

CONTAMINACIÓN DE AGUAS POR ELEMENTOS METÁLICOS TRAZA Y EMPLEO DE CARBÓN ACTIVADO PARA SU REMOCIÓN

Contamination of water by trace metal elements and use of activated carbon for their removal

IBRAHIM GARCÍA^a, MICHEL MANDUCA ARTILES^b
Y ULISES JAVIER JÁUREGUI-HAZA^c

Recibido: 3/3/2023 • Aprobado: 20/5/2023

Cómo citar: García, I., Manduca Artiles, M., & Jáuregui-Haza, U. J. (2023). Contaminación de aguas por elementos metálicos traza y empleo de carbón activado para su remoción. *Ciencia, Ambiente y Clima*, 6(1), 9–44. <https://doi.org/10.22206/cac.2023.v6i1.pp9-44>

Resumen

La contaminación de las aguas es uno de los principales problemas ambientales que la comunidad científica internacional enfrenta actualmente, debido al vertiginoso aumento del vertimiento deslocalizado de compuestos orgánicos persistentes y elementos metálicos traza, cuya presencia tiene un elevado impacto en la salud humana y los ecosistemas. En el presente trabajo se realizó un análisis bibliográfico sobre la contaminación de aguas superficiales por elementos metálicos traza y sus principales fuentes de contaminación, dentro de las cuales la actividad minera e industrial son las principales fuentes antrópicas que contribuyen con el aumento de dichos contaminantes. Se exponen algunas de las sintomatologías derivadas del envenenamiento por elementos metálicos traza como el arsénico, plomo, mercurio y cromo en humanos. También se investigó sobre las ventajas y desventajas de los métodos convencionales (precipitación química, floculación/coagulación, intercambio iónico, membranas) y no convencionales (adsorción, fitorremediación, pilas de

^a Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana (InSTEC/UH), La Habana, Cuba. ORCID: 0000-0001-7776-3637
Correo-e: ibrahim.garcia@instec.cu, ycachon95@gmail.com

^b Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Universidad de La Habana (InSTEC/UH). ORCID: 0000-0003-4782-8959, Correo-e: manduca@instec.cu, mmanduka1986@gmail.com

^c Instituto Tecnológico de Santo Domingo (INTEC), Santo Domingo, República Dominicana. ORCID: 0000-0002-6943-4873, Correo-e: ulises.jauregui@intec.edu.do



combustión microbianas y el uso de nanotecnologías) empleados en el tratamiento de las aguas contaminadas por elementos metálicos traza. La metodología más empleada para la eliminación de los elementos metálicos traza es la adsorción y el adsorbente más utilizado es el carbón activado (CA). En este trabajo se abunda sobre la relación entre los parámetros externos (pH, temperatura y fuerza iónica) e internos (área superficial, tamaño de poros y la presencia de heteroátomos) en el proceso de adsorción empleando el CA y de las fuentes de materia prima para la obtención de estos.

Palabras clave: elementos metálicos traza; contaminación; toxicidad; adsorción; carbón activado.

Abstract

Water pollution is currently one of the main environmental problems that the international scientific community faces due to the vertiginous increase in delocalized dumping of persistent organic compounds and heavy metals, whose presence has a high impact on human health and ecosystems. In the present work, a bibliographic search was carried out on the contamination of surface waters by heavy metals and their main sources of contamination, within which mining and industrial activity are one of the main anthropic sources that contribute to the increase of these contaminants. In the work, some of the symptoms derived from poisoning by heavy metals such as arsenic, lead, mercury and chromium in humans are exposed. The advantages and disadvantages of conventional methods (chemical precipitation, flocculation/coagulation, ion exchange, membranes) and non-conventional methods (adsorption, phytoremediation, microbial combustion cells and the use of nanotechnologies) used in water treatment were also investigated. contaminated by heavy metals. The most used methodology for the elimination of heavy metals is adsorption and the most used adsorbent is activated carbon (AC). This work abounds on the relationship between external parameters (pH, temperature and ionic strength) and internal parameters (surface area, pore size and the presence of heteroatoms) in the adsorption process using AC and raw material sources to obtain it.

Keywords: Trace metallic elements; contamination; toxicity; adsorption; activated carbon.

Introducción

La elevada tasa del desarrollo industrial, crecimiento poblacional y la consecuente urbanización han conducido a la contaminación de las aguas y los suelos. Dentro de las sustancias tóxicas emitidas al medio ambiente se encuentran los elementos metálicos traza, pesticidas, colorantes, surfactantes, compuestos farmacéuticos, compuestos organometálicos, nanopartículas, entre otros (Abd El-Lateef et al., 2018; Álvarez-Torrellas et al., 2017; Briffa et al., 2020; Pavithra & Jaikumar, 2019; Saravanan et al., 2019; Shi et al., 2019; Tuomikoski et al., 2021). Las principales fuentes de emisión de elementos metálicos traza incluyen la minería, industria petroquímica y química, fundiciones, refinerías (Simeonov et al., 2010). La emisión atmosférica constituye la forma de contaminación más peligrosa, ya que los vientos pueden esparcir varios kilómetros estos contaminantes y terminar en suelos, ríos lejanos y ser inhalados por los humanos y animales. La principal causa de contaminación de los sistemas acuáticos se puede atribuir al vertimiento de desechos industriales y mineros sin tratamientos (Qasem et al., 2021; Tuomikoski et al., 2021; Vardhan et al., 2019).

Los contaminantes liberados en las aguas residuales, además de ser dañinos para los organismos acuáticos, provocan que el cuerpo acuífero sea no apto para consumir, ya sea como fuente de agua potable o de uso agrícola (Kobielska et al., 2018; Sadeek et al., 2015; Zazycki et al., 2017).

El impacto de los elementos metálicos traza produce la contaminación de aguas subterráneas y superficiales, suelos, aire y sedimentos. Esta contaminación puede afectar la salud del hombre, incorporándose al organismo principalmente por tres vías: inhalación, ingestión (dieta) y contacto dérmico (Yadav et al., 2016). El exceso de contaminantes metálicos traza en suelos cultivables puede provocar su acumulación en los cultivos y aumentar los riesgos de enfermedades en los humanos como fallos renales y hepáticos, infertilidad, leucemia, trastornos mentales y otros padecimientos (Khan et al., 2011; Mishra et al., 2019).

Las diferentes estrategias para la descontaminación se enfocan desde una arista más tradicional con métodos fisicoquímicos (Wuana & Okieimen,

2011) hasta el empleo de microorganismos y fitorremediación (Asad et al., 2019; Peng et al., 2018; Pérez et al., 2022; Pratush et al., 2018; Song et al., 2019; Suman et al., 2018) para el tratamiento de suelos y sedimentos, mientras que para remoción en sistemas acuosos, las técnicas de precipitación, empleo de membranas y carbón activado aparecen como las más utilizadas (dos Santos et al., 2023; Vareda et al., 2019; Yunus et al., 2022).

En este artículo abundaremos sobre la contaminación ambiental en los ecosistemas acuáticos por elementos metálicos traza, producto de la minería y la actividad industrial. Se estudiarán los valores detectados en diversas regiones del mundo con algunas legislaciones vigentes sobre la contaminación de las aguas superficiales y se discutirá sobre el grado de contaminación presente a nivel mundial, con énfasis en América Latina y el Caribe. Además, se compararán los diferentes métodos usados para la eliminación de los elementos metálicos traza de las aguas, destacando el empleo del carbón activado como material adsorbente en la remoción de estos contaminantes.

Materiales y métodos

Se realizó una búsqueda en bases de datos especializadas (Chemical Abstract y Science Direct) que abarcó el período 2010-2022. Se utilizaron como palabras clave: contaminación de elementos metálicos traza, contaminación industrial, contaminación minera, legislaciones, efectos tóxicos, carbón activado, eliminación de elementos metálicos traza. La búsqueda bibliográfica se realizó en inglés, combinando las palabras clave con la utilización de operadores lógicos.

Resultados y discusión

Elementos metálicos traza

La terminología de elementos metálicos traza ha sido empleada para el grupo de metales y metaloides que tienen una densidad atómica mayor que 4 g/cm^3 (Vardhan et al., 2019). Algunos ejemplos de ellos son: cobre,

cadmio, zinc, cromo, arsénico, cobalto, titanio, estaño, níquel, mercurio, plomo, entre otros. Los elementos metálicos traza como cobre, zinc, níquel e hierro son necesarios para el crecimiento de las plantas, pero son dañinos cuando sus concentraciones en el medio superan los límites permisibles (Liu et al., 2018; Vardhan et al., 2019).

Las principales formas de acceso de estos contaminantes al organismo se producen por la contaminación de las aguas y los alimentos, vía dérmica y/o inhalación. Una vez introducidos en el organismo, sus efectos adversos se manifiestan cuando los elementos metálicos traza no son metabolizados y se bioacumulan en los tejidos blandos del cuerpo y pueden provocar la formación de radicales libres, los cuales deterioran las proteínas, lípidos y el ADN (Nazaripour et al., 2021).

Fuentes de emisión de elementos metálicos traza

La contaminación de los acuíferos por elementos metálicos traza en gran medida proviene de aguas residuales industriales que incluyen minería, productos farmacéuticos, galvanoplastia, fábricas de caucho y plásticos, acabado de metales, productos químicos, organometálicos y el uso agrícola de los pesticidas (Gautam et al., 2016; Kolbasov et al., 2017; Maleki et al., 2016; Manirethan et al., 2018; Singh et al., 2018), (véase Tabla 1).

