ O ₃	Gas de combustión	Hg(0)	98. 9%	(Zhao H. et al., 2018)

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la tabla 5, se tiene que la capacidad de adsorción de los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire es alta, ello debido a su tamaño pequeño y otras propiedades eléctricas, mecánicas y químicas únicas.

Presentando soporte a lo mencionado, Abraham A. et al., (2018), menciona que mediante la síntesis de un material mesoporoso magnético (Fe₃O₄@ZrP), pudo obtener una eliminación eficaz del ion metálico Hg²⁺, altamente tóxico, del medio acuoso en un 95%.

Por su parte Ghasemi E. et al., (2017); respalda las afirmaciones hechas mencionando que en su estudio los resultados revelaron que el nanoadsorbente aplicado podría usarse como un material altamente eficiente, de regeneración rápida, reutilizable y rentable para la eliminación de iones de metales pesados de muestras ambientales de agua y suelo.

Así también, Zhao H. et al., (2018), menciona que se puede mostrar un excelente rendimiento con una eliminación casi completa de Hg⁰. De igual manera Ballav et al., (2018), obteniendo un 97% de capacidad de remoción del Hg²⁺.

De acuerdo con Zhao Haitao et al., (2018), los materiales emergentes como las nanoláminas aunque se utilizan con menos frecuencia que las

nanopartículas y los nanocompuestos, también pueden lograr una alta capacidad de adsorción tanto de Hg (0).

Ante ello, se obtuvo que el mercurio más tratado es el Hg 2+, con un 76% de estudios confirmándolo de acuerdo con el promedio de la tabla 4, mientras que el Hg (0) es tratado en un 24%.

Siendo así corroborado por (Geng B. et al., 2017), (Ghasemi E. et al., 2017), (Hadavifar M. et al., 2016) y (Kenawy I. et al., 2018); quienes trataron el Hg 2+ del agua, suelo, agua y agua respectivamente.

Por último, mediante la elaboración de la tabla 6 se determinó el constituyente activo presente en los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire; teniendo como unidad de análisis el material emergente utilizado.

Tabla 6: Material de apoyo en los materiales emergentes

Constituyentes activos	Material de apoyo	Especies de mercurio tratadas (medio objetivo)	Referencia
Azufre	–	Hg (0)	(Abraham A. et al., 2018)
Grupo tiol	polímero orgánico poroso	Hg(0), Hg ²⁺	(Aguila B. et al., 2017)
L-cisteína	polipirrol	Hg ²⁺	(Ballav et al., 2018)
polianilina	Fosfoborato de Zr(IV)	Hg ²⁺	(Bushra R. et al., 2017)

Azufre	1,3-diisopropenil benceno	Hg ²⁺	(Hasell T. et al., 2016)
Azufre	–	Hg ²⁺	(Parker D. et al., 2017)
Polietilenimina	Quitosano	Hg ²⁺	(Zeng H. et al., 2019)
ZRP	Fe ₃ O ₄	Hg ²⁺	(Ahamad T. et al., 2017)
Átomos de azufre	MoS ₂	Hg ²⁺	(Ai K. et al., 2016)
Algo	SWCNT	Hg ²⁺	(Alijani H. y Shariatinia Z., 2018)
3-aminopirazol	MWCNT	Hg ²⁺	(Alimohamady M. et al., 2018)
Grupos que contienen oxígeno	MWCNT	Hg ²⁺	(Alomar M. et al., 2017)
Ligando orgánico de amonio	MS	Hg ²⁺	(Awual Md. et al., 2016)
Grupos amina y tiol	Si-Fe	Hg ²⁺	(Bao S. et al., 2017)
grupo funcional ditiocarbamato	Si-Fe	Hg ²⁺	(Behjati M. et al., 2018)
nitrógeno y amida	Fe ₃ O ₄	Hg ²⁺	(Bhatti A. et al., 2018)
Oro	FP	Hg ²⁺	(Chen G. et al., 2017)
grupo funcional tiol	NC	Hg ²⁺	(Geng B. et al., 2017)
EDTA	Fe ₃ O ₄	Hg ²⁺	(Ghasemi E. et al., 2017)

