

Composites cerámicos preparados con materiales de desecho: una alternativa en la adsorción de metales comúnmente presentes en aguas residuales industriales.

Karent Jinneth Fernández Lozano

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Especialista en Química Ambiental

Director

Angela Marcela Montaña Angarita

Doctora en Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Especialización en Química Ambiental

Bucaramanga

2020

Agradecimientos

A Dios, por todas las bendiciones que me regala a diario para lograr mis sueños.

A mi familia, por su confianza, amor y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.

A la profesora Angela Montaña, por su incondicional apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander y en especial a la escuela de química, por todo el conocimiento adquirido para seguir creciendo profesionalmente.

A mis compañeros de especialización, por todos los buenos momentos que compartimos.

Contenido

Introducción	8
1. Marco teórico.....	10
1.1. Agua	10
1.2. Contaminación del agua.....	10
1.3. Aguas Residuales	12
1.4. Metales en las aguas residuales industriales.	14
1.5. Adsorción de metales pesados.....	18
1.6. Materiales compuestos (COMPOSITES).	24
2. Contexto Nacional	26
2.1. Contaminación de las fuentes Hídricas en Colombia con metales pesados.	26
2.2. Valores límites máximos permisibles de metales en las aguas residuales industriales..	27
2.3. Materiales de desecho de fácil obtención en Colombia	27
3. Revisión Bibliográfica.....	35
3.1. Lodos de PTAD como adsorbentes para la remoción de metales pesados y filtros cerámicos para el tratamiento de aguas residuales.	35
3.2. Materiales de desecho forestales y agroindustriales como adsorbentes para la remoción de metales pesados	38
3.3. Composites de matriz cerámica y refuerzo orgánico como adsorbentes.	43
4. Conclusiones.....	45
Referencias.....	47

Lista de figuras

Figura 1. Ciclo de la contaminación del agua.....	11
Figura 2. Esquema de las relaciones entre los tres componentes de un sistema de adsorción	19
Figura 3. Adsorbente convencionales	22
Figura 4. Adsorbentes no convencionales	22
Figura 5. Residuos generados por la cadena de valor de la madera	31

Lista de tablas

Tabla 1. Principales actividades industriales que generan metales pesados.	14
Tabla 2. Síntomas de intoxicación típicos y niveles de concentración máximos permitidos	16
Tabla 3. Técnicas analíticas utilizadas en la investigación sobre el proceso de adsorción	23

Resumen

Título: Composites cerámicos preparados con materiales de desecho: una alternativa en la adsorción de metales comúnmente presentes en aguas residuales industriales.

Autor: Karent Jinneth Fernández Lozano

Palabras clave: Composites cerámicos, adsorción de metales, aguas residuales, material de desecho, tratamiento de aguas.

Descripción:

Actualmente, la calidad del agua está siendo amenazada por la continua contaminación que genera la actividad humana, provocando problemas en la salud pública que afectan no solo a las poblaciones humanas y animales, sino también al medio ambiente. Una de las principales fuentes de contaminación es el vertimiento de metales pesados por diferentes industrias, debido a su importancia en el desarrollo de la ciencia y la tecnología, representando una amenaza significativa por su alta toxicidad, bioacumulación en la cadena alimentaria y persistencia en la naturaleza.

Por medio de esta revisión bibliográfica se reunió información relevante sobre la remoción de metales pesados, comúnmente presentes en aguas residuales de origen industrial, por el método de adsorción, utilizando diferentes materiales cerámicos como adsorbentes, los cuales se pueden preparar con materiales de desecho localmente disponibles, como es el caso de los lodos de plantas de tratamiento de agua potable para usarlos como la matriz de los composites y la cascarilla de cacao, la borra del café y las cascaras de naranja como el refuerzo.

Este tipo de investigaciones permiten buscar una alternativa diferente a los métodos convencionales en el tratamiento de aguas residuales, efectiva en la remoción de metales, de bajo costo, bajo mantenimiento, amigable con el medio ambiente y con beneficios para la salud humana. Además, en los últimos años Colombia ha venido impulsando las investigaciones aplicadas orientadas a la innovación tecnológica para la economía circular, que permitan la recuperación de los cuerpos de agua y su reutilización en diferentes actividades productivas, y la reducción y aprovechamiento de diferentes residuos que actualmente representan grandes problemas ambientales.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Directora: Angela Marcela Montaña Angarita, M.Sc. Ph.D. en Química

Abstract

Title: Ceramic composites prepared with waste materials: an alternative in the adsorption of metals commonly present in industrial wastewater.*

Author: Karent Jinneth Fernández Lozano**

Key Words: Ceramic composites, adsorption of metals, wastewater, waste materials, water treatment.

Description:

Currently, the quality of water is being threatened by the continuous pollution generated by human activity, causing public health problems that affect not only human and animal populations, but also the environment. A major source of contamination is the dumping of heavy metals by different industries because of their importance in the development of science and technology, representing a significant threat by high toxicity, bioaccumulation in the food chain and persistence in nature.

Through this bibliographic review, relevant information was gathered on the removal of heavy metals, commonly present in industrial wastewater, by the adsorption method, using different ceramic materials as adsorbents, which can be prepared with locally available waste materials, as is the case with drinking water treatment plant sludge to be used as the matrix for composites and cocoa husk, coffee grounds and orange peels as reinforcement.

This type of research allows the search for a different alternative to conventional methods in the treatment of wastewater, effective in removing metals, low cost, low maintenance, friendly to the environment and with benefits for human health. In addition, in recent years Colombia has been promoting applied research aimed at technological innovation for the circular economy, which allows the recovery of bodies of water and their reuse in different productive activities, and the reduction and use of different waste that currently represent major environmental problems.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ciencias, Escuela de Química, Directora: Angela Marcela Montaña Angarita, M.Sc. Ph.D. en Química

Introducción

El agua es un compuesto extraordinariamente simple, sin embargo, es indispensable para la vida de todos los seres vivos, el hombre la necesita para realizar sus funciones básicas como el abastecimiento de agua potable, cocinar los alimentos, para su higiene y para usos domésticos e industriales (Carbajal & Gonzales, Capítulo 3. Propiedades y funciones biológicas del agua, 2012). Actualmente, la calidad del agua está siendo amenazada por la continua contaminación que genera la actividad humana, provocando problemas en la salud pública que afectan no solo a los seres vivos, sino también al medio ambiente (Gomez, 2018). Una de las principales fuentes de contaminación que está generando preocupación a nivel mundial, es el vertimiento de metales pesados a los cuerpos de agua, como resultado de las diferentes actividades industriales. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la concentración máxima de iones de metales pesados en el agua debe estar en un rango de 0,01 – 1,00 ppm, sin embargo, en la actualidad se reportan concentraciones hasta de 450 ppm, estos metales no se degradan fácilmente y son solubles en el agua, por lo cual, pueden ser fácilmente absorbidos por los seres vivos, bioacumulándose en estos, y con tendencia a biomagnificarse a lo largo de la cadena alimentaria, representando una amenaza significativa para la salud humana (Tripathi & Rawat, 2015).

Colombia no es ajena a esta problemática, en las industrias metalúrgicas y petroleras se ha identificado que sus efluentes sobrepasan los niveles máximos permitidos de metales en solución, algo similar ocurre en las industrias de las curtiembres, ya que la mayoría hacen vertimientos de sus efluentes contaminados especialmente con cromo, sin ningún tipo de tratamiento (Quiñones, 2014).

Los métodos convencionales para tratar estas aguas pueden ser biológicos (biorremediación) o físicoquímicos (precipitación química, oxidación química, ósmosis inversa, fotocatalisis, etc.). Sin embargo, los procesos biológicos pueden ser poco adecuados, debido a la posible propagación de los contaminantes en niveles tróficos sucesivos (Carriazo, 2005); la mayoría de procesos físicoquímicos, presentan desventajas por su alto costo, baja eficiencia y generación de subproductos contaminados (Kovo, 2015).

La adsorción es un método físicoquímico alternativo, que ha demostrado tener una alta eficiencia, simplicidad de diseño y no genera residuos. El carbón activado es uno de los materiales más utilizados por ser un adsorbente efectivo en la remoción de la mayoría de los contaminantes, pero su precio relativamente alto y los problemas con su regeneración han obstaculizado su uso a gran escala (Wang, 2005). Por esta razón, en los últimos años se ha venido estudiando el uso de nuevos adsorbentes, como es el caso de los materiales cerámicos que se preparan con arcillas abundantes en la tierra y materiales orgánicos preparados con residuos orgánicos, los cuales están siendo ampliamente explorados por sus capacidades de adsorción, su selectividad y su bajo costo. (Yang H. B., 2019)

De acuerdo con esto, el presente trabajo busca investigar e identificar posibles composites cerámicos que se puedan preparar con materiales de desecho disponibles localmente, para ser usados como adsorbentes en la remoción de metales de aguas residuales de origen industrial.

1. Marco teórico

1.1. Agua

El agua es de gran importancia para la vida de todos los seres vivos e indispensable para el ser humano, ya que le permite realizar una serie de usos que le proporcionan un mayor bienestar, desde la salud y la alimentación, hasta el desarrollo de actividades industriales y recreativas (Muñoz A. , 2008). Posee excepcionales propiedades debido a su composición y estructura, es una molécula sencilla formada dos átomos de hidrogeno y uno de oxígeno, unidos por enlaces covalentes muy fuertes que hacen que sea muy estable y su geometría angular la hace una molécula polar que puede unirse a muchas otras sustancias polares (Carbajal & Gonzales, Capítulo 3. Propiedades y funciones biológicas del agua, 2012)

El agua cubre aproximadamente dos tercios de la superficie terrestre. Se calcula que el 97,5% del agua es salada, la cual se encuentra en los océanos y mares, lo cual la hace inservible para el consumo humano y para la mayoría de los usos industriales; y menos del 3% es agua dulce. De este 3%, alrededor del 2,5% se encuentra congelada y bloqueada en glaciares o como nieve permanente. Por lo tanto, la humanidad depende de menos del 0.5% de esta agua para todas sus necesidades (Blanco, 2017).