El uso generalizado de pesticidas, fungicidas y fertilizantes contribuyen a la contaminación de elementos metálicos traza, debido a que contienen elevados niveles de arsénico, plomo, cromo, cadmio, zinc, níquel, hierro, manganeso y molibdeno (Mishra et al., 2019; Yadav et al., 2016).

Tabla 1
Principales fuentes antrópicas de emisión de elementos metálicos traza

Contaminante	Fuente de contaminación	Referencia
Cromo	Refinería de petróleo, industria textil, galvanización.	(Malik et al., 2019; Vareda et al., 2019; Wuana & Okieimen, 2011)
Níquel	Galvanización, pintura, refinerías de metales, baterías, extracción minera.	(Malik et al., 2019; Vareda et al., 2019; Wuana & Okieimen, 2011)
Plomo	Materiales derivados del petróleo, combustible plomado, pesticidas.	(Malik et al., 2019; Vareda et al., 2019; Wuana & Okieimen, 2011)
Cobre	Industria de plásticos, galvanizado, refinería de metales, extracción minera.	(Malik et al., 2019; Vareda et al., 2019; Wuana & Okieimen, 2011)
Zinc	Industria del caucho, tintes, conservantes, detergentes, baterías.	(Malik et al., 2019; Vareda et al., 2019; Wuana & Okieimen, 2011)
Arsénico	Tintes y conservantes, industria automotora.	(Malik et al., 2019; Vareda et al., 2019; Wuana & Okieimen, 2011)
Cadmio	Productos del petróleo, pigmentos, pesticidas, tuberías galvanizadas, plásticos.	(Malik et al., 2019; Vareda et al., 2019; Wuana & Okieimen, 2011)

Exposición a elementos metálicos traza

La contaminación por elementos metálicos traza ha surgido debido a la actividad antrópica como principal causa de contaminación, debido al desarrollo de la minería, la fundición y otras industrias basadas en dichos metales. El uso de elementos metálicos traza en la agricultura es la fuente secundaria de contaminación por su presencia en pesticidas, insecticidas y fertilizantes. Los fenómenos naturales como la actividad volcánica, la corrosión de los metales, la erosión del suelo, la evaporación de metales del suelo, el agua y la resuspensión de sedimentos, entre otros, son fuentes no antropogénicas de contaminación (Briffa et al., 2020; Gautam et al., 2016; Masindi & Muedi, 2018).

La prolongada exposición perjudica el metabolismo del cuerpo humano, acumulándose en riñones, hígado, cerebro, entre otros órganos como se muestra en la Tabla 2. La carcinogénesis y mutagénesis asociada a la presencia de estos contaminantes, se produce por el estrés oxidativo, ya que en las reacciones redox de algunos procesos biológicos participan elementos como el arsénico, cobalto, níquel. Las hormonas y algunas enzimas importantes también se afectan (Fu & Xi, 2020; Jayawardena et al., 2017). Las modificaciones en el metabolismo de los lípidos, carbohidratos y proteínas

debilitan al sistema inmunológico, aumentando la susceptibilidad a infecciones. La exposición a grandes cantidades de elementos metálicos traza puede provocar la aparición de diferentes patologías como: afectación del sistema gastrointestinal y renal, problemas cardiovasculares, disfunciones hemáticas, tumores y osteoporosis (Rehman et al., 2018). El cobre, molibdeno y zinc son necesarios para muchos procesos enzimáticos y actividades fisiológicas, sin embargo, altas concentraciones son perjudiciales. La presencia de níquel y cobre está asociada a la aparición de tumores. La exposición directa de níquel producto de la actividad industrial es responsable de carcinoma nasofaríngeo (Su, 2014). La inhalación de cromo (VI) provoca irritación nasal, comezón, daña los conductos nasales y provoca la aparición de úlceras (Mishra et al., 2019).

La incorporación de plomo ocurre por vía gastrointestinal y respiratoria, circulando rápidamente por el organismo por la formación de sales solubles, iones y complejos proteicos, y terminando un 95 % del mismo en los huesos en forma de fosfatos insolubles (Mishra et al., 2019; Su, 2014).

Tabla 2

Sistemas afectados por la exposición a elementos metálicos traza y principales síntomas

Elementos metálicos traza	Principales sistemas dañados	Efectos clínicos	Referencia
Arsénico	Sistema nervioso, pulmonar y dérmico	Enfermedades vasculares, lesión epidérmica, neuropatía periférica.	(Flora & Agrawal, 2017; Z. Fu & Xi, 2020; Mahurpawar, 2015; Mochizuki, 2019; Rodríguez & Mandalunis, 2018)
Cadmio	Sistema renal y pulmonar	Daño en huesos, riñones, pulmones y sistema cardiovascular.	(Flora & Agrawal, 2017; Z. Fu & Xi, 2020; Mahurpawar, 2015; Rahimzadeh et al., 2017; Rodríguez & Mandalunis, 2018)
Mercurio	Sistema nervioso y renal	Muerte fetal y embrionaria, insuficiencia renal, proteinuria.	(Z. Fu & Xi, 2020; Rodríguez & Mandalunis, 2018)
Plomo	Sistema nervioso, hematopoyético y renal	Anemia, hipertensión, neuropatía periférica, insuficiencia renal.	(Flora & Agrawal, 2017; Z. Fu & Xi, 2020; Mahurpawar, 2015; Rodríguez & Mandalunis, 2018)
Cromo	Sistema gastrointestinal, renal y hepático	Úlceras, náuseas, fallo de riñones e hígado, convulsiones, muerte.	(Mishra & Bharagava, 2016; Su, 2014)

Legislación sobre los elementos metálicos traza

A medida que se profundizó en los efectos de los elementos metálicos traza en la salud humana y el medio ambiente, su uso fue regulado. Así,

por ejemplo, el empleo de mercurio y el plomo fue reduciéndose hasta solo ser utilizados en aplicaciones específicas, donde sus emisiones son minuciosamente monitoreadas (Briffa et al., 2020; Vareda et al., 2019). Los límites permisivos en diferentes medios, especialmente en el agua, ha sido tarea de las agencias gubernamentales para minimizar la exposición de los organismos acuáticos presentes en los ecosistemas afectados. Sin embargo, no todos los gobiernos presentan el mismo nivel de preocupación por estos asuntos medioambientales, así encontramos que los niveles de legislación varían entre países (Norma Cubana 827, 2016; EPA, 2006; Jin et al., 2006; Secall, 2021; WHO, 2017). La Tabla 3 muestra los niveles de concentración de algunos elementos metálicos traza en agua potable por diferentes entidades.

Se puede apreciar que la mayoría de las legislaciones se muestran en los mismos niveles establecidos por la OMS. Los límites máximos admisibles (LMA) son muy bajos, de algunos $\mu\text{g/L}$ en la mayoría de los casos, mostrando el rigor de estas regulaciones.

Tabla 3
*Límites máximos admisibles de elementos metálicos traza en agua potable regulados por la OMS, la Unión Europea (UE) y varios países**

Metal pesado	Límite máximo admisible ($\mu\text{g/L}$)				
	OMS	PE-CUE	NC	EPA	CNSC
As	10	10	50	10	10
Cd	3	5	5	5	5
Cr	50	25	50	100	50
Cu	2000	2000	-	1300	1000
Hg	6	1	1	2	-
Ni	70	20	20	-	20
Pb	10	5	50	15	10
Zn	3000	-	-	-	1000

Nota. *(OMS) Organización Mundial para la Salud MS (2017); (PE-CUE) Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2020); (NC) Oficina Nacional de Normalización (2016); (EPA) United States Environmental Protection Agency (2006); (CNSC) Comisión Nacional de Salud de China (2006).

Las legislaciones sobre la calidad del agua potable se han convertido en una prioridad para los gobiernos, sin embargo, las reglamentaciones sobre la calidad del agua para la irrigación agrícola son escasas. El Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea no presentan directrices sobre los niveles de elementos metálicos traza en agua para cultivo. Las concentraciones definidas por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO por sus siglas en inglés) son normas sin carácter legal (Vareda et al., 2019).

Contaminación ambiental por elementos metálicos traza en agua

La contaminación de las aguas resulta una problemática global que concierne a todos los países por igual. La actividad minera, metalúrgica, petroquímica, textil y galvanizado provoca la degradación del medio ambiente por sus desechos industriales, dentro de los cuales se encuentra en gran medida los elementos metálicos traza (Bankole et al., 2019). La minería favorece la movilidad de los elementos metálicos traza y es una de las actividades que propicia la contaminación de los cuerpos de agua (Kumar et al., 2021). La generación y liberación de los residuos ácidos, desechos y polvo de las minas constituyen la principales formas de contaminación por elementos metálicos traza de esta actividad económica (Qiao et al., 2020). La minería a cielo abierto presenta mayor riesgo de contaminación, ya que emplea mucha cantidad de agua y, por consiguiente, los efluentes tienden a presentar elevadas concentraciones de elementos metálicos traza (Amoakwah et al., 2020; Custodio et al., 2020; Qiao et al., 2020). La industria del galvanizado consiste en el recubrimiento de una superficie con un metal para evitar su corrosión. Dentro de los elementos metálicos más empleados para este proceso se encuentran: plomo, níquel, cobre, oro, zinc, plata, aluminio, hierro, bronce, platino y cromo. Esta actividad industrial involucra varios procesos de lavado por lo que sus aguas de desechos pueden presentar altos contenidos de elementos metálicos traza (Arshad et al., 2014; Martín-Lara et al., 2014). (Véase Tabla 4).