Grupos amino y funcionales	MWCNT	Hg ²⁺	(Hadavifar M. et al., 2016)
ácido tioglicólico	MS	Hg ²⁺	(Kenawy I. et al., 2018)
ZnS	ZnS	Hg(0)	(Li H. et al., 2016)
UiO-66-NH₂	Pt	Hg ²⁺	(Li H. et al., 2017)
Óxidos mixtos Fe-Ce	MWCNT	Hg(0)	(Ma Y. et al., 2018)
L-cisteína	FeOOH	Hg ²⁺	(Maia L. et al., 2019)
átomos de azufre	GO	Hg ²⁺	(Maná B. y Raj C., 2018)
grupo OH y Al-O-Si	WTR	Hg ₂ (OH) ₂ , Hg ₂ CO ₃	(Moharem M. et al., 2019)
ácido 3-mercaptopropiónico	NC	Hg ²⁺	(Ram B. y Chauhan G., 2018)
polipirrol	MS	Hg ²⁺	(Shafiabadi M. et al., 2016)
amidoamina	MWCNT	Hg ²⁺	(Deb A. et al., 2017)
átomos de azufre	MoS ₂	Hg ²⁺	(Song Y. et al., 2018)
FeS	NC	Hg ²⁺	(Sun et al., 2018)
Óxido binario de hierro-manganeso magnético	CNF	Hg(0)	(Yang J. et al., 2018a)
CuS	CuS	Hg(0)	(Yang Z. et al., 2018)

nanocelulosa	Fe_3O_4	Hg^{2+}	(Zarei S. et al., 2018)
Ce⁴⁺ / Ce³⁺	T-A-C	Hg(0)	(Zhang J. et al., 2017)
MoS₂	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	Hg(0)	(Zhao H. et al., 2016)
MoS₂	$\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$	Hg(0)	(Zhao H. et al., 2018)

Fuente: Elaboración propia

Mediante la tabla 5, se tiene que el material de apoyo presente en los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire son los polímeros orgánicos; como los polímeros orgánicos porosos, los nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) y grafeno.

Ello debido a que, el uso de polímeros orgánicos tiene muchas ventajas que incluyen una mayor tasa de sedimentación, menores costos, mejor calidad del agua tratada y propiedades deshidratantes del lodo.

De acuerdo con Cheng et al., (2019), los polímeros orgánicos porosos son una clase floreciente de material poroso con diversidad estructural, tamaño de poro ajustable, área de superficie específica alta y estabilidad química.

Pero Karmakar M. et al., (2019), en su estudio rechaza al polímero poroso como material de apoyo para materiales emergentes, manifestando que, la síntesis tradicional de polímeros, especialmente los polímeros orgánicos porosos, son perjudiciales para el medio ambiente, ya que, involucra solventes orgánicos tóxicos, condiciones sintéticas duras y catalizadores de metales nobles; por tal motivo, se recomienda la síntesis sin catalizador.

Pero, refutando a los mencionado anteriormente, se encuentra el estudio de Peng et al. (2019), quien sintetizó polímeros orgánicos porosos a base de triazina mediante una reacción de policondensación de amidación en un solo recipiente en condiciones suaves (presión atmosférica, 180 °C, sin catalizador). La capacidad de adsorción de Hg²⁺ alcanzó 229,9 mg/g.

Pero, también el material de grafeno se oxida a óxido de grafeno (GO), que se puede emplear para la adsorción de Hg^{2+} en soluciones acuosas. Así lo demuestra; Maná B. y Raj C., (2018), utilizándolo como material de apoyo al átomo de azufre.

Ello también es apoyado por Esfandiyari T. et al., (2017, p.5); manifestando en su estudio que el óxido de grafeno puede actuar como un adsorbente no poroso, lo que significa que la adsorción solo ocurre en su superficie exterior, lo que disminuye el control de la difusión interna. Además, la adición del Fe_3O_4 al GO facilita la posterior separación del adsorbente y el medio objetivo (agua) después de la adsorción, y la utilización de óxido de grafeno magnético (MGO).

Así lo confirman (Zarei S. et al., 2018), (Ghasemi E. et al., 2017), (Bhatti A. et al., 2018) y (Ahamad T. et al., 2017).

V. CONCLUSIONES

La importancia que presentan los materiales emergentes para la eliminación de mercurio en el medio hídrico, suelo y aire es por sus bajos costos al poder ser derivados de materiales de desechos y por su eficiencia al presentar buena capacidad de adsorción y alto potencial para su reutilización. Así mismo, se detallan los objetivos específicos:

Los materiales emergentes más utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire son los nanomateriales basados en carbono, como los nanotubos de carbono (CNT). Así también, se encontró que las nanopartículas de óxido ferroférico (Fe_3O_4) son otro material emergente para la remediación de Hg, que poseen algunas propiedades sobresalientes, como facilidad de recuperación, super paramagnetismo y gran área de superficie.