1.2. Contaminación del agua

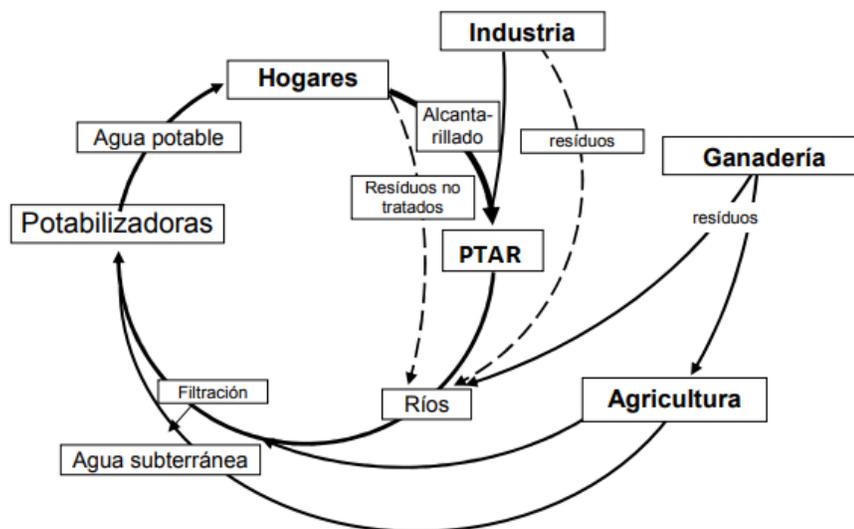
La contaminación del agua es un problema que aumenta cada vez más y las principales causas, son los vertimientos incontrolados de las aguas residuales urbanas e industriales, muchas

veces sin tratamiento, así como las prácticas agrícolas deficientes. Otras causas que contribuyen a esta contaminación es la contaminación atmosférica, la acumulación de sustancias químicas en suelos y sedimentos, el exceso de bombeo de aguas subterráneas, la minería y la destrucción de zonas pantanosas (Fernández, 2012).

Los cuerpos de agua siempre han sido receptores directos o indirectos, de los vertimientos que el hombre ha generado debido a su propia actividad; al principio eran capaces de asimilar las cargas contaminantes que recibían, sin embargo, con el pasar de los años y el crecimiento acelerado de la población, estos vertimientos han incrementado notablemente, lo que ha generado que estos cuerpos de agua estén perdiendo su capacidad auto depuradora y se estén produciendo graves alteraciones en la calidad de estas agua (Hermógenes, 2001)

En la figura 1 se puede observar como ocurre la contaminación del agua a través de la aparición de elementos contaminantes y la variación en sus concentraciones (Barcerlo & López, s.f.)

Figura 1. Ciclo de la contaminación del agua



Fuente: (Barcerlo & López, s.f.)

De acuerdo con este ciclo, las principales vías de entrada de contaminantes al agua corresponden a las aguas residuales urbanas, industriales y agropecuarios y los efectos que esta contaminación produce en el medio ambiente son variados, algunos de ellos son (Barcerlo & López, s.f.):

- Acción tóxica y cancerígena en los seres vivos
- Incidencia sobre la producción de alimentos
- Limitaciones para usar el agua con fines recreativos
- Reducción de las posibilidades de su uso industrial y agropecuario.

1.3. Aguas Residuales

Las aguas residuales son aquellas que después de ser utilizadas o manipuladas por el hombre, representa un peligro y deben ser desechadas, porque contienen gran cantidad de contaminantes. Los principales inconvenientes de estas aguas son los siguientes (Espigares & Pérez, s.f.):

- **Malos olores y sabores.** Se producen por las diferentes sustancias que se encuentran en estas aguas y en especial por los productos de descomposición de estas. También se producen por causas naturales como la proliferación de microorganismos, los procesos de descomposición, la presencia de vegetación acuática, hongos, etc.
- **Acción Tóxica.** Es el efecto que tienen estas aguas sobre los seres vivos que habitan en los cuerpos hídricos y sobre los consumidores que utilizan estas aguas, o también se pueden ver afectados por la acumulación de estas sustancias tóxicas en la cadena alimentaria. Los efectos tóxicos pueden ser:

- **Letales.** Causan muerte por envenenamiento directo.
 - **Subletales.** Por debajo de los niveles que causan la muerte, pero pueden afectar la actividad de los seres vivos.
 - **Agudos.** Causan un efecto letal o subletal en un corto periodo de tiempo.
 - **Crónicos.** Causan un efecto letal o subletal durante un periodo tiempo prologando.
 - **Acumulativos.** Se incrementa el efecto con dosis sucesivas.
- **Vehículo de infección.** Las aguas residuales pueden intervenir en la propagación de enfermedades, difundiendo agentes infecciosos procedentes de excretas de organismos enfermos o portadores, que pueden llegar al agua de consumo o al agua de riego.
 - **Acción sobre el entorno.** Las aguas residuales vertidas en cuerpos de agua, produce contaminación psicosocial, la cual afecta el entorno natural del hombre, modificando la estética del paisaje.
 - **Eutrofización.** El vertimiento de aguas residuales con altos contenidos de fosforo y nitrógeno, estimulan el crecimiento desmedido de microflora que puede causar problemas alterando las propiedades organolépticas del ecosistema.
 - **Contaminación de aguas subterráneas.** Se produce por la infiltración de las aguas residuales en terrenos que son permeables.

1.3.1. Aguas Residuales Industriales.

Son aquellas que proceden de cualquier fabrica o establecimiento industrial, que utilice agua en alguno de sus procesos. Son muy variables en cuanto a su composición y tienen un grado

Motores de vehículos		X	X	X				X
Municiones y explosivos			X	X			X	
Papeleras			X	X		X	X	X
Pigmentos, tintas, pinturas		X	X	X		X	X	X
Plásticos		X		X				X
Química, petroquímica	X	X	X	X	X	X	X	X
Textil			X	X				X
Vitrocerámica		X				X	X	
Alimentos y bebidas		X	X	X		X		X

La toxicidad de los metales pesados depende de su movilidad en el medio, que, a su vez, depende de su especiación química, persistencia y tendencia de biomagnificación o bioacumulación. La biomagnificación se entiende como la tendencia de algunos metales a acumularse a lo largo de la cadena trófica, exhibiendo concentraciones sucesivamente crecientes al ascender en el nivel trófico, por ejemplo, en un red alimentaria marina, el zooplancton tendrá la menor concentración de mercurio que los peces; mientras que la bioacumulación se entiende como la acumulación neta con el paso del tiempo de metales persistentes en un organismo a partir de fuentes tanto abióticas como el suelo, aire y agua, como fuentes bióticas, un ejemplo es la bioacumulación del cadmio en cangrejos que habitan en cuerpos de agua contaminados con este metal (Izquierdo, 2010).

En la siguiente tabla se muestran los síntomas típicos de intoxicación que presentan estos metales y los niveles de concentración máximos permitidos (NMCP) en el agua, establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y por la legislación colombiana a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) (Caviedes et al., 2015)

Tabla 2. Síntomas de intoxicación típicos y niveles de concentración máximos permitidos

Metal pesado	Toxicidad	NMCP (mg/L)	
		USEPA	MADS
As	Manifestaciones cutáneas, cánceres viscerales, enfermedad cardiovascular	0,05	0,1 - 0,5
Cd	Daño renal, trastorno renal y efectos carcinógenos	0,01	0,1
Cu	Daños hepáticos, enfermedad de Wilson, insomnio	0,25	1
Cr	Dolor de cabeza, diarrea, náuseas, vómito, carcinógeno	0,05	0,5
Hg	Artritis reumatoidea y enfermedades renales, vasculares y neuronales	0,00003	0,02
Ni	Dermatitis, náuseas, asma crónica, tos, carcinógeno	0,2	0,5
Pb	Teratogenicidad cerebral, enfermedades renales, vasculares y neuronales	0,006	0,2 - 0,5
Zn	Depresión, letargo, signos neurológicos y aumento de la sed	0,8	3

1.4.1. Tratamientos para remoción de metales en aguas residuales industriales.

Los tratamientos que se le realicen a estas aguas deben garantizar la remoción del metal en el grado requerido por la legislación que regula el vertimiento o garantizar las condiciones mínimas del proceso en el caso de reusó. Algunos de estos tratamientos son:

- **Precipitación química.** Es la separación de iones metálicos de una disolución como consecuencia de la disminución de la solubilidad de los metales con el incremento del pH. Consiste en formar el hidróxido metálico correspondiente mediante el ajuste del pH a través de la adición de compuesto básicos como hidróxido de sodio o de calcio. Este tratamiento es el más utilizado para la eliminación de metales disueltos en las aguas residuales debido a que su facilidad de aplicación ya que no requiere de un equipo sofisticado ni personal cualificado, sin embargo, como producto se obtiene un fango con elevadas concentraciones del metal que

se debe gestionar adecuadamente, lo cual puede aumentar los costos del tratamiento, y adicionalmente la presencia de ciertos compuestos en el agua residual puede producir interferencias que disminuyen la eficacia de la precipitación (Izquierdo, 2010).

- **Procesos de oxido-reducción.** Consisten en la adición de un compuesto que actúa como agente oxidante o reductor, produciendo un cambio como consecuencia de la transferencia electrónica entre el compuesto añadido y los metales presentes en el agua residual. Sin embargo, presentan altos costo de operación, necesitan de mano de obra calificada y pueden formar subproductos indeseables (Izquierdo, 2010).
- **Intercambio iónico.** Consiste en reemplazar los metales presentes en el agua residual con los iones presentes en el material de intercambio, este material se conoce como resina de intercambio iónico y pueden estar compuestas por una gran variedad de materiales en función de los metales que se desean eliminar. Este tratamiento permite eliminar de las aguas residuales metales presentes en elevadas concentraciones, sin embargo, los costos de operación son elevados debido al costo de la resina y su regeneración (Izquierdo, 2010).
- **Fitorremediación.** Es un conjunto de tecnologías que reduce in situ o ex situ, la concentración de diversos compuestos a partir de procesos bioquímicos realizados por plantas y microorganismos asociados a ellas. Estas plantas pueden remover, reducir, transformar, mineralizar, degradar, volatilizar o estabilizar los metales presentes en las aguas residuales. Las principales ventajas de este tratamiento es que su bajo costo, no requiere de personal calificado, no consume energía y no necesita transportar el agua contaminada, con lo cual se disminuye la diseminación de estos contaminantes, sin embargo, puede llegar a ser un tratamiento lento, se aplica generalmente en ambientes con bajas concentraciones de contaminantes, algunos contaminantes pueden ser liberados nuevamente al ambiente debido

a la fitovolatilización que se puede dar en las plantas de las hojas, también se requieren áreas relativamente grandes y puede favorecer la diseminación de plagas (Delgadillo, et al., 2011).