Tabla 4
Concentración de elementos metálicos traza detectados en diferentes cuerpos de agua por la actividad minera e industrial

Elemento metálico traza	Concentración (mg/L)	Fuente de contaminación	Zona contaminada	Referencia
As	4,6·10 ⁻⁴ - 3,6	Actividad minera	Agua subterránea, agua superficial, ríos	(Alonso et al., 2020; Fernández et al., 2018; Gyamfi et al., 2019; Singh et al., 2017; Tshamala et al., 2021)
	1,8·10 ⁻³ - 58,03	Actividad industrial	Aguas superficiales, aguas de irrigación, ríos	(Bankole et al., 2019; Khalid et al., 2021; Saha et al., 2017)
Cd	3,3·10 ⁻⁵ - 2,11	Actividad minera	Aguas superficiales, ríos	(Fernández et al., 2018; Singh et al., 2017; Yi et al., 2020)
	8·10 ⁻⁵ - 3,020	Actividad industrial	Ríos, mar	(Alamri et al., 2021; Bankole et al., 2019; Hsu et al., 2016)
Cr	2,3·10 ⁻⁵ - 0,38	Actividad minera	Aguas superficiales, ríos	(Fernández et al., 2018; Singh et al., 2017)
	3·10 ⁻³ - 3965,3	Actividad industrial	Agua subterránea, ríos	(Ghorpade & Ahammed, 2018; Hasan et al., 2021; Hsu et al., 2016; Ukah et al., 2019)
Pb	8,8·10 ⁻⁵ - 1,6	Actividad minera	Ríos, aguas superficiales	(Antunes et al., 2018; Fernández et al., 2018; Yi et al., 2020)
	4·10 ⁻⁵ - 26,1	Actividad industrial	Ríos, mar, agua subterránea	(Alamri et al., 2021; Ghorpade & Ahammed, 2018; Hsu et al., 2016)
Ni	4·10 ⁻⁵ - 13,6	Actividad minera	Ríos, aguas superficiales y subterráneas	(Antunes et al., 2018; Fernández et al., 2018; Ji et al., 2018)
	4,2·10 ⁻³ - 106,1	Actividad industrial	Agua superficial y subterráneas	(Alamri et al., 2021; Bankole et al., 2019; Khalid et al., 2021)

Métodos convencionales para la remoción de elementos metálicos traza

Dentro de los métodos empleados para la eliminación de los elementos metálicos traza se encuentra la precipitación química, coagulación/floculación, intercambio iónico, métodos electroquímicos y los procesos con membranas.

La precipitación química es un método bastante utilizado y el más simple para la remoción de elementos metálicos traza, empleando precipitantes como alumbre, lima, polímeros y sales de hierro para formar un precipitado insoluble (Azimi et al., 2017; Verma & Balomajumder, 2020; Zamora-Ledezma et al., 2021). Otra metodología a considerar es la adición de coagulantes como sulfatos de hierro, sulfato de aluminio y polímeros poliácrilato de metilo, sulfato de hierro polimérico y cloruro de aluminio polimérico, que facilita la ruptura de coloides y la formación de pequeños agregados, conocidos como flóculos (Hargreaves et al., 2018; Xu et al., 2019). Los flóculos son eliminados por sedimentación o filtración (Vareda et al., 2019). El empleo de resinas de intercambio conlleva la liberación de iones desde la resina de igual carga y cantidad a los removidos por la misma (Barik et al., 2020; Chaemiso & Neftci, 2019; Kurniawan et al., 2006; Vareda et al., 2019; Zamora-Ledezma et al., 2021). Los métodos electroquímicos permiten recuperar los metales en su estado elemental, usando reacciones anódicas y catódicas en una celda electroquímica. Dentro de las técnicas más empleadas se encuentran la electrodeposición, electrocoagulación, electrodiálisis y electroflotación (dos Santos et al., 2023; Fu & Wang, 2011; Maarof et al., 2017; Vareda et al., 2019; Zamora-Ledezma et al., 2021). Las tecnologías de membranas permiten el paso de ciertos componentes mientras impiden otros, debido a procesos como la exclusión por tamaño, impedimento estérico, adsorción específica o repulsión electrostática (Abdullah et al., 2019; Vareda et al., 2019; Zamora-Ledezma et al., 2021).

Métodos no convencionales para la remoción de elementos metálicos traza

Dentro de los métodos modernos que se utilizan para la eliminación de los elementos metálicos traza se destacan las pilas de combustible microbianas

(Jayakumar et al., 2020; Vélez-Pérez et al., 2020; Wu et al., 2020), el empleo de nanotecnología (Borji et al., 2020; De Beni et al., 2022; Inobeme et al., 2023; Saikia et al., 2019; Upadhyay et al., 2019; Vázquez-Núñez et al., 2020; Zhang et al., 2022), la fitorremediación (Abdel Maksoud et al., 2020; Deb et al., 2020; Devi & Kumar, 2020; Halder & Ghosh, 2020; Schück & Greger, 2020) y los materiales adsorbentes (Chen et al., 2022; Chin et al., 2021; Da'na, 2017; Fei & Hu, 2022; Hemavathy et al., 2020; Sharma et al., 2019; Sulejmanović et al., 2022; Yaashikaa et al., 2019).

Carbones activados

Dentro de los adsorbentes más utilizados se encuentran los carbones activados, debido a su estabilidad a diferentes temperaturas y valores de pH, su elevada área superficial (500-3000 m²/g), la presencia de heteroátomos que le confiere propiedades electrodonoras y/o electroceptoras, contribuyendo a que su superficie sea muy reactiva y otorgando características ácido-base al CA. Además, su alta porosidad y variabilidad de tamaños de poros permite la remoción de contaminantes de diferentes tamaños (Kwiatkowski, 2011; Mukherjee et al., 2015; Nazaripour et al., 2021; Reshadi et al., 2020; Sultana et al., 2022; Wang et al., 2022).

Para la obtención de carbones activados es necesario materia prima con alto contenido de carbono como los desechos agroindustriales o animales, los cuales son sometidos a un proceso de pirólisis/carbonización (Shahrokhi-Shahraki et al., 2021). Dentro de los materiales de desechos más aprovechables se encuentran las cáscaras, pajas, madera, neumáticos, huesos, plumas, algas y caparazón de crustáceos (Alvarez-Galvan et al., 2022; Duan et al., 2020; Francoeur et al., 2021; Iturbides et al., 2022; Nazaripour et al., 2021; Vardhan et al., 2019).

Estructura porosa de carbones activados

Los carbones activados, en general, presentan una desarrollada superficie interna; caracterizada por una estructura porosa no homogénea, cuyos poros son de tamaño y forma variada (Bansal & Goyal, 2005). Los poros en los carbones activados suelen estar divididos en tres grupos en dependencia del diámetro del poro: microporos (< 2nm), mesoporos (2-50 nm) y macroporos (>50 nm) (Bansal & Goyal, 2005; Chowdhury, 2013).

Los microporos determinan el área superficial del carbón activado (hasta un 95 % del área total) y por consiguiente de su capacidad de adsorción, sin embargo los mesoporos y macroporos son críticos para el transporte de contaminantes hacia poros de menor tamaño, lugar donde ocurre la mayor parte de la adsorción (Bansal & Goyal, 2005; Chowdhury, 2013; Reshadi et al., 2020).

Superficie química de los carbones activados

Los carbones activados están compuestos en gran proporción por carbono, oxígeno e hidrógeno como elementos mayoritarios. Sin embargo, también pueden contener azufre, nitrógeno y halógenos, en dependencia de la materia usada para la obtención del carbón y de su proceso de activación. Estos heteroátomos pueden incorporarse no solamente en los bordes y formar grupos funcionales, sino que pueden agregarse dentro de las láminas de carbono y formar heterociclos (Bansal & Goyal, 2005; Chowdhury, 2013). La presencia de heteroátomos como oxígeno, nitrógeno y azufre aumenta las interacciones electrostáticas entre la superficie del carbón activado y los electrolitos, y con ello, la afinidad entre el contaminante y el adsorbente (Leng et al., 2020; Wan & Li, 2018; Yang et al., 2019).

Efecto de la temperatura

El aumento de la temperatura afecta de manera proporcional la efectividad de la remoción de elementos metálicos traza. La adsorción multielemental de cadmio (II), cobre (II), plomo (II) y níquel (II) empleando carbón activado de origen frutal alcanzó su máximo porcentaje de remoción cuando la temperatura se elevó a 80 °C (Abdulrazak et al., 2017). El incremento de la temperatura hasta 54 °C favorece la adsorción de cobre (II), mercurio (II), cromo (VI) y plomo (II) en carbón activado recubierto con melanina. El proceso de adsorción de estos metales es endotérmico, por lo que se ve favorecido con el aumento de la temperatura (Manirethan & Balakrishnan, 2020). El incremento de la adsorción con la temperatura se explica por el aumento de las colisiones efectivas entre el contaminante y los sitios activos del adsorbente (Manirethan & Balakrishnan, 2020; Saini & Melo, 2013). Además, las altas temperaturas aumentan la energía cinética de los contaminantes metálicos traza,

lo que conlleva a un cambio de fase desde la fase acuosa hasta los sitios activos de la fase sólida (Akpomie et al., 2015; Manirethan & Balakrishnan, 2020; Alvarez-Galbán et al., 2022).