La capacidad de adsorción de los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire es alta, ello debido a su tamaño pequeño y otras propiedades eléctricas, mecánicas y químicas únicas. Además, se obtuvo que el mercurio más tratado es el Hg $2+$, con un 76% de estudios confirmándolo mientras que el Hg (0) es tratado en un 24%.

El material de apoyo presente en los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire son los polímeros orgánicos; como los polímeros orgánicos porosos, los nanotubos de carbono de paredes múltiples (MWCNT) y grafeno. Ello debido a que, el uso de polímeros orgánicos tiene muchas ventajas que incluyen una mayor tasa de sedimentación, menores costos, mejor calidad del agua tratada y propiedades deshidratantes del lodo.

VI. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones o sugerencias presentadas de manera académica son realizados por los conocimientos obtenidos mediante el estudio de las diversas literaturas; yendo la recomendación de manera general para el uso práctico de estos materiales emergentes, donde, se deben realizar más estudios para sintetizar adsorbentes "verdes" para minimizar el impacto ambiental de los adsorbentes.

Así también, se deben realizar más estudios para examinar la eficacia de adsorción de estos adsorbentes en soluciones ambientalmente relevantes, ya que la química de la solución afecta en gran medida su rendimiento de adsorción.

Se sugiere que se lleve a cabo una evaluación del ciclo de vida (LCA) para examinar el impacto ambiental general durante todo el proceso de adquisición de materias primas, fabricación de adsorbentes, regeneración y gestión de residuos.

más estudios deberían probar estos materiales en condiciones reales, en lugar de simplemente en experimentos de laboratorio controlados y examinar la reutilización de materiales emergentes para asegurar la rentabilidad.

Por último, se debería realizar más investigaciones sobre los mecanismos fundamentales para la adsorción de mercurio por estos adsorbentes para una mejor comprensión del comportamiento de adsorción.

VII. REFERENCIAS

ABBAS, Khalid; ZNAD, Hussein; AWUAL, Md Rabiul. A ligand anchored conjugate adsorbent for effective mercury (II) detection and removal from aqueous media. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 334, p. 432-443. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.054>

Abhijit Maiti, Atharva A. Mule, Anil Kumar, Amit Bhatnagar, Prasenjit Mondal. *Polymers in Wastewater Treatment. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00148-6>

ABRAHAM, Akhil Mammoottil; KUMAR, S. Vijay; ALHASSAN, Saeed M. Porous sulphur copolymer for gas-phase mercury removal and thermal insulation. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 332, p. 1-7. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.069>

AGUILA, Briana, et al. Efficient mercury capture using functionalized porous organic polymer. *Advanced Materials*, 2017, vol. 29, no 31, p. 1700665. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/adma.201700665>

AHAMAD, Tansir, et al. Synthesis of a recyclable mesoporous nanocomposite for efficient removal of toxic Hg²⁺ from aqueous medium. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 2017, vol. 53, p. 268-275. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.04.035>

Al, Kelong, et al. MoS₂ nanosheets with widened interlayer spacing for high-efficiency removal of mercury in aquatic systems. *Advanced Functional Materials*, 2016, vol. 26, no 30, p. 5542-5549. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/adfm.201601338>

ALIJANI, Hassan; SHARIATINIA, Zahra. Synthesis of high growth rate SWCNTs and their magnetite cobalt sulfide nanohybrid as super-adsorbent

for mercury removal. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, vol. 129, p. 132-149. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2017.11.014>

ALIMOHAMMADY, Mobina, et al. Design and evaluation of functionalized multi-walled carbon nanotubes by 3-aminopyrazole for the removal of Hg (II) and As (III) ions from aqueous solution. *Research on Chemical Intermediates*, 2018, vol. 44, no 1, p. 69-92. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11164-017-3091-4>

ALOMAR, Mohamed Khalid, et al. Allyl triphenyl phosphonium bromide based DES-functionalized carbon nanotubes for the removal of mercury from water. *Chemosphere*, 2017, vol. 167, p. 44-52. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.09.133>

AWUAL, Md Rabiul, et al. Facile mercury detection and removal from aqueous media involving ligand impregnated conjugate nanomaterials. *Chemical Engineering Journal*, 2016, vol. 290, p. 243-251. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.01.038>