Como se puede ver, estas opciones de tratamiento tienen varias desventajas, lo cual ha llevado en los últimos años a buscar nuevas alternativas de tratamiento, donde se ha encontrado que la adsorción puede ser superior a otras técnicas para la remoción de metales en términos de costo, flexibilidad y simplicidad de diseño, facilidad de operación, insensibilidad a los contaminantes tóxicos y no genera la formación de sustancias nocivas. La mayoría de estos tratamientos se ha centrado en el uso de carbón activado como absorbente debido a sus excelentes propiedades de adsorción, sin embargo, es relativamente costoso, por lo que existe una demanda creciente de utilizar adsorbentes alternativos de bajo costo (Kovo, 2015).

1.5. Adsorción de metales pesados.

La adsorción es un proceso de separación por medio del cual los metales del agua residual se unen a las superficies exteriores e interiores de un material sólido llamado absorbente. Esta separación se basa en la adsorción selectiva de los metales por un adsorbente, debido a interacciones específicas entre la superficie del adsorbente y los metales adsorbidos. Este proceso es una manifestación de interacciones entre los tres componentes involucrados, el adsorbente, el adsorbato (metales) y las aguas residuales. La figura 2 muestra un modelo esquemático para los tres componentes y sus interacciones, la afinidad entre el adsorbente y el adsorbato es la principal fuerza de interacción que controla la adsorción, sin embargo, las afinidades entre el adsorbato y el agua, el adsorbente y el agua, y los metales presentes en el agua, también pueden desempeñar un

papel importante en la adsorción, por lo tanto, la capacidad de adsorción puede depender de las fuerzas de interacción entre estos tres componentes (Crini, et. al., 2018)

Figura 2. Esquema de las relaciones entre los tres componentes de un sistema de adsorción



Fuente: (Crini, et. al., 2018)

En este proceso se pueden distinguir tres clases de adsorción según el tipo de atracción que se dé entre el adsorbato y el adsorbente.

- **Adsorción de tipo eléctrico.** Ocurre cuando la adsorción se da por un intercambio iónico donde, los iones del metal se concentran en una superficie del adsorbente como resultado de la atracción electrostática entre ambos (Tejada, Villabona, & Garces, Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico, 2015).
- **Adsorción física o fisorción.** Ocurre cuando el metal adsorbido no está fijo en un lugar específico de la superficie del adsorbato, sino se encuentra libre de trasladarse dentro de la interfase, debido a las fuerzas de Van der Waals. En este caso el metal adsorbido conserva su naturaleza química (Tejada, Villabona, & Garces, Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico, 2015).

- **Adsorción química o quimisorción.** Ocurre cuando el metal forma unos enlaces fuertes localizados en los centros activos del adsorbente. En este caso el metal adsorbido sufre una transformación dando lugar a una especie distinta (Tejada, Villabona, & Garces, Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico, 2015).

1.5.1. Factores que afectan la adsorción de metales pesados.

La adsorción se puede ver afectada de manera positiva o negativa, por ciertos factores que pueden aumentar o disminuir la captación de los metales pesados.

- **Tipo de material adsorbente.** La composición y reactividad química de la superficie del adsorbente determina los mecanismos de retención de los metales. La caracterización de los centros activos del adsorbente para conocer los grupos funcionales presentes e identificar los mecanismos de interacción, facilitan la optimización de las condiciones de operación y la mejora del rendimiento. Para esta identificación, normalmente se utilizan las técnicas de espectroscopia infrarroja de transformada de Fourier (IRTF) y difracción de rayos X (DRX) (Izquierdo, 2010).
- **Tamaño de partícula del adsorbente.** Este tamaño afecta tanto la capacidad de absorción como la velocidad de reacción. Al disminuir el tamaño de la partícula del adsorbente aumenta la capacidad de retención del metal, ya que va a haber un mayor número de centros activos disponibles para la reacción y una mayor la facilidad para que el metal pueda acceder a ellos, con una menor limitación a la difusión al interior de los poros (Izquierdo, 2010).
- **Tipo de metal.** Las propiedades física y químicas del metal condicionan su comportamiento en el agua residual, lo que da una interacción específica con la superficie del adsorbente, por lo tanto, la capacidad de adsorción del adsorbente depende del tipo de metal. Esto

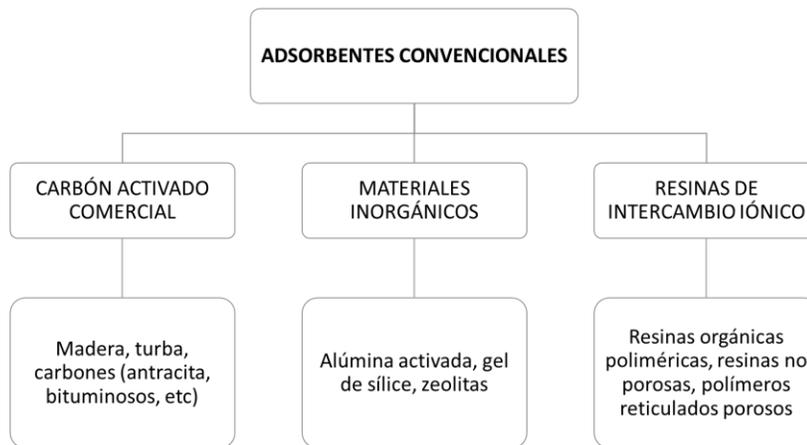
se puede relacionar con la diferencia de afinidad de algunos adsorbentes por ciertos metales con la electronegatividad del metal (Izquierdo, 2010).

- **pH del agua residual.** El valor del pH es uno de los factores que más influyen en la adsorción de metales pesados, ya que este determina no solo la especiación de la superficie del adsorbente, por la protonación de los grupos funcionales, sino que también determina la química de disolución del metal, lo cual afectara la disponibilidad de este para la adsorción. Se ha observado que un aumento del pH aumenta la capacidad de adsorción (Izquierdo, 2010).
- **Presencia de otros metales pesados en el agua residual.** La capacidad de adsorción puede verse afectada por la presencia de otros metales, dependiendo de la afinidad entre las especies iónicas del agua y los centros activos del adsorbente. Esta afinidad puede ocasionar la aparición de efectos competitivos entre los metales y como consecuencia puede haber una variación en la capacidad de retención de los metales (Izquierdo, 2010).
- **Presencia de agentes complejantes.** La presencia de estos agentes en las aguas residuales puede modificar la especiación de los metales presentes, afectando notablemente el proceso de adsorción (Izquierdo, 2010).
- **Tiempo de contacto.** Es importante establecer el tiempo de contacto adecuado, el cual permita que se alcance la concentración de equilibrio (Izquierdo, 2010).
- **Temperatura.** La temperatura influye en la velocidad de adsorción y en el grado en que la adsorción se produce. Hay que tener cuidado con esta temperatura, ya que un elevado aumento puede causar un cambio en la textura del adsorbente y un deterioro en su estructura que genera una pérdida de la capacidad de adsorción (Tejada, Villabona, & Garces, Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico, 2015).

1.5.2. Clasificación de los adsorbentes

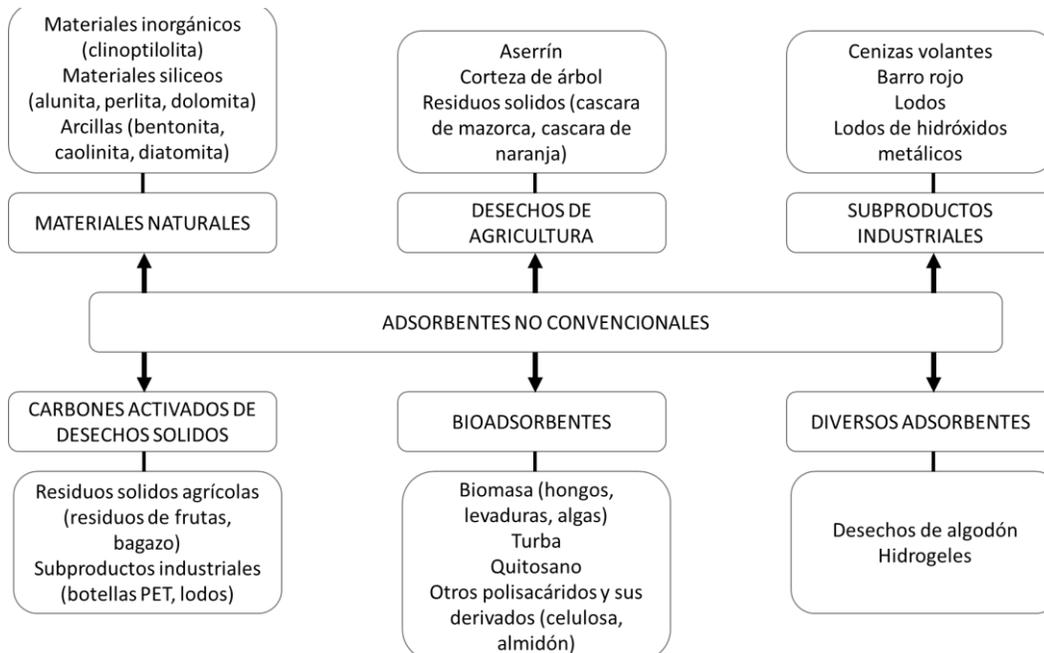
Los materiales sólidos utilizados como adsorbentes pueden adoptar una amplia gama de formas químicas y diferentes estructuras geométricas de superficie. Estos materiales se pueden clasificar en adsorbentes convencionales y no convencionales (Crini, et. al., 2018).