Efecto del pH en la remoción

El valor del pH es considerado una de las variables más importantes para los estudios de remoción de elementos metálicos traza. Este parámetro tiene un efecto tanto en el contaminante como en el CA. En los valores inferiores a la neutralidad los iones se encuentran en su forma catiónica y formando acuocomplejos, generalmente. El incremento de los valores de pH aumenta la concentración de los iones hidroxilos, provocando la formación de hidróxidos, los cuales tienden a ser poco solubles, o la formación de especies aniónicas (Joseph et al., 2019). Por ejemplo, la presencia de iones plomo (II) disminuye al aumentar el pH, principalmente por la precipitación de dicho catión (Kumpiene et al., 2008; Nazaripour et al., 2021). Por lo general, con el aumento de pH a partir de valores ácido ocurre un incremento en la capacidad de remoción del carbón activado, debido a que disminuye la concentración de hidrógeno y, con ello, la competencia entre el ion hidronio y el contaminante por los sitios activos del CA (Duan et al., 2020; Ma et al., 2021). Los materiales adsorbentes de carbón activado poseen diferentes valores pH de potencial de carga cero (pH_{pzc}), el cual define el valor de pH para el que el potencial zeta en la superficie del carbón activado es cero (Ahmad et al., 2020). A valores inferiores al pH_{pzc} ocurre una mayor protonación de la superficie del carbón activado, por lo que adquiere una carga superficial positiva (Ma et al., 2019; Yang et al., 2019), aumentando la repulsión electrostática entre el contaminante en forma catiónica y el CA, disminuyendo así la remoción (Xu et al., 2018). Al incrementarse el valor de pH ocurre el efecto contrario: la desprotonación de la superficie del CA hasta superar el pH_{pzc} , donde la densidad de carga superficial en el CA es negativa (Li et al., 2017). Para una mayor remoción de elementos metálicos traza en forma catiónica se requiere CA con pH_{pzc} ácido (Shang et al., 2017). Las características ácidas se deben a la presencia, principalmente, de grupos carbonilos, fenilos, lactonas y carboxilos. El carácter básico se debe a la existencia de estructuras cíclicas oxigenadas como los derivados de THF,

oxano y pirano (Bansal & Goyal, 2005; Chowdhury, 2013). También la presencia de grupos nitrogenados y sulfurados contribuyen al carácter ácido-base del CA.

Remoción de elementos metálicos trazas por carbones activados

Dentro de las principales fuentes de materias primas para la obtención de carbones activados se encuentran los desechos agrícolas e industriales, los cuales muestran una elevada capacidad de remoción de elementos metálicos traza de aguas contaminadas, véase Tabla 5. Algunos de los desechos empleados son las cáscaras de semillas (Ani et al., 2019; Lu & Guo, 2019; Özsın et al., 2019; Ullah et al., 2019), pajas de maíz (Ma et al., 2019), arroz (Deng et al., 2019), ramas de olivo (Alkherraz et al., 2020), bagazo (Wan & Li, 2018), neumáticos (Dimpe et al., 2017; Niksirat et al., 2019; Shahrokhi-Shahraki et al., 2021), material elástico (Zhang et al., 2016) y las algas (Francoeur et al., 2021; Alvarez-Galbán et al., 2022).

Tabla 5
Valores de concentración y porcentaje de remoción de elementos metálicos traza tras la aplicación de carbones activados de origen agrícola e industrial

Elemento metálico traza	Fuente analizada	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción	Referencia
Cr	Efuentes mineros y planta de galvanizado	1000	111.2	88,88	(Yunus et al., 2020)
Zn		400	63,48	84,13	
As	Efluente industria textil	0,020	0,003	85	(Panigrahi & Santhoskumar, 2020)
Cr		0,090	0,001	98,88	
Hg		3,382	0,415	87,72	
Pb		0,018	0,005	72,22	
Cr	Efluente industria textil	200	0,2	99,9	(Nwosu-Obieogu & Okolo, 2020)
	Efluente planta de cuero	7,68	0,8	89	(Dhaarini et al., 2021)
	Efluente planta de cuero	-	-	97,03	(Bayisa et al., 2021)
	Agua de desecho industrial	1220,2	134,22	89	(Berihun, 2017)
Cd	Efluente industrial	0,09	0,009	90	(Afolabi et al., 2016)
Pb		1,095	0,091	91,6	
Zn		0,234	0,029	87,18	
Ni		0,166	0,043	73,62	
Cu		0,335	0,027	91,7	
Fe		1,181	0,236	80	
Cd		0,026	0,001	98,8	
Cr	Efluente industrial	1,79	0,22	87,8	(Sajjad et al., 2017)
Cu		0,81	0,001	99,9	
Pb		1,48	0,019	98,7	
Pb	Efluente de cervecería	0,12	0	100	(Nwakonobi et al., 2018)
Cr		0,32	0,001	99,68	
Cd		0,076	0	100	
Cu		0,005	0	100	
Cr	Efluente de refinería de petróleo	1,225	0,98	20	(Olayebi & Adebayo, 2017)
Zn		0,45	0,255	43,3	
Pb		0,47	0,115	75,53	
Ni	Efluente de galvanizado	132	1,716	98,7	(Sivakumar et al., 2018)
As	Agua de desecho doméstico	0,14	0,09	35,7	(Dimpe et al., 2018)
Cd		11,9	10	15,96	
Cr		0,23	0,18	21,74	
Ni		0,31	0,27	12,9	
Pb		0,08	0,07	12,5	
Zn		0,41	0,12	70,73	
As		1,34	0,27	79,85	
Cd		13,6	11,2	17,64	
Cr		2,78	1,43	48,56	
Ni		2,48	1,24	50	
Pb	Agua de desecho industrial	0,63	0,41	34,92	
Zn		3,49	2,34	32,95	

Elemento metálico traza	Fuente analizada	Concentración inicial (mg/L)	Concentración final (mg/L)	% de remoción	Referencia
Zn	Efluente de planta de galvanizado	16,56	0,497	97	(Packialakshmi et al., 2021)
	Agua de desecho industrial	88,72	3,84	94,55	(Kanoje et al., 2021)
	Planta de tratamiento			99	(Baloch et al., 2019)
Pb	Agua de desecho industrial	10,73	0,214	98	(Olaoye et al., 2018)
Cd		15,35	0,307	98	
Cu	Efluente de industria de la joyería	2,7	0,39		(Tuas & Masduqi, 2019)
	Agua de desecho industrial	0,65	0,4	93,86	(Magnaye, 2019)
			0	100	
Fe	Efluente industria textil	2,3	0,43	85,55	(Bhairappa et al., 2020)
	Agua de desecho industrial	10,848	0,53	95,11	(Ojoawo et al., 2019)
Cu	Agua de desagüe	1,235	0,33	73	(Alhameedawi et al., 2020)
Co		1,642	0,394	76	
Pb	Agua de desecho industrial	-	-	96,4	(Ajala et al., 2020)
Cr	Efluente planta de tratamiento	-	-	95,6	(Sarawat et al., 2020)
Cd		-	-	66,88	

Conclusiones

La contaminación por elementos metálicos traza constituye una preocupación en la actualidad. Debido al desarrollo de actividades antrópicas, las concentraciones de los elementos metálicos traza han aumentado en el medio ambiente. Se pudo apreciar cómo la concentración de los elementos metálicos traza es mayor en lugares donde ocurre la extracción de minerales (minería), el procesamiento de metales (industria) y sus cercanías. Una forma de evitar el envenenamiento por elementos metálicos traza es mediante las legislaciones sobre la calidad de agua de vertimiento y agua potable. Es necesario desarrollar estrategias, políticas, tecnologías y materiales para limitar los efectos tóxicos en animales, plantas y humanos. Las estrategias para la eliminación de contaminantes metálicos en sistemas acuosos requieren de una evaluación previa para seleccionar la más adecuada en dependencia de contexto, ya sea para cuerpos de agua o efluentes. En este artículo se resumen algunas de las técnicas empleadas para la remoción de los elementos metálicos traza, así como sus ventajas y desventajas, siendo la adsorción el proceso más empleado y el carbón activado el material adsorbente más utilizado. El carbón activado ha probado numerosa versatilidad, y poseer elevada capacidad de adsorción y efectividad de remoción. La literatura consultada muestra la gran variedad

de fuentes que se pueden emplear para la obtención de carbón activado. La principal forma en la que se encuentran y se adsorben los elementos metálicos traza es como especie catiónica, sin embargo, las investigaciones futuras podrían enfocarse al empleo de los materiales descritos en este artículo para la eliminación de los elementos metálicos traza en forma de aniones complejos.

Referencias

- Abd El-Lateef, H. M., Khalaf, M. & Saleh, M. M. (2018). Adsorption and removal of cationic and anionic surfactants using zero-valent iron nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*, 268, 497-505.
- Abdel Maksoud, M. I. A., Elgarahy, A. M., Farrell, C., Al-Muhtaseb, A. A. H., Rooney, D. W. & Osman, A. I. (2020). Insight on water remediation application using magnetic nanomaterials and biosorbents. *Coordination Chemistry Reviews*, 403, 213096. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2019.213096>
- Abdullah, N., Yusof, N., Lau, W. J., Jaafar, J. & Ismail, A. F. (2019). Recent trends of heavy metal removal from water/wastewater by membrane technologies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 76, 17-38. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.029>
- Abdulrazak, S., Hussaini, K. & Sani, H. M. (2017). Evaluation of removal efficiency of heavy metals by low-cost activated carbon prepared from African palm fruit. *Applied Water Science*, 7(6), 3151-3155. <https://doi.org/10.1007/s13201-016-0460-x>
- Afolabi, T. J., Alade, A. O., Jimoh, M. O. & Fashola, I. O. (2016). Heavy metal ions adsorption from dairy industrial wastewater using activated carbon from milk bush kernel shell. *Desalination and Water Treatment*, 57(31), 14565-14577. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1074619>
- Ahmad, S. Z. N., Wan Salleh, W. N., Ismail, A. F., Yusof, N., Mohd Yusop, M. Z. & Aziz, F. (2020). Adsorptive removal of heavy metal ions using graphene-based nanomaterials: Toxicity, roles of functional groups and mechanisms. *Chemosphere*, 248, 126008. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126008>