BÂLON, Pauline, et al. Relating mercury occurrence in soil gases at establishments hosting children to historical mercury-using activities in Paris, France. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 814, p. 152388. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152388>

BAO, Shuangyou, et al. Highly effective removal of mercury and lead ions from wastewater by mercaptoamine-functionalised silica-coated magnetic nano-adsorbents: behaviours and mechanisms. *Applied Surface Science*, 2017, vol. 393, p. 457-466. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.09.098>

BEAU, Frédéric, et al. Environmental causes and reproductive correlates of mercury contamination in European pond turtles (*Emys orbicularis*). *Environmental research*, 2019, vol. 172, p. 338-344. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.01.043>

BECKERS, Felix; RINKLEBE, Jörg. Cycling of mercury in the environment: Sources, fate, and human health implications: A review. *Critical Reviews in*

Environmental Science and Technology, 2017, vol. 47, no 9, p. 693-794.
Disponibile en: <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1326277>

BEHJATI, Mohamad; BAGHDADI, Majid; KARBASSI, Abdolreza. Removal of mercury from contaminated saline wasters using dithiocarbamate functionalized-magnetic nanocomposite. Journal of environmental management, 2018, vol. 213, p. 66-78. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.052>

BHATTACHARYA, Kunal, et al. Lactoperoxidase-mediated degradation of single-walled carbon nanotubes in the presence of pulmonary surfactant. Carbon, 2015, vol. 91, p. 506-517. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.05.022>

BHATTI, Asif Ali; OGUZ, Mehmet; YILMAZ, Mustafa. One-pot synthesis of Fe₃O₄@ Chitosan-pSDCalix hybrid nanomaterial for the detection and removal of Hg²⁺ ion from aqueous media. Applied Surface Science, 2018, vol. 434, p. 1217-1223. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.11.246>

BHUNIA, Prasenjit, et al. Chelating polyacrylonitrile beads for removal of lead and cadmium from wastewater. Separation and Purification Technology, 2018, vol. 193, p. 202-213. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.11.001>

BUSHRA, Rani, et al. Synthesis of polyaniline based composite material and its analytical applications for the removal of highly toxic Hg²⁺ metal ion: Antibacterial activity against E. coli. Korean Journal of Chemical Engineering, 2017, vol. 34, no 7, p. 1970-1979. Disponibile en: <https://doi.org/10.1007/s11814-017-0076-3>

CHEN, Gaosong, et al. Gold nanoparticles and the corresponding filter membrane as chemosensors and adsorbents for dual signal amplification detection and fast removal of mercury (II). Nanoscale, 2017, vol. 9, no 9, p. 3315-3321. Disponibile en: <https://doi.org/10.1039/C6NR09638G>

DE ALMEIDA RODRIGUES, Paloma, et al. Mercury in aquatic fauna contamination: a systematic review on its dynamics and potential health risks. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, vol. 84, p. 205-218. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.02.018>

DE OLIVEIRA DRUMMOND, Leandro, et al. Trophic position, altitudinal distribution, and water dependence as determining factors for mercury concentrations in tropical montane anurans. *Science of The Total Environment*, 2022, vol. 806, p. 151356. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151356>

DEB, AK Singha, et al. Novel amidoamine functionalized multi-walled carbon nanotubes for removal of mercury (II) ions from wastewater: combined experimental and density functional theoretical approach. *Chemical Engineering Journal*, 2017, vol. 313, p. 899-911. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.126>

DONGA, C., et al. Polymer-based engineering materials for removal of nanowastes from water. En *Emerging and Nanomaterial Contaminants in Wastewater*. Elsevier, 2019. p. 217-243. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814673-6.00008-5>

ESFANDIYARI, Tayebeh, et al. Graphene oxide based carbon composite as adsorbent for Hg removal: Preparation, characterization, kinetics and isotherm studies. *Chinese journal of chemical engineering*, 2017, vol. 25, no 9, p. 1170-1175. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2017.02.006>

GENG, Biyao, et al. Surface-tailored nanocellulose aerogels with thiol-functional moieties for highly efficient and selective removal of Hg (II) ions from water. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, vol. 5, no 12, p. 11715-11726. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03188>