Figura 3. Adsorbente convencionales



Fuente: (Crini, et. al., 2018)

Figura 4. Adsorbentes no convencionales



Fuente: (Crini, et. al., 2018)

1.5.3. Técnicas analíticas para caracterizar un adsorbente.

Estas técnicas proporcionan información no solamente sobre la caracterización del adsorbente, sino también sobre la adsorción del metal y su desempeño.

Tabla 3. Técnicas analíticas utilizadas en la investigación sobre el proceso de adsorción

CARACTERIZACIÓN	DESCRIPCIÓN	TÉCNICA ANALÍTICA
Del adsorbente	Composición y distribución elemental	Análisis de elementos, espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS)
	Área de superficie, porosidad (tamaño de poro, distribución del tamaño de poro)	Adsorción de nitrógeno (mediciones BET)
	Estructura cristalográfica	Difracción de rayos X (XRD)
	Morfología (superficial, interna)	Microscopia electrónica de superficie (SEM), microscopia electrónica de transmisión (TEM)
	Estructura química	Espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN) de estado sólido, espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS), espectroscopia de absorción de rayos X (XAS)
	Capacidad de intercambio iónico	Titulación
	Superficie (hidrofilicidad, hidrofobicidad)	Mediciones de ángulo de contacto
	Determinación de sitios activos	Prueba (hipo) osmótica, hinchazón mecánica pura
Estabilidad del material	Análisis termogravimétrico (TGA), calorimetría	
Del Adsorbato en solución	Determinación de la concentración de contaminantes	Espectroscopia de absorción atómica (AAS), plasma acoplado inductivamente (ICP), espectroscopia UV-VIS, espectroscopia de fluorescencia

	Separación e identificación de los componentes existentes en el agua	Espectroscopia de masas de cromatografía líquida (LC-MS)
Mecanismo de adsorción	Caracterización química del contaminante unido al adsorbente	EDS, RMN, FT-IR, Composición química, XRD
	Determinación del estado de oxidación del contaminante	XPS, XAS

Fuente: Fuente: (Crini, et. al., 2018)

1.6. Materiales compuestos (COMPOSITES).

Un Material compuesto o composite es la combinación de dos o más materiales diferentes para obtener propiedades superiores a las que presentan de forma individual. Estos materiales presentan dos componentes; una matriz y un refuerzo. La matriz es la fase continua en la que el refuerzo se encuentra inmerso y sus principales funciones son definir las propiedades físicas y químicas del material y proteger al refuerzo y brindarle cohesión. El material de refuerzo es la fase discontinua o dispersa que se agrega a la matriz para conferir al material alguna propiedad que la matriz no posee (Stupenengo, 2011).

1.6.1. *Compuestos a base de matriz cerámica*

Estos compuestos combinan las principales características del material cerámico, como la dureza y rigidez, resistencia a la compresión, al desgaste y a la corrosión, y la estabilidad química, con las propiedades de las fibras que constituyen la fase de refuerzo para compensar aspectos como la fragilidad, propiedades mecánicas de baja representación en los materiales cerámicos puros, ya que se sabe que los materiales cerámicos son frágiles y necesitan de un refuerzo que le añada dureza, en este caso, las fibras actúan como puentes sobre las grietas que se generan,

proporcionando una fuerza de compresión y absorbiendo parte de la energía de propagación de las aberturas alrededor de la matriz (Lopez, Vega, Rendon, & Tobon, 2019). Estos materiales se pueden fabricar en varias formas y se preparan generalmente con minerales arcillosos abundantes en la tierra como matriz y desechos orgánicos como refuerzo (Yang H. B., 2019).

2. Contexto Nacional

2.1. Contaminación de las fuentes Hídricas en Colombia con metales pesados.

Aunque Colombia cuenta con numerosos recursos hídricos, estos se han manejado de forma inadecuada, lo cual ha generado el deterioro de la calidad del agua, reduciendo su disponibilidad y limitando sus usos. Diariamente se vierten al medio ambiente cerca de 4.500.000 de m³ de aguas residuales (Orduz & Tatiana, 2016). La contaminación por aguas residuales industriales se concentra en corredores localizados en las zonas de Bogotá-Soacha, Medellín-Valle de Aburrá, Cali-Yumbo, Cartagena-Mamonal, Barranquilla-Soledad, Cuenca del río Nare, Pereira-Santa Rosa, Manizales-La Enea, Barrancabermeja, Valle del Sogamoso, Ibagué, Armenia, Santa Marta y Cúcuta, y estas aguas contiene grandes cantidades de elementos peligrosos como metales pesados y compuestos orgánicos volátiles, los cuales acaban con la vida acuática y ponen en peligro la salud del hombre que entra en contacto con estas aguas (Ojeda, s.f.)

La industria química descarga en los cuerpos de agua marítima y continental, compuestos orgánicos volátiles y metales pesados (mercurio y cadmio, entre otros). La industria de curtiembres vierte a los ríos metales pesados altamente tóxicos como el cromo. Algunos residuos peligrosos se depositan en el lodo de los lechos de los ríos y continúan contribuyendo a mantener altas concentraciones de tóxicos en solución en los cuerpos de agua. En algunas ocasiones las concentraciones de estos metales pesados encontrados en los lodos son muy elevadas, como en el caso del río Bogotá, donde se han encontrado concentraciones de cromo de 220 mg/kg en el lodo, o de plomo en el orden de 140 mg/kg (Comisión Reguladora de agua; Departamento Nacional de

Planeación Financiera de Desarrollo Territorial; Ministerio de desarrollo económico; Ministerio de Medio Ambiente, 1997).

2.2. Valores límites máximos permisibles de metales en las aguas residuales industriales.

Toda empresa o industria que en el desarrollo de sus actividades genere aguas residuales, debe conocer los valores límites máximos permisibles de los contaminantes presentes en sus aguas, y de esta forma, realizar los ajustes necesarios en sus procesos para dar cumplimiento a estos parámetros y evitar sanciones por parte de las autoridades ambientales. La norma encargada de fijar estos parámetros en Colombia es la Resolución 0631 del 2015 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), dentro de la cual se controlan los vertimientos generados por 73 actividades productivas presentes en 8 sectores económicos, y se incluyen los valores para los siguientes metales: Arsénico, Bario, Cadmio, Zinc, Cobre, Cromo, Hierro, Mercurio, Níquel, Plata, Plomo, Selenio y Vanadio (MADS, 2015).

2.3. Materiales de desecho de fácil obtención en Colombia

Para la elaboración de composites cerámicos se analizará la disponibilidad en Colombia de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) para usarlos como la matriz de los compuestos y diferentes desechos forestales y agroindustriales como material de refuerzo.

2.3.1. Lodos generados en PTAP

Estos lodos se pueden definir como los sólidos producidos en el tratamiento de potabilización del agua mediante procesos de coagulación-floculación seguido de la sedimentación, utilizando agentes químicos como el sulfato de aluminio o policloruro de aluminio como agentes coagulantes. Estos lodos estarán compuestos por las impurezas removidas y precipitadas del agua, así como por los residuos del coagulante utilizado. La cantidad de estos lodos dependerá del agua a tratar y del coagulante que se utilice (Espejel, 2007) y generalmente presentan altos contenidos minerales naturales como óxidos de aluminio, silicio, hierro, magnesio, entre otros, por lo tanto, se pueden considerar como una mezcla arcillosa natural (Barón, Montaña, & Gonzalez, 2018).

De acuerdo con el estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado, para el año 2018 Colombia contaba con 844 plantas de tratamiento de agua potable, no obstante, se encontraban registrados 1254 prestadores del servicio de acueducto, los cuales inscribieron la actividad de tratamiento, pero no todos realizaron el reporte de la infraestructura que operan, por lo tanto, en el país hay al menos 1499 plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) de diferentes capacidades (Castillo, Rojas, Puerto, Villalba, & Cordoba, 2019). Los lodos que generan las PTAP representan del 0,3% al 1,0% del volumen del agua tratada y en algunos casos puede llegar a ser el 10,0% (Martinez, 2012), para el año 2018 el volumen de agua tratada en Colombia por las PTAP fue de 2639 m³ según el reporte que hicieron algunos prestadores del servicio de acueducto, por lo tanto, el volumen de lodos mínimo que se generó fue de 790 m³ aproximadamente (Castillo, Rojas, Puerto, Villalba, & Cordoba, 2019).

En Colombia, el tratamiento de estos lodos presenta un inconveniente principal, el cual es la poca información que existe para guiar a las empresas prestadoras del servicio de acueducto, en

el manejo de estos residuos y los altos costos para tratarlos, por lo que, actualmente estos lodos son dispuestos sin ningún tratamiento en represas, terrenos baldíos o en los mismos cuerpos de agua, ocasionando serios problemas ambientales (Rodríguez, 2013). Por lo tanto, la gestión, tratamiento y disposición de estos lodos no solo conlleva un beneficio ambiental, sino también conlleva beneficios administrativos y económicos, algunas de las alternativas para la disposición de estos lodos son (Espejel, 2007):

- Reutilización como mejoradores o acondicionadores de suelos agrícolas.
- Reutilización para la fabricación de materiales cerámicos de construcción como cemento y ladrillos.
- Reutilización como agentes floculantes en el tratamiento de aguas residuales, para aprovechar su alto contenido de aluminio.
- Reutilización para la producción de granulado cerámico mediante procesos de secado.
- Reutilización para la fabricación de materiales adsorbentes o bases de soporte para catalizadores, debido a su alto contenido de alúmina.