- Ajala, A. K., Otunola, O. O. & Oyeniyi, W. O. (2020). Adsorption of Lead and Iron from Industrial Wastewater using Melon (*Citrullus Colocynthis*) Husk Activated Carbon. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 9(7), 1638-1642.
- Akpomie, K. G., Dawodu, F. A. & Adebawale, K. O. (2015). Mechanism on the sorption of heavy metals from binary-solution by a low cost montmorillonite and its desorption potential. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 757-767. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.025>
- Alamri, D. A., Al-Solaimani, S. G., Abohassan, R. A., Rinklebe, J. & Shaheen, S. M. (2021). Assessment of water contamination by potentially toxic elements in mangrove lagoons of the Red Sea, Saudi Arabia. *Environmental geochemistry and health*, 43(2), 4819-4830. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00956-5>
- Alhameedawi, F. A. H., Challab, M. K. & Khathi, M. T. (2020). Use Activated Carbon Prepared from Some Palm Waste to Remove Co (II) and Cu (II) from Sewage Water. *University of Thi-Qar Journal of Science*, 7(2), 101-105.
- Alkherraz, A. M., Ali, A. K. & Elsherif, K. M. (2020). Removal of Pb (II), Zn (II), Cu (II) and Cd (II) from aqueous solutions by adsorption onto olive branches activated carbon: equilibrium and thermodynamic studies. *Chem. Int*, 6(1), 11-20.
- Alonso, D. L., Pérez, R., Okio, C. K. & Castillo, E. (2020). Assessment of mining activity on arsenic contamination in surface water and sediments in southwestern area of Santurbán paramo, Colombia. *Journal of environmental management*, 264, 110478.
- Alvarez-Galvan, Y., Minofar, B., Futera, Z., Francoeur, M., Jean-Marius, C., Brehm, N., Yacou, C., Jauregui-Haza, U. J. & Gaspard, S. (2022). Adsorption of Hexavalent Chromium Using Activated Carbon Produced from Sargassum ssp.: Comparison between Lab Experiments and Molecular Dynamics Simulations. *Molecules*, 27(18), 6040.
- Álvarez-Torrellas, S., Peres, J., Gil-Álvarez, V., Ovejero, G. & García, J. (2017). Effective adsorption of non-biodegradable pharmaceuticals from hospital wastewater with different carbon materials. *Chemical Engineering Journal*, 320, 319-329.

- Amoakwah, E., Ahsan, S., Rahman, M. A., Asamoah, E., Essumang, D. K., Ali, M. & Islam, K. R. (2020). Assessment of heavy metal pollution of soil-water-vegetative ecosystems associated with artisanal gold mining. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 29(7), 788-803.
- Ani, J. U., Ochonogor, A. E., Akpomie, K. G., Olikagu, C. S. & Igboanugo, C. C. (2019). Abstraction of arsenic (III) on activated carbon prepared from Dialium guineense seed shell: kinetics, isotherms and thermodynamic studies. *SN Applied Sciences*, 1(10), 1304. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1335-1>
- Antunes, I. M. H. R., Neiva, A., Albuquerque, M., Carvalho, P., Santos, A. & Cunha, P. P. (2018). Potential toxic elements in stream sediments, soils and waters in an abandoned radium mine (central Portugal). *Environmental geochemistry and health*, 40(1), 521-542.
- Arshad, H., Iram, J. & Khan, N. A. (2014). Characterization and treatment of electroplating industry wastewater using Fenton's reagent. *Journal of Chemical and Pharmaceutical Research*, 6(1), 622-627.
- Asad, S. A., Farooq, M., Afzal, A. & West, H. (2019). Integrated phytobial heavy metal remediation strategies for a sustainable clean environment-A review. *Chemosphere*, 217, 925-941.
- Azimi, A., Azari, A., Rezakazemi, M. & Ansarpour, M. (2017). Removal of heavy metals from industrial wastewaters: a review. *ChemBioEng Reviews*, 4(1), 37-59.
- Baloch, A., Qaisrani, Z. N., Zahid, I., Hussain, S., Mengal, A. N., Sami, S. K., . . . Sultan, S. H. (2019). Removal of Zinc (II) from municipal wastewater using chemically modified activated carbon developed from Rice husk and Kikar charcoal. *Journal of Applied and Emerging Sciences*, 9(1), 41.
- Bankole, M. T., Abdulkareem, A. S., Mohammed, I. A., Ochigbo, S. S., Tijani, J. O., Abubakre, O. K. & Roos, W. D. (2019). Selected Heavy Metals Removal From Electroplating Wastewater by Purified and Polyhydroxylbutyrate Functionalized Carbon Nanotubes Adsorbents. *Scientific reports*, 9(1), 4475. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37899-4>
- Bansal, R. C. & Goyal, M. (2005). *Activated carbon adsorption*. CRC press.

- Barik, B., Kumar, A., Nayak, P. S., Achary, L. S. K., Rout, L. & Dash, P. (2020). Ionic liquid assisted mesoporous silica-graphene oxide nano-composite synthesis and its application for removal of heavy metal ions from water. *Materials Chemistry and Physics*, 239, 122028. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122028>
- Bayisa, Y. M., Bullo, T. A. & Akuma, D. A. (2021). Chromium removal from tannery effluents by adsorption process via activated carbon chat stems (*Catha edulis*) using response surface methodology. *BMC Research Notes*, 14(1), 431. <https://doi.org/10.1186/s13104-021-05855-7>
- Berihun, D. (2017). Removal of chromium from industrial wastewater by adsorption using coffee husk. *J Mater Sci Eng*, 6(2), 331.
- Bhairappa, A. A., Konka, S. K. & Lade, R. M. (2020). *Iron Adsorption from Textile Industrial Effluent on Activated Carbon Prepared from Tamarind Seeds* (*Tamarindus indica* L.).
- Borji, H., Ayoub, G. M., Bilbeisi, R., Nassar, N. & Malaeb, L. (2020). How Effective Are Nanomaterials for the Removal of Heavy Metals from Water and Wastewater? *Water, Air, & Soil Pollution*, 231(7), 330. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04681-0>
- Briffa, J., Sinagra, E. & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9), e04691.
- Chaemiso, T. D. & Nefo, T. (2019). Removal methods of heavy metals from laboratory wastewater. *Journal of Natural Sciences Research*, 9(2), 36-42.
- Chen, W.-H., Hoang, A. T., Nižetić, S., Pandey, A., Cheng, C. K., Luque, R., Ong, H. C., Thomas, S. & Nguyen, X. P. (2022). Biomass-derived biochar: From production to application in removing heavy metal-contaminated water. *Process Safety and Environmental Protection*, 160, 704-733.
- Chin, J. F., Heng, Z. W., Teoh, H. C., Chong, W. C. & Pang, Y. L. (2021). Recent development of magnetic biochar crosslinked chitosan on heavy metal removal from wastewater—Modification, application and mechanism. *Chemosphere*, 133035.
- Chowdhury, Z. K. (2013). *Activated carbon: solutions for improving water quality*: American Water Works Association.

- Custodio, M., Cuadrado, W., Peñaloza, R., Montalvo, R., Ochoa, S. & Quispe, J. (2020). Human risk from exposure to heavy metals and arsenic in water from rivers with mining influence in the Central Andes of Peru. *Water*, 12(7), 1946.
- Da'na, E. (2017). Adsorption of heavy metals on functionalized-mesoporous silica: A review. *Microporous and Mesoporous Materials*, 247, 145-157. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2017.03.050>
- De Beni, E., Giurlani, W., Fabbri, L., Emanuele, R., Santini, S., Sarti, C., Martellini, T., Piciollo, E., Cincinelli, A. & Innocenti, M. (2022). Graphene-based nanomaterials in the electroplating industry: A suitable choice for heavy metal removal from wastewater. *Chemosphere*, 292, 133448. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133448>
- Deb, V. K., Rabbani, A., Upadhyay, S., Bharti, P., Sharma, H., Rawat, D. S. & Saxena, G. (2020). Microbe-Assisted Phytoremediation in Reinstating Heavy Metal-Contaminated Sites: Concepts, Mechanisms, Challenges, and Future Perspectives. In P. K. Arora (Ed.), *Microbial Technology for Health and Environment*, (pp. 161-189). Springer Singapore.
- Deng, Y., Huang, S., Laird, D. A., Wang, X. & Meng, Z. (2019). Adsorption behaviour and mechanisms of cadmium and nickel on rice straw biochars in single- and binary-metal systems. *Chemosphere*, 218, 308-318. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.081>
- Devi, P. & Kumar, P. (2020). Concept and application of phytoremediation in the fight of heavy metal toxicity. *Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 12(6), 795-804.
- Dhaarini, S. T., Gomathi, R., Manoj Kumar, C. & Yogeswari, K. (2021). An innovative prototype furnace designed to produce activated carbon for removal of chromium from tannery waste. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6016-6020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.530>
- Dimpe, K. M., Ngila, J. C. & Nomngongo, P. N. (2017). Application of waste tyre-based activated carbon for the removal of heavy metals in wastewater. *Cogent Engineering*, 4(1), 1330912. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1330912>