GHASEMI, Ensieh; HEYDARI, Akbar; SILLANPÄÄ, Mika. Superparamagnetic Fe₃O₄@ EDTA nanoparticles as an efficient adsorbent for simultaneous removal of Ag (I), Hg (II), Mn (II), Zn (II), Pb (II) and Cd (II) from water and soil

environmental samples. *Microchemical Journal*, 2017, vol. 131, p. 51-56.
Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2016.11.011>

GOMULYA, Widianta, et al. Effect of temperature on the selection of semiconducting single walled carbon nanotubes using Poly (3-dodecylthiophene-2, 5-diyl). *Carbon*, 2015, vol. 84, p. 66-73. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.11.037>

GYAMFI, Opoku, et al. Contamination, exposure and risk assessment of mercury in the soils of an artisanal gold mining community in Ghana. *Chemosphere*, 2021, vol. 267, p. 128910. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128910>

HADAVIFAR, Mojtaba, et al. Removal of mercury (II) and cadmium (II) ions from synthetic wastewater by a newly synthesized amino and thiolated multi-walled carbon nanotubes. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, vol. 67, p. 397-405. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.08.029>

HASELL, T., et al. Porous inverse vulcanised polymers for mercury capture. *Chemical Communications*, 2016, vol. 52, no 31, p. 5383-5386. Disponibile en: <https://doi.org/10.1039/C6CC00938G>

HE, Feng, et al. In situ remediation technologies for mercury-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, vol. 22, no 11, p. 8124-8147. Disponibile en: <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4316-y>

KARMAKAR, Mrinmoy, et al. Pectin-grafted terpolymer superadsorbent via N-H activated strategic protrusion of monomer for removals of Cd (II), Hg (II), and Pb (II). *Carbohydrate polymers*, 2019, vol. 206, p. 778-791. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.032>

KENAWY, I. M. M., et al. Use of microwave irradiation for modification of mesoporous silica nanoparticles by thioglycolic acid for removal of cadmium and mercury. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, vol. 258, p. 217-227. Disponibile en: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.09.021>

KUMAR, Neeraj; FOSSO-KANKEU, Elvis; RAY, Suprakas Sinha. Achieving controllable MoS₂ nanostructures with increased interlayer spacing for efficient removal of Pb (II) from aquatic systems. *ACS applied materials & interfaces*, 2019, vol. 11, no 21, p. 19141-19155. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b03853>

LEWIS, Ariel S., et al. Mercury remediation in wetland sediment using zero-valent iron and granular activated carbon. *Environmental Pollution*, 2016, vol. 212, p. 366-373. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.11.047>

LI, Guoliang, et al. Mechanism identification of temperature influence on mercury adsorption capacity of different halides modified bio-chars. *Chemical Engineering Journal*, 2017, vol. 315, p. 251-261. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.01.030>

LI, Hailong, et al. Development of nano-sulfide sorbent for efficient removal of elemental mercury from coal combustion fuel gas. *Environmental science & technology*, 2016, vol. 50, no 17, p. 9551-9557. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02115>

LI, Huaping, et al. Platinum nanoparticle encapsulated metal–organic frameworks for colorimetric measurement and facile removal of mercury (II). *ACS applied materials & interfaces*, 2017, vol. 9, no 46, p. 40716-40725. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b13695>

LIU, Sijia, et al. Status and environmental management of soil mercury pollution in China: A review. *Journal of Environmental Management*, 2021, vol. 277, p. 111442. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111442>

MA, Yaguang, et al. Fe–Ce mixed oxides supported on carbon nanotubes for simultaneous removal of NO and Hg₀ in Flue Gas. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, vol. 57, no 9, p. 3187-3194. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b00015>

MA, Yanju, et al. Mercury contamination in terrestrial predatory birds from Northeast China: Implications for species and feather type selection for

biomonitoring. *Ecological Indicators*, 2021, vol. 130, p. 108108. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108108>

MAHBUB, Khandaker Rayhan, et al. Long-lasting effect of mercury contamination on the soil microbiota and its co-selection of antibiotic resistance. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 265, p. 115057. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115057>

MAIA, Luiz FO, et al. Simple synthesis and characterization of L-Cystine functionalized δ -FeOOH for highly efficient Hg (II) removal from contaminated water and mining waste. *Chemosphere*, 2019, vol. 215, p. 422-431. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.072>

MALLONGI, Anwar, et al. Potential ecological risks of mercury contamination along communities area in tonasa cement industry Pangkep, Indonesia. *Enfermería Clínica*, 2020, vol. 30, p. 119-122. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enfcli.2019.10.054>