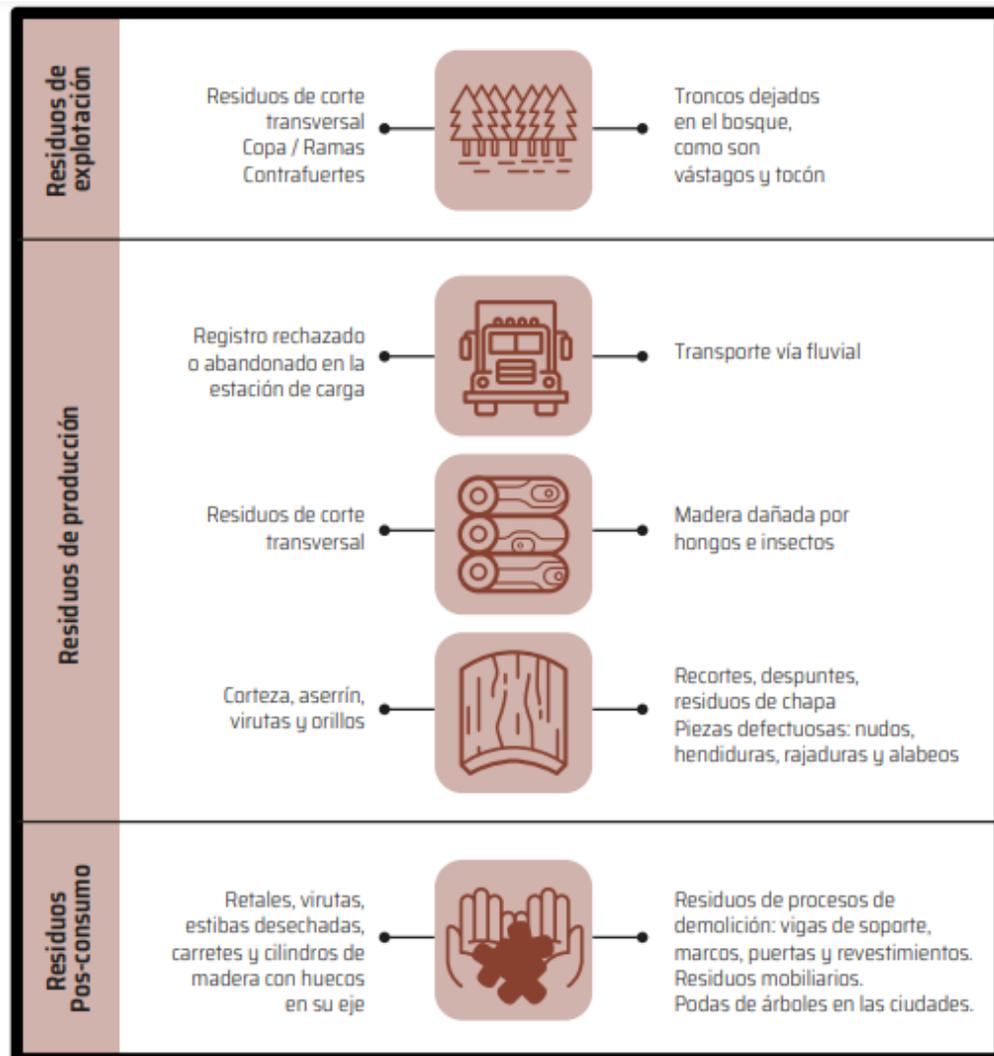
Las ventajas que traen estas alternativas son (Espejel, 2007):

- Valorización de los lodos generados en las PTAP, al ser incluidos como materia prima en procesos industriales.
- Reducción de espacios destinados al almacenamiento de estos lodos, así como un ahorro en el manejo y transporte de los mismos.
- Preservación de espacios destinados a relleno de lodos.
- Obtención de productos con importante valor agregado.

2.3.2. *Residuos forestales*

Colombia cuenta con más de 60 millones de hectáreas de bosques naturales, por lo cual, se considera un país potencialmente forestal, y actualmente uno de los desafíos primordiales de la cadena forestal es minimizar los residuos de madera que se generan en los diferentes procesos de transformación, desde el momento del aprovechamiento de la madera se generan residuos como el follaje, entresacas, ramas y partes de la corteza, los cuales quedan localizados en las zonas de extracción, sin embargo, la mayor proporción de residuos se generan en la etapa de procesamiento o transformación de la madera para la generación de productos. En la siguiente figura se pueden observar los residuos generados en los diferentes procesos de la cadena de valor de la madera (Lopez, Vega, Rendon, & Tobon, 2019).

Figura 5. Residuos generados por la cadena de valor de la madera



Fuente: (Lopez, Vega, Rendon, & Tobon, 2019).

Según la Superintendencia de sociedades, en el año 2013 había 1867 empresas registradas para la transformación de la madera y fabricación de productos, las cuales produjeron aproximadamente 6,7 millones de m³/año de residuos, de los cuales se estima que alrededor de 4,4 millones de m³/año se recuperaron por las industrias de tablero o papel. Los residuos que no son recuperados para otras actividades productivas, representan un problema productivo, ambiental y económico, debido a su lenta degradación natural, coste de transporte y disposición, reducción del

espacio disponible en los centros de elaboración de madera y riesgos ambientales por incendios y autocombustión o propagación de plagas y enfermedades, por estas razones, es importante estudiar la capacidad de aprovechamiento de estos residuos en diversas aplicaciones industriales, buscando darles un valor agregado, ya sea para el autoaprovechamiento en el proceso productivo de la madera o en la elaboración de otros productos como compost, madera plástica, biocombustibles, adsorbentes, etc. (Lopez, Vega, Rendon, & Tobon, 2019).

El aserrín presenta la capacidad de remover contaminantes de las aguas debido a la presencia de la lignina de su pared celular, la lignina contiene grupos funcionales polares como alcoholes, aldehídos, fenoles, entre otros, los cuales pueden formar complejos con los iones metálicos, permitiendo el proceso de adsorción. Por lo tanto, este desecho se considera el material lignocelulósico más prometedor por su bajo costo, su gran capacidad de adsorción y facilidad de adquisición (Lopez, Vega, Rendon, & Tobon, 2019).

2.3.3. Residuos agroindustriales.

La agroindustria, es la actividad que combina la producción agrícola con la industria para desarrollar productos alimenticios o materias primas que son destinadas a la producción. En Colombia, el procesamiento de productos como el café, la palma de aceite, la caña de azúcar y panelera, maíz, arroz, banano y plátano genera una producción de 14974807 toneladas al año, dejando una cantidad de residuos aproximadamente de 71943813 toneladas al año, los cuales generalmente son incinerados o llevados a rellenos sanitarios. Las centrales de abasto y la agroindustria, en la etapa de procesamiento, generan una gran cantidad de residuos que presentan

un impacto relevante en el ambiente por su alto contenido de materia orgánica (Peñaranda, Montenegro, & Giraldo, 2017).

Estos residuos pueden utilizarse como adsorbentes, ya que son materiales lignocelulósicos, que permiten la interacción de los metales con los grupos funcionales que se encuentran en la superficie de estos residuos, como carboxilos, hidroxilos, fosfatos, etc. A continuación, se describen importantes fuentes de residuos agroindustriales en Colombia.

- **Residuos de café.** El café es considerado uno de los productos más importantes a nivel mundial. Colombia, es el segundo productor mundial de café, siendo este el cultivo nacional más relevante en el sector agrícola con un área sembrada de 948000 hectáreas. En la producción como bebida solo el 9.5% del peso del fruto es utilizado para su elaboración, quedando un 90,5% de residuos como las hojas, ramas y tallos, frutos no adecuados para la producción, la pulpa del fruto y la borra que es producto de la preparación de café a partir del café tostado y molido. Se estima que, para una producción de 942327 toneladas al año de café, se producen 4691248 toneladas al año de residuos de pulpa, cisco y tallos, los cuales no son aprovechados en su totalidad (Peñaranda & Montenegro, 2017).
- **Residuos del cacao.** El cultivo de cacao está siendo de gran interés en el país dado su potencial para sustituir cultivos ilícitos en el marco del posconflicto, para el año 2016 se produjeron 56785 toneladas de cacao, y se espera que el crecimiento de la producción siga en aumento, gracias al impulso de iniciativas como el proyecto entre Colfuturo y la Embajada Americana, que está invirtiendo 5 millones de dólares, para el mejoramiento de este cultivo. En la actualidad, cerca de 351 municipios son productores y como residuo obtienen la cascarilla de cacao con un promedio de 6814 toneladas al año (Barrera & Esquivel, 2018).

- **Residuos de la producción de arroz.** Se estima que, para una producción de 2463689 toneladas al año de arroz, se generan alrededor de 6282437 toneladas al año de residuos del tamo y la cascarilla de arroz (Peñaranda & Montenegro, 2017).
- **Residuos del procesamiento de la caña de azúcar.** La industria azucarera es una de las más representativas en Colombia con 15 ingenios, los cuales siembran alrededor de 230070 hectáreas de caña de azúcar con una producción de 169,37 toneladas por hectárea de caña. Durante la cosecha se generan residuos de hojas verdes, hojas secas, cogollo y caña remanente, los cuales representan el 25% de la caña limpia, estos residuos son dejados en el campo y quemados posteriormente, generando problemas ambientales y perdiéndose el potencial energético y económico que pueden tener estos residuos (Peñaranda & Montenegro, 2017).
- **Residuos de cítricos.** La generación de estos residuos se da principalmente en la producción de zumos. El cítrico más producido nacionalmente es la naranja con una producción de 228128 toneladas al año, seguido de las mandarinas con 109768 toneladas al año y se estima que el 40% de estas producciones es utilizado para la extracción de menos de la mitad del peso del fruto como zumo, quedando como residuos la piel o cascara, las semillas y la pulpa (Peñaranda & Montenegro, 2017).

3. Revisión Bibliográfica

Esta revisión se centró en las investigaciones relacionadas con adsorbentes preparados a partir de materiales de desecho de fácil obtención de Colombia para la remoción de metales pesados en aguas residuales industriales.

3.1. Lodos de PTAD como adsorbentes para la remoción de metales pesados y filtros cerámicos para el tratamiento de aguas residuales.