- Dimpe, K. M., Ngila, J. C. & Nomngongo, P. N. (2018). Preparation and application of a tyre-based activated carbon solid phase extraction of heavy metals in wastewater samples. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 105, 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.02.005>
- dos Santos, A. J., Barazorda-Ccahuana, H. L., Caballero-Manrique, G., Chérémond, Y., Espinoza-Montero, P. J., González-Rodríguez, J. R., Jáuregui-Haza, U. J., Lanza, M. R. V., Nájera, A., Oporto, C., Pérez Parada, A., Pérez, T., Quezada, V. D., Rojas, V., Sosa, V., Thiam, A., Torres-Palma, R. A., Vargas, R. & Garcia-Segura, S. (2023). Accelerating innovative water treatment in Latin America. *Nature Sustainability*, 6(4), 349-351. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-01042-z>
- Duan, C., Ma, T., Wang, J. & Zhou, Y. (2020). Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 37, 101339. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101339>
- EPA, U. (2006). Edition of the drinking water standards and health advisories. *US Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA*.
- Fei, Y. & Hu, Y. H. (2022). Design, synthesis, and performance of adsorbents for heavy metal removal from wastewater: a review. *Journal of Materials Chemistry A*, 10(3), 1047-1085.
- Fernández, M., Martín, G., Corzo, J., de la Linde, A., García, E., López, M. & Sousa, M. (2018). Design and testing of a new diatom-based index for heavy metal pollution. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 74(1), 170-192.
- Flora, S. J. & Agrawal, S. (2017). Arsenic, cadmium, and lead *Reproductive and developmental toxicology* (pp. 537-566): Elsevier.
- Francoeur, M., Ferino-Pérez, A., Yacou, C., Jean-Marius, C., Emmanuel, E., Chérémond, Y., Jauregui-Haza, U. & Gaspard, S. (2021). Activated carbon synthesized from Sargassum (sp) for adsorption of caffeine: Understanding the adsorption mechanism using molecular modeling. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104795.
- Fu, F. & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *Journal of environmental management*, 92(3), 407-418. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.011>

- Fu, Z. & Xi, S. (2020). The effects of heavy metals on human metabolism. *Toxicology mechanisms and methods*, 30(3), 167-176.
- Gautam, P. K., Gautam, R. K., Banerjee, S., Chattopadhyaya, M. & Pandey, J. (2016). Heavy metals in the environment: fate, transport, toxicity and remediation technologies. *Nova Sci Publishers*, 60, 101-130.
- Ghorpade, A. & Ahammed, M. M. (2018). Water treatment sludge for removal of heavy metals from electroplating wastewater. *Environmental Engineering Research*, 23(1), 92-98.
- Gyamfi, E., Appiah-Adjei, E. K. & Adjei, K. A. (2019). Potential heavy metal pollution of soil and water resources from artisanal mining in Kokoteasua, Ghana. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 450-456.
- Haldar, S. & Ghosh, A. (2020). Microbial and plant-assisted heavy metal remediation in aquatic ecosystems: a comprehensive review. *3 Biotech*, 10(5), 205. <https://doi.org/10.1007/s13205-020-02195-4>
- Hargreaves, A. J., Vale, P., Whelan, J., Alibardi, L., Constantino, C., Dotro, G., Cartmell, E. & Campo, P. (2018). Coagulation–flocculation process with metal salts, synthetic polymers and biopolymers for the removal of trace metals (Cu, Pb, Ni, Zn) from municipal wastewater. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(2), 393-402. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1481-3>
- Hasan, S. M. M., Akber, M. A., Bahar, M. M., Islam, M. A., Akbor, M. A., Siddique, M. A. B. & Islam, M. A. (2021). Chromium contamination from tanning industries and Phytoremediation potential of native plants: a study of savar tannery industrial estate in Dhaka, Bangladesh. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 1-9.
- Hemavathy, R., Kumar, P. S., Kanmani, K. & Jahnavi, N. (2020). Adsorptive separation of Cu (II) ions from aqueous medium using thermally/chemically treated Cassia fistula based biochar. *Journal of cleaner production*, 249, 119390.
- Hsu, L.-C., Huang, C.-Y., Chuang, Y.-H., Chen, H.-W., Chan, Y.-T., Teah, H. Y., Chen, T.-Y., Chang, C.-F., Liu, Y.-T. & Tzou, Y.-M. (2016). Accumulation of heavy metals and trace elements in fluvial sediments received effluents from traditional and semiconductor industries. *Scientific reports*, 6(1), 1-12.

- Inobeme, A., Mathew, J. T., Adetunji, C. O., Ajai, A. I., Inobeme, J., Maliki, M., Okonkwo, S., Adekoya, M. A., Bamigboye, M. O., Jacob, J. O. & Eziukwu, C. A. (2023). Recent advances in nanotechnology for remediation of heavy metals. *Environmental monitoring and assessment*, 195(1), 1-24.
- Iturbides, R. D. L. C., Haza, U. J. & Polaert, I. (2022). Recent technological innovations on continuous microwave assisted biomass pyrolysis and perspectives for industrial scale applications. *Biore-source Technology Reports*, 101202.
- Jayakumar, D. R. S., Daisy, T., Kalaiselvi, J., Mahalakshmi, P. & Soumiya, V. (2020). *A Theoretical study on the Microbial Fuel Cells Technology for Waste Water Treatment along with Heavy Metal Reduction and Power Generation using Nano catalysts*.
- Jayawardena, U. A., Angunawela, P., Wickramasinghe, D. D., Ratnasooriya, W. D. & Udagama, P. V. (2017). Heavy metal-induced toxicity in the Indian green frog: Biochemical and histopathological alterations. *Environmental toxicology and chemistry*, 36(10), 2855-2867.
- Ji, H., Li, H., Zhang, Y., Ding, H., Gao, Y. & Xing, Y. (2018). Distribution and risk assessment of heavy metals in overlying water, porewater, and sediments of Yongding River in a coal mine brownfield. *Journal of soils and sediments*, 18(2), 624-639.
- Jin, Y., Chen, C., Chen, X., Zhang, L., Chen, Y., Cai, Z., . . . Guo, C. (2006). Standards for drinking water quality national standard of the People's Republic of China (GB 5749-2006). *Ministry of Health*.
- Joseph, L., Jun, B.-M., Flora, J. R. V., Park, C. M. & Yoon, Y. (2019). Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review. *Chemosphere*, 229, 142-159. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.04.198>
- Kanoje, M., Bhor, M., Toche, S. & Jadhav, P. (2021). *Removal of Zinc from Industrial Wastewater using Rice Husk and Activated Carbon*.
- Khalid, N., Rizvi, Z. F., Yousaf, N., Khan, S. M., Noman, A., Aqeel, M., Latif, K. & Rafique, A. (2021). Rising metals concentration in the environment: a response to effluents of leather industries in Sialkot. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 106(3), 493-500. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03111-z>

- Khan, M. N., Wasim, A. A., Sarwar, A. & Rasheed, M. F. (2011). Assessment of heavy metal toxicants in the roadside soil along the N-5, National Highway, Pakistan. *Environmental monitoring and assessment*, 182(1), 587-595. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1899-8>
- Kobielska, P. A., Howarth, A. J., Farha, O. K. & Nayak, S. (2018). Metal-organic frameworks for heavy metal removal from water. *Coordination Chemistry Reviews*, 358, 92-107.
- Kolbasov, A., Sinha-Ray, S., Yarin, A. & Pourdeyhimi, B. (2017). Heavy metal adsorption on solution-blown biopolymer nanofiber membranes. *Journal of Membrane Science*, 530, 250-263.
- Kumar, S., Islam, A. R. M. T., Islam, H. M. T., Hasanuzzaman, M., Ongoma, V., Khan, R. & Mallick, J. (2021). Water resources pollution associated with risks of heavy metals from Vatukoula Goldmine region, Fiji. *Journal of environmental management*, 293, 112868.
- Kumpiene, J., Lagerkvist, A. & Maurice, C. (2008). Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments – A review. *Waste Management*, 28(1), 215-225. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.012>
- Kurniawan, T. A., Chan, G. Y. S., Lo, W.-H. & Babel, S. (2006). Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. *Chemical Engineering Journal*, 118(1), 83-98. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.01.015>
- Kwiatkowski, J. F. (2011). *Activated carbon: classifications, properties and applications*. Nova Science Publishers, Incorporated.
- Leng, L., Xu, S., Liu, R., Yu, T., Zhuo, X., Leng, S., Xiong, Q. & Huang, H. (2020). Nitrogen containing functional groups of biochar: An overview. *Bioresource Technology*, 298, 122286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122286>
- Li, H., Dong, X., da Silva, E. B., de Oliveira, L. M., Chen, Y. & Ma, L. Q. (2017). Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*, 178, 466-478. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.072>
- Liu, L., Li, W., Song, W. & Guo, M. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the Total Environment*, 633, 206-219.