MANNA, Bhaskar; RAJ, C. Retna. Nanostructured sulfur-doped porous reduced graphene oxide for the ultrasensitive electrochemical detection and efficient removal of Hg (II). *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, vol. 6, no 5, p. 6175-6182. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04884>

MANTEY, J., et al. Mercury contamination of soil and water media from different illegal artisanal small-scale gold mining operations (galamsey). *Heliyon*, 2020, vol. 6, no 6, p. e04312. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04312>

MILLS, William F., et al. Spatial and sex differences in mercury contamination of skuas in the Southern Ocean. *Environmental Pollution*, 2022, p. 118841. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118841>

MOHAN, Mahesh; CHANDRAN, MS Shylesh; RAMASAMY, E. V. Mercury contamination at Vembanad Lake and near-shore regions in the southwest coast of India. *Regional Studies in Marine Science*, 2021, vol. 44, p. 101754. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101754>

MOROSINI, Cristiana, et al. Mercury vertical and horizontal concentrations in agricultural soils of a historically contaminated site: Role of soil properties, chemical loading, and cultivated plant species in driving its mobility. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 285, p. 117467. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117467>

MTHOMBENI, Nomcebo H., et al. Vanadium (V) adsorption isotherms and kinetics using polypyrrole coated magnetized natural zeolite. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, vol. 66, p. 172-180. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.06.016>

O'CONNOR, David, et al. Mercury speciation, transformation, and transportation in soils, atmospheric flux, and implications for risk management: A critical review. *Environment International*, 2019, vol. 126, p. 747-761. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.019>

PARKER, D. J., et al. Low cost and renewable sulfur-polymers by inverse vulcanisation, and their potential for mercury capture. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, vol. 5, no 23, p. 11682-11692. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C6TA09862B>

PINZONE, Marianna, et al. Stable isotope ratios of carbon, nitrogen and sulphur and mercury concentrations as descriptors of trophic ecology and contamination sources of Mediterranean whales. *Chemosphere*, 2019, vol. 237, p. 124448. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124448>

RABIE, Abdelrahman M., et al. Mercury removal from aqueous solution via functionalized mesoporous silica nanoparticles with the amine compound. *egyptian Journal of Petroleum*, 2019, vol. 28, no 3, p. 289-296. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2019.07.003>

RAM, Bhagat; CHAUHAN, Ghanshyam S. New spherical nanocellulose and thiol-based adsorbent for rapid and selective removal of mercuric ions.

Chemical Engineering Journal, 2018, vol. 331, p. 587-596. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.08.128>

RIMONDI, V., et al. A 200 km-long mercury contamination of the Paglia and Tiber floodplain: Monitoring results and implications for environmental management. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 255, p. 113191. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113191>

RULLYANI, Cut, et al. Natural polymers for disposable organic thin film transistors. *Organic Electronics*, 2018, vol. 54, p. 154-160. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2017.12.034>

SCHNEIDER, V., et al. Light-induced conductance switching in azobenzene based near-percolated single wall carbon nanotube/polymer composites. *Carbon*, 2016, vol. 90, p. 94-101. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.04.002>

SEELLEN, Emily A., et al. Historic contamination alters mercury sources and cycling in temperate estuaries relative to uncontaminated sites. *Water Research*, 2021, vol. 190, p. 116684. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116684>

SHERLALA, A. I. A., et al. A review of the applications of organo-functionalized magnetic graphene oxide nanocomposites for heavy metal adsorption. *Chemosphere*, 2018, vol. 193, p. 1004-1017. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.093>

ŠIRIĆ, Ivan; FALANDYSZ, Jerzy. Contamination, bioconcentration and distribution of mercury in *Tricholoma* spp. mushrooms from southern and northern regions of Europe. *Chemosphere*, 2020, vol. 251, p. 126614. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126614>

SONG, Wenjuan, et al. Effect of salinity and algae biomass on mercury cycling genes and bacterial communities in sediments under mercury contamination: implications of the mercury cycle in arid regions. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 269, p. 116141. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116141>

SONG, Yiheng, et al. Decoration of defective MoS₂ nanosheets with Fe₃O₄ nanoparticles as superior magnetic adsorbent for highly selective and efficient mercury ions (Hg²⁺) removal. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 737, p. 113-121. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.087>