Siswoyo E. Mihara Y. y Tanaka S., estudiaron el proceso de adsorción del Cd en un adsorbente a base de lodos de plantas de tratamiento de agua potable. Estos lodos tienen un componente principal similar al caolín, un mineral de arcilla blanca, es decir, O, Al, Si y C. El tratamiento que se les hizo fue lavarlos con agua destilada y se secaron a 100 °C durante 24 horas, después de enfriarlos se trituraron y pasaron por un tamiz de 1 mm para obtener un polvo. La capacidad de adsorción del Cd aumento con el aumento de la dosis del polvo y gradualmente se volvió constante sobre 10 g/L de adsorbente, esto puede deberse a que con el aumento de masa de adsorbente hay una mayor disponibilidad de los sitios de unión o de superficie que interactúan con el Cd, la capacidad máxima de adsorción de Cd fue de 9,2 mg/g (Siswoyo, Mihara, & Tanaka, 2014).

Abo-El-Enein S.A., Shebl A. y El-Dahab A., estudiaron los lodos de tratamiento de agua potable como adsorbentes de Pb, Cd y Ni de aguas residuales. Estos lodos se secaron a 110 °C por 48 horas, luego se trituraron para obtener un polvo, este polvo se quemó a diferentes temperaturas de 100, 400, 500, 600 y 700 °C durante 2 horas. En este estudio se realizaron diferentes

experimentos variando los parámetros de temperatura de cocción de los lodos, el tiempo de contacto con la solución, el pH de la solución y la concentración inicial de los iones metálicos, dando como resultado que la eficiencia de adsorción del Pb es extremadamente alta, con un porcentaje de remoción de 99,9%, por lo cual, se recomienda el uso de estos lodos como adsorbente específico para iones de Pb (Abo-El-Enein, Shebl, & Abo-El-Dahab, 2017).

Ghorpade A. y Ahammed M., evaluaron la idoneidad de los lodos de tratamiento de agua potable a base de aluminio para la remoción de Pb, Cu, Cr y Zn de aguas residuales de una empresa de galvanoplastia. Estos lodos se trataron al igual que hizo Abo-El-Enein S.A., Shebl A. y El-Dahab A. y se les realizaron diferentes experimentos variando los parámetros de pH de la solución y la dosis del adsorbente, obteniendo una eliminación completa del Pb, incluso con dosis bajas de adsorbente y para el Cu y Cr el porcentaje de remoción se encontraba entre el 78 y 92% (A. & Ahammed, 2018).

Ahsaine H., Zbair M. y Haouti R., estudiaron un adsorbente de bajo costo basado en lodos de depuradoras sobre la adsorción de Cd. Estos lodos se mezclaron con agua destilada a una relación de 1:5 y el pH se ajustó a 3 usando H_2SO_4 y se agitó por 12 horas, pasado este tiempo se filtró el lodo y se lavó varias veces con agua destilada y etanol, finalmente el sólido filtrado se calentó a $300^\circ C$ por 4 horas, este tratamiento de activación permitió que los lodos tuvieran una mayor superficie. Los resultados mostraron que estos lodos presentan una alta absorción de Cd con una capacidad máxima de absorción de 56,2 mg/g (Ahsaine, Zbair, & Haouti, 2017).

También se han realizado investigaciones para el uso de estos lodos como adsorbentes de otros contaminantes como por ejemplo: la remoción del fluoruros de soluciones acuosas por adsorción en lodos de PTAD activados con ácido acético, donde el mayor porcentaje de remoción fue del 94,4 % (Vinitnantharat, Kositchaiyong, & Chiarakon, 2010) o la remoción de fosforo con

lodos de alumbre deshidratados, donde estos lodos se secaron a temperatura ambiente y luego se trituraron y tamizaron para obtener lodos de diferentes tamaños de partícula, donde la capacidad de adsorción máxima de fosforo fue de 3,5 mg/g. (Yang, Tomlinson, S., & Zhao, 2006).

Por otro lado, Espejel P., en su trabajo de grado realizo diferentes ensayos para elaborar cerámicos a partir de los lodos de PTAP, estos lodos fueron secados durante 15 días expuestos a los rayos del sol, una vez secos, se molieron hasta obtener diferentes tamaños de partículas. Para las pruebas de alfarería, se hicieron diferentes piezas mezclando el lodo y un barro denominado plástico en porciones de 1:1 y 1;4, estas piezas se moldearon manualmente y se secaron durante dos semanas a temperatura ambiente para después ser cocidas a una temperatura de 450 – 850 °C. Con base en los resultados se identificó que los principales parámetros de influencia en el proceso fueron la temperatura de cocción y el tamaño de grano (Espejel, 2007).

Cottes M. y otros, estudiaron la influencia del método de moldeo de materiales cerámicos elaborados a partir de residuos en sus propiedades. Para su trabajo formularon materiales a partir de arcillas comúnmente utilizadas en el área de Jaén y lodos procedentes de la depuración de aguas residuales. La arcilla y los lodos fueron secados, triturados y pasados por un tamiz de 0,25 mm para el prensado y por uno de 0,5 mm para la extrusión. Como conclusión se obtuvo que la adición de lodos genera un aumento en la porosidad de la matriz cerámica, sin embargo, no son recomendados porcentajes de adición de estos lodos de más del 10%, ya que se afectan las propiedades mecánicas de los materiales elaborados y presentan defectos morfológicos, en cuanto al proceso de moldeo se concluyó que la extrusión es el procedimiento más adecuado, debido a su mayor versatilidad, así como su capacidad de producción más elevada, al trabajar en continuo, lo que implica una mayor facilidad de operación con respecto al método de prensado (Cottes, Martinez, Iglesias, & Corpas, 2013).

Barón G., también evaluó la síntesis de materiales cerámicos a partir de lodos residuales de PTAP, por medio de la fabricación de morteros usando arcilla roja, bentonita y sustituyendo parte de esta en diferentes porcentajes por bentonita y los lodos, los cuales fueron cocidos a 1100 °C. Los resultados demostraron que el lodo y la bentonita pueden ser incorporados en proporciones de 10% y 20% respecto a la cantidad de arcilla y el uso de bentonita mejoró la resistencia mecánica de los materiales fabricados con los lodos (Barón, Montaña, & Gonzalez, 2018).

Es importante mencionar que para los materiales cerámicos fabricados a partir de los lodos de PTAP, se les deben determinar sus propiedades químicas y mecánicas por medio de ensayos de resistencia a la compresión, absorción de agua y coeficiente de saturación según lo establecido en la norma NTC 4017, también es necesario realizar pruebas de corrosividad de acuerdo a la norma NTC 489, y de esta forma verificar si se clasifican como unidades de mampostería no estructural, según la norma NTC 4205 (Barón, Montaña, & Gonzalez, 2018)

3.2. Materiales de desecho forestales y agroindustriales como adsorbentes para la remoción de metales pesados

Ahmad A. y otros., investigaron el uso del aserrín de árboles de Meranti como adsorbente de Cu y Pb, este residuo primero se lavó con agua destilada y luego se secó a 70°C, seguido a esto se molió hasta obtener un polvo fino, el cual se tamizó y para inmovilizar el color y las sustancias solubles en agua, el polvo molido se trató con formaldehído al 2% en una proporción 1:4 (aserrín:formaldehído; p/v). En esta investigación se realizaron experimentos variando los parámetros fisicoquímicos que pudieran afectar el proceso como el pH de la solución y el tiempo de contacto de la solución con el polvo del aserrín. El máximo porcentaje de remoción del Pb fue

de 94,6% y para el Cu de 99,39%, y las capacidades máximas de adsorción fueron 37,04 mg/g para el Pb y 37,17 mg/g para el Cu (Ahmad, y otros, 2009).

Así mismo, Rafatullah M. y otros, estudiaron el uso de aserrín meranti en la remoción de Cu, Cr, Ni y Pb. El tratamiento que se le hizo a este residuo fue igual al tratamiento aplicado por Ahmad A. y otros, sin embargo, el formaldehído se reemplazó por HCl 0,5 M. En este estudio, se realizaron diferentes experimentos variando los parámetros fisicoquímicos que pudieran afectar el proceso: tiempo de contacto de la solución con el polvo del aserrín, el pH de la solución, la concentración inicial de los metales en la solución, la dosis de polvo de aserrín y la temperatura de la solución. Los porcentajes de remoción máximos que se lograron fueron de 89% para Cu, 94% para Cr, 97% para Ni y 96% para Pb y las capacidades máximas de adsorción fueron 32,1 mg/g para Cu, 37,9 para Cr, 36,0 mg/g para Ni y 34,2 mg/g para Pb (Rafatullah, Sulaiman, Hashim, & Ahmad, 2009).

Cardona A.; Cabañas D. y Pedreguera A. investigaron la adsorción de Pb y Zn por biomasa elaborada a partir de cascara de naranja seca, triturada, con y sin tratamiento de reticulación con cloruro de calcio. A estas cascara les realizaron dos tipos de tratamiento, el primero consistía en lavarlas con abundante agua para eliminar la presencia de compuestos indeseables, seguido a esto se secaron en un horno a 60 °C, con el fin de eliminar la humedad. Una vez secas, se trituraron y pasaron por un tamiz de malla #40 en la parte superior y malla #18 en la parte inferior. Para el segundo tratamiento se realizaron los pasos del primer tratamiento a excepción del paso por el tamiz, y adicionalmente se realizó un proceso de dexmetoxilación, mezclando la biomasa de las cascara con una solución de NaOH 0,2 M; esta nueva mezcla se sometió a agitación constante durante 2 horas y se dejó en reposo para filtrarla después, posteriormente se secó a 40 °C. Una vez obtenida la biomasa seca, se procedió a la reticulación con CaCl₂ 0,2 M. Para analizar el poder de

adsorción de estas cascaras se realizaron experimentos variando los parámetros fisicoquímicos que pudieran afectar el proceso como el pH de la solución, el tamaño de partícula de las cascaras de naranja, la concentración del metal en la solución, la cantidad de cascaras de naranja, el tiempo de contacto de la solución con las cascaras de naranjas, la temperatura de la solución y el tratamiento realizado a las cascaras. Como resultado se obtuvieron porcentajes de remoción para el Pb entre 89,31% y 99,75%, donde los porcentajes más altos se consiguieron con las cascaras a las cuales se les realizo el tratamiento 2 (reticulación con CaCl_2), lo que llevo a una desprotonación de los grupos carboxílicos haciendo que aumentaran los grupos activos, por lo tanto, se logró retener más iones metálicos; y para el zinc los porcentajes de remoción se encuentran entre 93,63% y 99,51%, pero en este caso, los porcentajes más altos se consiguieron con las cascaras a las cuales se les realizo el tratamiento 1 y no las del tratamiento 2 como se esperaba, esto pudo deberse a que las cascaras del tratamiento 2 pasaron mucho tiempo almacenadas y se fueron degradando por agentes externos como la humedad (Cardona, Cabañas, & Zepeda, 2013).