- Lu, X.-g. & Guo, Y.-t. (2019). Removal of Pb (II) from aqueous solution by sulfur-functionalized walnut shell. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(13), 12776-12787. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04753-7>
- Ma, J., Huang, W., Zhang, X., Li, Y. & Wang, N. (2021). The utilization of lobster shell to prepare low-cost biochar for high-efficient removal of copper and cadmium from aqueous: Sorption properties and mechanisms. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(1), 104703. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104703>
- Ma, Yang, J., Gao, X., Liu, Z., Liu, X. & Xu, Z. (2019). Removal of chromium (VI) from water by porous carbon derived from corn straw: Influencing factors, regeneration and mechanism. *Journal of Hazardous Materials*, 369, 550-560. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.02.063>
- Maarof, H. I., Daud, W. M. A. W. & Aroua, M. K. (2017). Recent trends in removal and recovery of heavy metals from wastewater by electrochemical technologies. *Reviews in Chemical Engineering*, 33(4), 359-386.
- Magnaye, R. C. (2019). *The Removal of Cu 2 in Industrial Wastewater Using the Activated Carbon Derived from Mango (Mangifera indica) Leaves*.
- Mahurpawar, M. (2015). Effects of heavy metals on human health. *International Journal of Researcb-Granthaalayah*, ISSN-23500530, 2394-3629.
- Maleki, A., Hayati, B., Najafi, F., Gharibi, F. & Joo, S. W. (2016). Heavy metal adsorption from industrial wastewater by PAMAM/TiO₂ nanohybrid: preparation, characterization and adsorption studies. *Journal of Molecular Liquids*, 224, 95-104.
- Malik, L. A., Bashir, A., Qureashi, A. & Pandith, A. H. (2019). Detection and removal of heavy metal ions: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 17(4), 1495-1521.
- Manirethan, V. & Balakrishnan, R. M. (2020). Batch and continuous studies on the removal of heavy metals using biosynthesised melanin impregnated activated carbon. *Environmental Technology & Innovation*, 20, 101085. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101085>

- Manirethan, V., Raval, K., Rajan, R., Thaira, H. & Balakrishnan, R. M. (2018). Kinetic and thermodynamic studies on the adsorption of heavy metals from aqueous solution by melanin nanopigment obtained from marine source: *Pseudomonas stutzeri*. *Journal of environmental management*, 214, 315-324.
- Martín-Lara, M. A., Blázquez, G., Trujillo, M. C., Pérez, A. & Calero, M. (2014). New treatment of real electroplating wastewater containing heavy metal ions by adsorption onto olive stone. *Journal of cleaner production*, 81, 120-129. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.036>
- Masindi, V. & Muedi, K. L. (2018). Environmental contamination by heavy metals. *Heavy metals*, 10, 115-132.
- Mishra, S. & Bharagava, R. N. (2016). Toxic and genotoxic effects of hexavalent chromium in environment and its bioremediation strategies. *Journal of Environmental Science and Health. Part C, Environmental carcinogenesis & ecotoxicology reviews*, 34(1), 1-32. <https://doi.org/10.1080/10590501.2015.1096883>
- Mishra, S., Bharagava, R. N., More, N., Yadav, A., Zainith, S., Mani, S. & Chowdhary, P. (2019). Heavy metal contamination: an alarming threat to environment and human health *Environmental biotechnology: For sustainable future* (pp. 103-125). Springer.
- Mochizuki, H. (2019). Arsenic neurotoxicity in humans. *International journal of molecular sciences*, 20(14), 3418.
- Mukherjee, S., Mukhopadhyay, S., Hashim, M. A. & Sen Gupta, B. (2015). Contemporary Environmental Issues of Landfill Leachate: Assessment and Remedies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 45(5), 472-590. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.876524>
- Nazaripour, M., Reshadi, M. A. M., Mirbagheri, S. A., Nazaripour, M. & Bazargan, A. (2021). Research trends of heavy metal removal from aqueous environments. *Journal of environmental management*, 287, 112322. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112322>
- Niksirat, M., Sadeghi, R. & Esmaili, J. (2019). Removal of Mn from aqueous solutions, by activated carbon obtained from tire residuals. *SN Applied Sciences*, 1(7), 782. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0797-5>

- Norma Cubana 827. (2016). *NC 827: Agua potable-Requisitos sanitarios*. Cuba.
- Nwakonobi, T. U., Onoja, S. B. & Ogbaje, H. (2018). Removal of Certain Heavy Metals from Brewery Wastewater Using Date Palm Seeds Activated Carbon. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(1), 233-238. <https://doi.org/10.13031/aea.11875>
- Nwosu-Obieogu, K. & Okolo, B. I. (2020). Biosorption of chromium (VI) from textile waste water using luffa cylindrica activated carbon. *Environmental Quality Management*, 29(4), 23-31.
- Ojoawo, S. O., Oyekanmi, S. E. & Naik, P. A. (2019). Adsorption And Desorption Of Fe²⁺ Using Sugarcane Bagasse Activated Carbon In Remediating Metal Galvanizing Industrial Wastewater. *Think India Journal*, 22(14), 15021-15034.
- Olaoye, R. A., Afolayan, O. D., Mustapha, O. I. & Adeleke, H. G. (2018). The efficacy of banana peel activated carbon in the removal of cyanide and selected metals from cassava processing wastewater. *Advances in research*, 16(1), 1-12.
- Olayebi, O. O. & Adebayo, A. T. (2017). Removal of heavy metals from petroleum refinery effluent using coconut shell-based activated carbon. *CARD Int. J. Eng. Emerg. Sci. Disc*, 2(2), 102-117.
- Özsin, G., Kılıç, M., Apaydın-Varol, E. & Pütün, A. E. (2019). Chemically activated carbon production from agricultural waste of chickpea and its application for heavy metal adsorption: equilibrium, kinetic, and thermodynamic studies. *Applied Water Science*, 9(3), 56. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0942-8>
- Packialakshmi, S., Anuradha, B., Nagamani, K., Sarala Devi, J. & Sujatha, S. (2021). Treatment of industrial wastewater using coconut shell based activated carbon. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.548>
- Panigrahi, T. & Santhoskumar, A. U. (2020). Adsorption process for reducing heavy metals in Textile Industrial Effluent with low cost adsorbents. *Prog. Chem. Biochem. Res*, 3, 135-139.
- Pavithra, K. G. & Jaikumar, V. (2019). Removal of colorants from wastewater: A review on sources and treatment strategies. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 75, 1-19.

- Peng, W., Li, X., Xiao, S. & Fan, W. (2018). Review of remediation technologies for sediments contaminated by heavy metals. *Journal of soils and sediments*, 18(4), 1701-1719.
- Pérez, Y. A., Cortés, D. A. G. & Haza, U. J. J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas*, 31(1), 2279-2279.
- Pratish, A., Kumar, A. & Hu, Z. (2018). Adverse effect of heavy metals (As, Pb, Hg, and Cr) on health and their bioremediation strategies: a review. *International Microbiology*, 21(3), 97-106.
- Qasem, N. A. A., Mohammed, R. H. & Lawal, D. U. (2021). Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review. *npj Clean Water*, 4(1), 36. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>
- Qiao, D., Wang, G., Li, X., Wang, S. & Zhao, Y. (2020). Pollution, sources and environmental risk assessment of heavy metals in the surface AMD water, sediments and surface soils around unexploited Rona Cu deposit, Tibet, China. *Chemosphere*, 248, 125988.
- Rahimzadeh, M. R., Rahimzadeh, M. R., Kazemi, S. & Moghadamnia, A.-a. (2017). Cadmium toxicity and treatment: An update. *Caspian journal of internal medicine*, 8(3), 135.
- Rehman, K., Fatima, F., Waheed, I. & Akash, M. S. H. (2018). Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *Journal of cellular biochemistry*, 119(1), 157-184.
- Reshadi, M. A. M., Bazargan, A. & McKay, G. (2020). A review of the application of adsorbents for landfill leachate treatment: Focus on magnetic adsorption. *Science of the Total Environment*, 731, 138863. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138863>
- Rodríguez, J. & Mandalunis, P. M. (2018). A review of metal exposure and its effects on bone health. *Journal of toxicology*, 2018.
- Sadeek, S. A., Negm, N. A., Hefni, H. H. & Wahab, M. M. A. (2015). Metal adsorption by agricultural biosorbents: adsorption isotherm, kinetic and biosorbents chemical structures. *International journal of biological macromolecules*, 81, 400-409.
- Saha, N., Rahman, M. S., Ahmed, M. B., Zhou, J. L., Ngo, H. H. & Guo, W. (2017). Industrial metal pollution in water and probabilistic assessment of human health risk. *Journal of environmental management*, 185, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.023>

- Saikia, J., Gogoi, A. & Baruah, S. (2019). Nanotechnology for water remediation *Environmental Nanotechnology* (pp. 195-211). Springer.
- Saini, A. S. & Melo, J. S. (2013). Biosorption of uranium by melanin: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies. *Bioresource Technology*, 149, 155-162. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.034>
- Sajjad, M., Khan, S., Ali Baig, S., Munir, S., Naz, A., Ahmad, S. S. & Khan, A. (2017). Removal of potentially toxic elements from aqueous solutions and industrial wastewater using activated carbon. *Water Science and Technology*, 75(11), 2571-2579. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.130>
- Saraswat, S. K., Demir, M. & Gosu, V. (2020). Adsorptive removal of heavy metals from industrial effluents using cow dung as the biosorbent: Kinetic and isotherm modeling. *Environmental Quality Management*, 30(1), 51-60. <https://doi.org/10.1002/tqem.21703>
- Saravanan, A., Jayasree, R., Hemavathy, R., Jeevanantham, S., Hamsini, S., Kumar, P., Yaashikaa, P., Manivasagan, V. & Yuvaraj, D. (2019). Phytoremediation of Cr (VI) ion contaminated soil using Black gram (*Vigna mungo*): Assessment of removal capacity. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(3), 103052.
- Schück, M. & Greger, M. (2020). Plant traits related to the heavy metal removal capacities of wetland plants. *International Journal of Phytoremediation*, 22(4), 427-435. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1669529>
- Secall, P. P. (2021). Perspectiva del derecho del medio ambiente y de las políticas ambientales de la Unión Europea (Primer semestre 2021). *Revista Catalana de Dret Ambiental*, 12(1).
- Shahrokhi-Shahraki, R., Benally, C., El-Din, M. G. & Park, J. (2021). High efficiency removal of heavy metals using tire-derived activated carbon vs commercial activated carbon: Insights into the adsorption mechanisms. *Chemosphere*, 264, 128455. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128455>
- Shang, J., Zong, M., Yu, Y., Kong, X., Du, Q. & Liao, Q. (2017). Removal of chromium (VI) from water using nanoscale zerovalent iron particles supported on herb-residue biochar. *Journal of environmental management*, 197, 331-337. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.085>