VÖRÖŠ, Dominik, et al. Mercury contamination of stream sediments in the North Bohemian Coal District (Czech Republic): Mercury speciation and the role of organic matter. *Chemosphere*, 2018, vol. 211, p. 664-673. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.196>

WANG, Fengyang, et al. Characteristics of mercury cycling in the cement production process. *Journal of hazardous materials*, 2016, vol. 302, p. 27-35. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.09.042>

WANG, Hong, et al. Catalysts for chirality selective synthesis of single-walled carbon nanotubes. *Carbon*, 2016, vol. 81, p. 1-19. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.09.063>

WU, Q. R.; WANG, S. X.; WANG, Y. J. Projections of atmospheric mercury emission trends in China's nonferrous metal smelting industry. *China Environ. Sci.(China)*, 2017, vol. 37, p. 2401-2413. ISSN: 10006923

WU, Qingru, et al. Mercury flows in large-scale gold production and implications for Hg pollution control. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, vol. 68, p. 91-99. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.03.029>

YADAV, Anshul; SINHA, Niraj. *Organic Polymers for Drinking Water Purification*. 2021. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820352-1.00140-1>

YANG, Jianping, et al. Magnetic iron–manganese binary oxide supported on carbon nanofiber (Fe₃–xMn_xO₄/CNF) for efficient removal of Hg⁰ from coal combustion flue gas. *Chemical Engineering Journal*, 2018, vol. 334, p. 216-224. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.004>

YANG, Zequn, et al. Multiform sulfur adsorption centers and copper-terminated active sites of nano-CuS for efficient elemental mercury capture from coal combustion flue gas. *Langmuir*, 2018, vol. 34, no 30, p. 8739-8749. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.8b01181>

ZAREI, Saeid; NIAD, Mahmood; RAANAEL, Hossein. The removal of mercury ion pollution by using Fe₃O₄-nanocellulose: Synthesis, characterizations and DFT studies. *Journal of hazardous materials*, 2018, vol. 344, p. 258-273. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.009>

ZENG, Hehua, et al. Highly efficient and selective removal of mercury ions using hyperbranched polyethylenimine functionalized carboxymethyl chitosan composite adsorbent. *Chemical Engineering Journal*, 2019, vol. 358, p. 253-263. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.10.001>

ZHANG, Junyi, et al. A sol-gel Ti-Al-Ce-nanoparticle catalyst for simultaneous removal of NO and Hg⁰ from simulated flue gas. *Chemical Engineering Journal*, 2017, vol. 313, p. 1535-1547. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.039>

ZHAO, Haitao, et al. Hg⁰ capture over CoMoS/ γ -Al₂O₃ with MoS₂ nanosheets at low temperatures. *Environmental science & technology*, 2016, vol. 50, no 2, p. 1056-1064. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04278>

ZHAO, Haitao, et al. Integrated dynamic and steady state method and its application on the screening of MoS₂ nanosheet-containing adsorbents for Hg⁰ capture. *Energy & Fuels*, 2018, vol. 32, no 4, p. 5338-5344. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b00099>

ANEXOS

Anexo 01: Matriz de Categorización

Objetivos específicos	Problemas específicos	Categoría	Subcategoría	Unidad de análisis
Clasificar cuáles son los materiales emergentes más utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire	¿Cuáles son los materiales emergentes más utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire?	Materiales emergentes más utilizados (De Oliveira D. et al., 2022, p.3)	Nanotubos de carbono (CNT) Fe 3 O 4 nanopartícula Nanopartícula Ti-Al-Ce (Alijani H. y Shariatinia Z., 2018, p.2)	De acuerdo a la capacidad de remoción
Analizar cuál es la capacidad de adsorción de los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire	¿Cuál es la capacidad de adsorción de los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire?	Capacidad de adsorción de los materiales emergentes (Ahamad T. et al., 2017, p.4)	Capacidad de adsorción alta Capacidad de adsorción media Capacidad de adsorción baja (Behjati M. et al., 2018, p.3)	De acuerdo a la especie de mercurio tratada
Determinar cuál es el material de apoyo presente en los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire	¿Cuál es el material de apoyo presente en los materiales emergentes utilizados en la remediación del mercurio presente en el medio hídrico, suelo y aire?	Material de apoyo presente en los materiales emergentes (Kenawy I. et al., 2018, p.2)	Polímero orgánico poroso Quitosano MWCNT (Beckers F. et al., 2017, p.2).	De acuerdo al material emergente utilizado

Fuente: Elaboración propia