Vizcaíno L. y Fuentes N. también estudiaron el proceso de adsorción de Cd, Pb y Zn por biomasa pretratada de cascaras de naranja, utilizando el mismo tratamiento 2 del caso anterior. Los resultados que se obtuvieron fueron porcentajes de remoción para el Cd superiores al 99%, y para el Pb entre 96% y 99%, sin embargo, para el Zn estos porcentajes fueron más bajos encontrándose entre el 40% y 80%, esto pudo deberse a una menor capacidad de intercambio de los radicales libres en la superficie de las cascaras de naranja con el ion metálico o por interferencias causadas por los otros dos metales presentes en la solución (Vizcaíno & Fuentes, 2015).

Bustamante E. evaluó el efecto de la modificación química de los residuos de café sobre su capacidad de adsorción de Pb y Cu. Estos residuos fueron sometidos a varios ciclos de lavado con agua destilada hasta obtener una solución incolora y se secaron en una estufa a 50°C por 24 horas,

posteriormente fueron modificados con ácido cítrico a diferentes concentraciones (0,1 M y 0.6 M). En este estudio se realizaron diferentes ensayos variando los valores de pH de la solución. Los resultados de los experimentos demostraron que la capacidad de estos residuos de adsorber Pb y Cu aumenta con el aumento de la concentración de ácido cítrico, esto se puede atribuir al incremento de los grupos carboxílicos conforme aumenta la concentración de ácido cítrico. La capacidad de adsorción máxima de los residuos modificados con 0,6 M de ácido cítrico para el plomo fue de 158,7 mg/g y para el cobre fue de 97,1 mg/g (Bustamante, 2011)

Kyzas J. también estudió la remoción de Cu y Cr de soluciones acuosas con desechos comerciales del café, sin ningún tratamiento (secados a temperatura ambiente y tamizados) y tratados con formaldehído, donde primero se lavaron con agua destilada para eliminar la suciedad y el color, luego se secaron a 105 °C durante 5 horas, seguido a esto se trataron con una solución de formaldehído al 2% para reducir la lixiviación orgánica y evitar la formación de moho durante la adsorción. En este estudio se llevaron a cabo diferentes experimentos variando los parámetros de pH de la solución, el tiempo de contacto entre la solución y la biomasa de café, la concentración inicial del Cu y Cr y la tasa de agitación para la mezcla de la solución y la biomasa. Como resultado se obtuvo que la máxima capacidad de adsorción de los residuos de café para la remoción de Cu fue de 70 mg/g y para la remoción de Cr fue de 45 mg/g y la adsorción de estos metales se dio mejor con los residuos tratados, ya que, las impurezas de los residuos no tratados pueden competir y dificultar la adsorción de los metales. El porcentaje máximo de remoción para el Cu se obtuvo con la biomasa tratada y su valor fue de 76%, mientras que para el Cr también fue con la biomasa tratada y su valor fue de 62% (Kyzas, 2012).

Tejada C. Villabona A. y Villadiego M. estudiaron la adsorción de Cr (VI) usando cascara de cacao como material adsorbente, las cuales fueron lavadas con agua destilada, con el fin de

retirar impurezas solubles y suciedad, luego se secaron a 90 °C por 24 horas, seguido a esto se redujeron de tamaño y se tamizaron, una vez preparadas se les realizó una modificación química con NaOH y HCl 1M. Para evaluar la capacidad de adsorción de estos desechos se realizaron diferentes ensayos cambiando el tamaño de partícula. Los resultados de estos ensayos mostraron que la capacidad máxima de adsorción de Cr (VI) se da con la cascara de cacao modificada con HCl con un valor de 463,5 mg/g, mientras que la modificación con NaOH disminuye esta capacidad con un valor de 227,3 mg/g. Los porcentajes de remoción para las cascara modificadas con HCl y sin modificar sobrepasaron el 80%, mientras que las cascara modificadas con NaOH no alcanzaron el 70% (Tejada, Villabona, & Villadiego, Remoción de cromo hexavalente sobre residuos de cacao pretratados químicamente, 2017).

Por otra parte, Barrera J. y Esquivel H., en su trabajo de grado evaluaron la capacidad de adsorción de Cr (VI) de la cascarilla de cacao, esta cascarilla primero se lavó varias veces con agua desionizada, se secó a 60°C por 24 horas y se molió para ser pasada por un tamiz que permitiera obtener diferentes tamaños de partícula. Seguido a esto se modificó con ácido cítrico a diferentes concentraciones (0,3 – 0,9 M). Los resultados obtenidos demostraron que se obtiene una mayor capacidad de adsorción del Cr (VI) con las cascara de cacao que no se modificaron, esto se puede deber a la neutralización de los grupos ácidos disponibles lo que disminuye los sitios activos para realizar la adsorción. Los valores para estas capacidades para las cascara sin modificar se encontraban entre 109,11 y 115, 23 mg/g, mientras que para las cascara modificadas se encontraban entre 65,29 y 105,147 mg/g. Los porcentajes de remoción de Cr (VI) tanto en la biomasa modificada como la no modificada se encuentran entre el 95% y 100% (Barrera & Esquivel, 2018).

3.3. Composites de matriz cerámica y refuerzo orgánico como adsorbentes.

Novillo M. y Velez C., evaluaron la capacidad de sorción de cromo en solución acuosa en contacto con un composite constituido de Bentonita y celulosa. Estos materiales se prepararon con bentonita cálcica como matriz y residuos de césped y plátano como refuerzo, los residuos orgánicos se modificaron con HCl al 2% a 90°C por 2 horas, seguido a esto el residuo fue filtrado y llevado a 105°C hasta que se alcanzó una humedad del 50%, esta modificación química permite modificar la estructura lignocelulósica de las fibras vegetales. A la arcilla natural también se le realizó una modificación química por medio de hidrolisis acida con HCl 2N dentro de un reactor de reflujo, manteniéndola en constante agitación a 90 °C por 2 horas, luego de esto se lavó y filtro con agua desionizada, el residuo fue pulverizado y llevado a 60 °C por 24 horas, con esta modificación se está aumentando la polaridad de la superficie de la bentonita. Para formar el material de matriz cerámica, se trituraron y tamizaron nuevamente los sólidos modificados, con el fin de obtener un polvo relativamente homogéneo, aumentando la superficie de adsorción de la matriz. La capacidad máxima de remoción de Cr con este material fue de 145,3 mg/g (Novillo & Velez, 2015).

Mocciaro A., Lombardi M. y Scian A. estudiaron el desarrollo de materiales de matriz cerámica refractarios de baja densidad, a este sistema se adicionaron fuentes de carbono como agentes formadores de poros con el fin de disminuir la densidad final del material. Las materias primas utilizadas fueron arcillas caoliníticas de Argentina y distintas fuentes de carbono como carbón vegetal y negro de humo. Las arcillas se utilizaron con y sin activación térmica (calcinación a 700 °C por 1 hora), esta activación se realiza para destruir la estructura de la caolinita y que los amorfos formados se encuentren con mayor disponibilidad para la unión con el agente ligante. A partir de estas materias primas, se fabricaron los materiales cerámicos con diferentes mezclas de

arcilla, agente ligante y carbón, estos materiales se presaron en forma de barras a 40 MPa y se trataron térmicamente a 1350 °C - 1550 °C con una velocidad de calentamiento de 5°C/min durante 1 hora. Como conclusiones se observó que al incrementar la temperatura de sinterización, aumentaba la densidad final del material y la resistencia a la flexión, acompañado de una disminución de la porosidad, también se pudo observar que los materiales producidos con la arcilla sin activación térmica, exhibieron valores ligeramente superiores de resistencia mecánica y similar porosidad que los realizados con arcilla activada térmicamente, por lo cual, es más económico utilizar la arcilla sin activación térmica (Mocciaro, Lombardi, & Scian, 2017).

4. Conclusiones

Las tendencias hacia un futuro en la gestión de las aguas residuales apuntan cada vez más a la reutilización de esta y a la recuperación de recursos, representando beneficios para la protección de la salud pública y una reducción en la contaminación ambiental. Con el fin de llevar al país a esta transición, se creó el Documento de la Estrategia Nacional de Económica Circular (Gobierno de la Republica de Colombia, 2019), con el cual se espera transformar los sistemas productivos y de consumo del país a través del manejo eficiente de materiales, agua y energía. Es por esto, que se deben promover proyectos de investigación aplicada orientada a la innovación tecnológica para la economía circular, como es el caso de esta revisión, donde su aplicación permitiría la recuperación de los cuerpos de agua y su reutilización en diferentes actividades productivas, además de la reducción y aprovechamiento de diferentes residuos que actualmente representan grandes problemas ambientales.

El uso de adsorbentes fabricados a partir de materiales de desecho es una alternativa para el tratamiento en la remoción de metales presentes en las aguas residuales industriales, debido a los bajos costos de implementación y mantenimiento en relación a los tratamientos tradicionales.

De acuerdo con la revisión realizada, se podrían fabricar composites cerámicos a partir de una mezcla de arcilla con los lodos generados por las PTAP como matriz y los residuos de aserrín, cascara de naranja, residuos del café o cacao como fibras de refuerzo para la matriz. Estos residuos se encuentran localmente disponibles y son idóneos para la remoción de metales pesados en las

aguas residuales industriales, ya que, tanto los lodos de las PTAP por sus similitudes con las arcillas naturales y la biomasa lignocelulosa, poseen una alta afinidad con los metales. Por otra parte, para la fabricación de estos materiales se debe primero plantear un diseño de experimentos, donde se varíen los factores que afectan la adsorción de los metales pesados, como la dosis y tamaño de partícula del material adsorbente, el tipo de metal a remover, el pH y temperatura de la solución y la presencia de otros metales o agentes quelantes que puedan estar presentes en la solución y el tiempo de contacto entre el adsorbente y la solución. También es importante realizar una caracterización del adsorbente antes de iniciar el proceso, con el fin de obtener toda la información necesaria acerca de este.