- Sharma, M., Singh, J., Hazra, S. & Basu, S. (2019). Adsorption of heavy metal ions by mesoporous ZnO and TiO₂@ZnO monoliths: Adsorption and kinetic studies. *Microchemical Journal*, 145, 105-112. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.10.026>
- Shi, Q., Terracciano, A., Zhao, Y., Wei, C., Christodoulatos, C. & Meng, X. (2019). Evaluation of metal oxides and activated carbon for lead removal: Kinetics, isotherms, column tests, and the role of co-existing ions. *Science of the Total Environment*, 648, 176-183.
- Simeonov, L. I., Kochubovski, M. V. & Simeonova, B. G. (2010). *Environmental heavy metal pollution and effects on child mental development: Risk assessment and prevention strategies*. Springer.
- Singh, J., Sharma, M. & Basu, S. (2018). Heavy metal ions adsorption and photodegradation of remazol black XP by iron oxide/silica monoliths: Kinetic and equilibrium modelling. *Advanced Powder Technology*, 29(9), 2268-2279.
- Singh, R., Venkatesh, A., Syed, T. H., Reddy, A., Kumar, M. & Kurakalva, R. M. (2017). Assessment of potentially toxic trace elements contamination in groundwater resources of the coal mining area of the Korba Coalfield, Central India. *Environmental Earth Sciences*, 76(16), 1-17.
- Sivakumar, D., Nouri, J., Modhini, T. M. & Deepalakshmi, K. (2018). Nickel removal from electroplating industry wastewater: A bamboo activated carbon. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 4(3), 325-338.
- Song, Y., Kirkwood, N., Maksimović, Č., Zheng, X., O'Connor, D., Jin, Y. & Hou, D. (2019). Nature based solutions for contaminated land remediation and brownfield redevelopment in cities: A review. *Science of the Total Environment*, 663, 568-579.
- Su, C. (2014). A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: Situation, impact and remediation techniques. *Environmental Skeptics and Critics*, 3(2), 24.
- Sulejmanović, J., Memić, M., Šehović, E., Omanović, R., Begić, S., Pazalja, M., Ajanović, A., Azhar, O. & Sher, F. (2022). Synthesis of green nano sorbents for simultaneous preconcentration and recovery of heavy metals from water. *Chemosphere*, 296, 133971.

- Sultana, M., Rownok, M. H., Sabrin, M., Rahaman, M. H. & Alam, S. N. (2022). A review on experimental chemically modified activated carbon to enhance dye and heavy metals adsorption. *Cleaner Engineering and Technology*, 6, 100382.
- Suman, J., Uhlik, O., Viktorova, J. & Macek, T. (2018). Phytoextraction of heavy metals: a promising tool for clean-up of polluted environment? *Frontiers in plant science*, 9, 1476.
- Tshamala, A. K., Musala, M. K., Kalenga, G. K. & wa Mumapanda, H. D. (2021). Assessment of Surface Water Quality in Kakanda: Detection of Pollution from Mining Activities. *Journal of Environmental Protection*, 12(9), 561-570.
- Tuas, M. A. & Masduqi, A. L. I. (2019). Removal of copper content in jewelry industry wastewater using commercial activated carbon. *Pollution Research*, 38, S53-S58.
- Tuomikoski, S., Runtti, H., Romar, H., Lassi, U. & Kangas, T. (2021). Multiple heavy metal removal simultaneously by a biomass-based porous carbon. *Water Environment Research*, 93(8), 1303-1314.
- Ukah, B., Egbueri, J., Unigwe, C. & Ubido, O. (2019). Extent of heavy metals pollution and health risk assessment of groundwater in a densely populated industrial area, Lagos, Nigeria. *International Journal of Energy and Water Resources*, 3(4), 291-303.
- Ullah, M., Nazir, R., Khan, M., Khan, W., Shah, M., Afridi, S. G. & Zada, A. (2019). The effective removal of heavy metals from water by activated carbon adsorbents of Albizia lebbbeck and Melia azedarach seed shells. *Soil and Water Research*, 15(1), 30-37.
- Upadhyay, A. K., Singh, R. & Singh, D. P. (2019). *Restoration of Wetland Ecosystem: A Trajectory Towards a Sustainable Environment*: Springer.
- Vardhan, K. H., Kumar, P. S. & Panda, R. C. (2019). A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: Current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, 290, 111197.
- Vareda, J. P., Valente, A. J. & Durães, L. (2019). Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review. *Journal of environmental management*, 246, 101-118.
- Vázquez-Núñez, E., Molina-Guerrero, C. E., Peña-Castro, J. M., Fernández-Luqueño, F. & de la Rosa-Álvarez, M. (2020). Use of nanotechnology for the bioremediation of contaminants: A review. *Processes*, 8(7), 826.

- Vélez-Pérez, L. S., Ramírez-Nava, J., Hernández-Flores, G., Talavera-Mendoza, O., Escamilla-Alvarado, C., Poggi-Varaldo, H. M., Solorza-Feria, O. & López-Díaz, J. A. (2020). Industrial acid mine drainage and municipal wastewater co-treatment by dual-chamber microbial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(26), 13757-13766. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.037>
- Verma, B. & Balomajumder, C. (2020). Hexavalent chromium reduction from real electroplating wastewater by chemical precipitation. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 34(1), 67-74.
- Wan, Z. & Li, K. (2018). Effect of pre-pyrolysis mode on simultaneous introduction of nitrogen/oxygen-containing functional groups into the structure of bagasse-based mesoporous carbon and its influence on Cu(II) adsorption. *Chemosphere*, 194, 370-380. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.181>
- Wang, Y., Li, H. & Lin, S. (2022). Advances in the Study of Heavy Metal Adsorption from Water and Soil by Modified Biochar. *Water*, 14(23), 3894.
- WHO, G. (2017). Guidelines for drinking-water quality. *World Health Organization*, 216, 303-304.
- Wu, X., Li, C., Lv, Z., Zhou, X., Chen, Z., Jia, H., Zhou, J., Yong, X., Wei, P. & Li, Y. (2020). Positive effects of concomitant heavy metals and their redox states on hexavalent chromium removal in microbial fuel cells. *RSC Advances*, 10(26), 15107-15115.
- Wuana, R. A. & Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *International Scholarly Research Notices*, 2011.
- Xu, Cao, Z., Zhang, Y., Yuan, Z., Lou, Z., Xu, X. & Wang, X. (2018). A review of functionalized carbon nanotubes and graphene for heavy metal adsorption from water: Preparation, application, and mechanism. *Chemosphere*, 195, 351-364. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.061>
- Xu, D., Zhou, B. & Yuan, R. (2019). Optimization of coagulation-flocculation treatment of wastewater containing Zn (II) and Cr (VI). 227, 052049.

- Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., Mohan Babu, V. P., Kanaka Durga, R., Manivasagan, V., Saranya, K. & Saravanan, A. (2019). Modelling on the removal of Cr(VI) ions from aquatic system using mixed biosorbent (*Pseudomonas stutzeri* and acid treated Banyan tree bark). *Journal of Molecular Liquids*, 276, 362-370. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.12.004>
- Yadav, A., Raj, A. & Bharagava, R. N. (2016). Detection and characterization of a multi-drug and multi-metal resistant Enterobacterium Pantoea sp. from tannery wastewater after secondary treatment process. *International Journal of Plant and Environment*, 2(1 and 2), 37-42.
- Yang, X., Wan, Y., Zheng, Y., He, F., Yu, Z., Huang, J., Wang, H., Ok, Y., Jiang, Y. & Gao, B. (2019). Surface functional groups of carbon-based adsorbents and their roles in the removal of heavy metals from aqueous solutions: A critical review. *Chemical Engineering Journal*, 366, 608-621. <https://doi.org/10.1016/j.ccej.2019.02.119>
- Yi, L., Gao, B., Liu, H., Zhang, Y., Du, C. & Li, Y. (2020). Characteristics and assessment of toxic metal contamination in surface water and sediments near a uranium mining area. *International journal of environmental research and public health*, 17(2), 548.
- Yunus, Z. M., Al-Gheethi, A., Othman, N., Hamdan, R. & Ruslan, N. N. (2020). Removal of heavy metals from mining effluents in tile and electroplating industries using honeydew peel activated carbon: A microstructure and techno-economic analysis. *Journal of cleaner production*, 251, 119738. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119738>
- Yunus, Z. M., Al-Gheethi, A., Othman, N., Hamdan, R. & Ruslan, N. N. (2022). Advanced methods for activated carbon from agriculture wastes; a comprehensive review. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 102(1), 134-158.
- Zamora-Ledezma, C., Negrete-Bolagay, D., Figueroa, F., Zamora-Ledezma, E., Ni, M., Alexis, F. & Guerrero, V. H. (2021). Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101504. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101504>

- Zazycki, M. A., Tanabe, E. H., Bertuol, D. A. & Dotto, G. L. (2017). Adsorption of valuable metals from leachates of mobile phone wastes using biopolymers and activated carbon. *Journal of environmental management*, 188, 18-25.
- Zhang, Hao, Y., Wang, X., Chen, Z. & Li, C. (2016). Competitive Adsorption of Cadmium(II) and Mercury(II) Ions from Aqueous Solutions by Activated Carbon from *Xanthoceras sorbifolia* Bunge Hull. *Journal of Chemistry*, 2016, 4326351. <https://doi.org/10.1155/2016/4326351>
- Zhang, Luo, J., Zhang, H., Li, T., Xu, H., Sun, Y., Gu, X., Hu, X. & Gao, B. (2022). Synthesis and adsorption performance of three-dimensional gels assembled by carbon nanomaterials for heavy metal removal from water: A review. *Science of the Total Environment*, 852, 158201. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158201>