En los estudios donde se utilizan los lodos de PTAP como adsorbentes de metales presentes en las aguas residuales, se evidencia que la afinidad de estos por el Pb es extremadamente alta, generando porcentajes de remoción de 99,9%, por lo cual, se recomienda el uso de estos lodos como adsorbente específico para iones de Pb. Para los adsorbentes fabricados con residuos orgánicos, se recomienda realizar primero una activación química dependiendo del material, ya que, generalmente esta aumenta la capacidad de adsorción del metal, por el aumento de sitios activos en la superficie del material.

Referencias

- A., G., & Ahammed, M. (2018). Lodos de tratamiento de agua para la eliminación de metales pesados de aguas residuales de galvanoplastia. *Investigación en ingeniería ambiental*, 23(1), 92-98. doi:doi.org/10.4491/eer.2017.065
- Abo-El-Enein, S., Shebl, A., & Abo-El-Dahab, S. (2017). Drinking water treatment sludge as an efficient adsorbent for heavy metals removal. *Applied Clay Science*, 343-349. doi:oi.org/10.1016/j.clay.2017.06.027
- Ahmad, A., Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hakimi, M., Chi, Y., & Mobin, B. (2009). Removal of Cu (II) and Pb (II) ions from aqueous solutions by adsorption on Meranti wood sawdust. *ScienceDirect*, 636-646. doi:10.1016 / j.desal.2009.01.007
- Ahsaine, H., Zbair, M., & Haouti, R. (2017). Mesoporous treated sewage sludge as outstanding low-cost adsorbent for cadmium removal. *Desalination Publications*, 85, 330-338. doi:doi:10.5004/dwt.2017.21310
- Barcerlo, D., & López, J. (s.f.). Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. *Panel Científico-Técnico de seguimiento de la política de aguas*, 1-2. (I. d. CSIC, Ed.) Barcelona: Convenio Universidad de Sevilla-Ministerio de Medio Ambiente.
- Barón, G., Montaña, A., & Gonzalez, C. (2018). Síntesis y caracterización de materiales cerámicos a partir de lodos residuales del tratamiento de agua potable. Universidad Industrial de Santander.

- Barrera, J., & Esquivel, H. (2018). Biosorción de cromo VI en soluciones acuosas con cascarilla de cacao modificada con ácido cítrico. *Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero químico*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Blanco, F. (2017). Capítulo primero. *Los recursos hídricos en el mundo: cuantificación y distribución*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6115629>
- Bustamante, E. (Septiembre de 2011). Adsorción de metales pesados en residuos de café modificados químicamente. *Trabajo de grado para obtener el grado de Maestría en Ciencias con orientación a procesos sustentable*. Mexico: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Carbajal, A., & Gonzales, M. (2012). Capítulo 3. Propiedades y funciones biológicas del agua. En V. y. Toxqui (Ed.), *Agua para la Salud, pasado, presente y futuro* (págs. 33-45). Madrid: Consejo Superior de Investigaciones científicas.
- Carbajal, A., & Gonzalez, M. (s.f.). Propiedades y funciones biológicas del agua. *Capítulo 3*. Madrid, España: Departamento de Nutrición, Facultad de Farmacia, Universidad Complutense de Madrid. Recuperado el 10 de Enero de 2020, de <https://www.ucm.es/data/cont/docs/458-2013-07-24-Carbajal-Gonzalez-2012-ISBN-978-84-00-09572-7.pdf>
- Cardona, A., Cabañas, D., & Zepeda, A. (2013). Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb y Zn. *Ingeniería*, 17(1), 1-9.
- Carriazo, J. B. (2005). EMPLEO DE DOS ARCILLAS NATURALES COLOMBIANAS EN LA ELIMINACIÓN DE IONES METÁLICOS EN SOLUCION ACUOSA. *Scientia Et Technica*, 11(28), 181-185.

- Castillo, D., Rojas, F., Puerto, C., Villalba, N., & Cordoba, D. (2019). *Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado 2018*. Bogotá: Superintendencia de servicios públicos domiciliarios.
- Caviedes, D., Muñoz, R., Perdomo, A., Rodriguez, D., & Sandoval, I. (2015). Tratamientos para la remoción de metales pesados comúnmente presentes en aguas residuales industriales. Una revisión. *Ingeniería y región*, 13(1), 73-90.
- Comisión Reguladora de agua; Departamento Nacional de Planeación Financiera de Desarrollo Territorial; Ministerio de desarrollo económico; Ministerio de Medio Ambiente. (1997). Análisis del sector de agua potable y saneamiento en Colombia. *Plan Regional de Inversiones en Ambiente y Salud. Serie Análisis No.11*. Colombia.
- Cottes, M., Martinez, C., Iglesias, F., & Corpas, F. (2013). Estudio de la influencia del método de moldeo de materiales cerámicos elaborados a partir de residuos en sus propiedades. *Cerámica y vidrio*, 52(4), 169-176. doi:10.3989/cyv.222013
- Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L., & Morin, N. (2018). Adsorption-oriented processes using conventional and non conventional adsorbents for wastewater treatment. *Green adsorbents for Pollutant removal*, 18, 23-71. Springer Nature. doi:10.1007/978-3-319-92111-2_2
- Delgadillo, A., Gonzalez, C., Prieto, F., Villagómez, J., & Acevedo, O. (2011). Fitorremediación: Una alternativa para eliminar la contaminación. *SciELO*, 14(2). Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002

Espejel, F. (2007). Valoración de lodos generados en plantas potabilizadoras para elaborar productos cerámicos. *Tesis para optar por el grado de Maestro en Ingeniería Ambiental*. Mexico.

Espigares, M., & Pérez, J. (s.f.). AGUAS RESIDUALES. COMPOSICIÓN. Recuperado el 11 de 08 de 2020, de https://cidta.usal.es/cursos/edar/modulos/edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf

Fernández, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, 11(3), 147-170.

Gobierno de la Republica de Colombia. (2019). Estrategia Nacional de Economía Circular. *Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio*. Bogotá D.C, Colombia. Presidencia de la República; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.

Gomez, O. (2018). Contaminación del agua en países de bajos y medianos recursos, un problema de salud pública. *Facultad de Medicina*, 66(1). doi:10.15446/revfacmed

Hermógenes, R. (06 de julio de 2001). Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca de Llobregat. *Tesis doctoral*. Barcelona: Universidad Politecnica de Cataluña. Departamento de ingeniería minera y recursos naturales. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10803/6978>

Iturria, S. (2018). Utilización de un adsorbente de bajo costo para la adsorción de cobre. *Tesis para optar al título de Ingeniero Ambiental*. Chile: Universidad de concepción.

Izquierdo, M. (2010). Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción. Evaluación de materiales y modificación del proceso. Valencia: Universidad de Valencia.

Kovo, G. F. (2015). *Mechanism on the sorption of heavy metals from binary-solution by a low cost montmorillonite and its desorption potential* (Vol. 54). Alexandria Engineering Journal. doi:doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.025

Kyzas, G. (2012). Commercial coffee wastes as materials for adsorption of heavy metals from aqueous solutions. *Materials*, 5(10), 1826-1840. doi:10.3390/ma5101826

Londoño, L., & Londoño, P. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 14(2), 145-153. doi:10.18684/BSAA(14)145-153

Lopez, L., Vega, L., Rendon, C., & Tobon, S. (2019). *Aprovechamiento de residuos madereros. Cuantificación, caracterización y valorización* (Vol. Primera Edición). Medellín: Corporación Universitaria Remington. Servicio Nacional de Aprendizaje SENA.

MADS. (18 de abril de 2015). Resolución 631 de 2015.

Martinez, M. (2012). Estudio para el tratamiento, manejo y disposición final de lodos generados en plantas de tratamiento de agua potable. *Proyecto para obtener el título de Ingeniero Ambiental*. Quito, Ecuador: Universidad Politécnica Nacional.

Mocciaro, A., Lombardi, M., & Scian, A. (2017). Desarrollo de materiales cerámicos refractarios de baja densidad a partir de agentes ligantes nanoestructurados y carbón. *Boletín de la sociedad española de Cerámica y vidrio*, 56(6), 243-248. doi:10.1016/j.bsecv.2017.05.003

Muñoz, A. (junio de 2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales. *Monografía*. Mexico: Universidad Autónoma del estado de Hidalgo.

Muñoz, J. (2007). Biosorción de plomo por cáscara de naranja "citrus cinensis" pretratada. *Tesis para optar por el título de Químico*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Novillo, M., & Velez, C. (Marzo de 2015). Evaluación de la capacidad de sorción de cromo en solución acuosa en contacto con un composite constituido de bentonita. *Trabajo de titulación para obtención del título de Ingenieros en Biotecnología de los recursos naturales*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.

Ojeda, E. (s.f.). *Informe Nacional sobre la gestión del agua en Colombia*. Bogotá: Gobar Water Partnership. Recuperado el 06 de 08 de 2020, de <https://www.cepal.org/samtac/noticias/documentosdetrabajo/5/23345/InCo00200.pdf>

Orduz, K., & Tatiana, P. L. (2016). Formulación de una guía sectorial para el manejo de los residuos líquidos industriales generados en el laboratorio ambiental Antek S.A.S. (U. L. Colombia, Ed.) Bogotá, Colombia.

Peñaranda, L., & Montenegro, S. a. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación agraria y ambiental*, 8(2), 141-150. doi:10.22490/21456453.2040

Peñaranda, L., Montenegro, S., & Giraldo, P. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), 141-150. doi:10.22490/21456453.2040

- Quiñones, E. T. (2014). Remediación de aguas contaminadas con cromo utilizando diferentes biomateriales residuales. *Ciencias e Ingeniería al día*, 9(1), 25-42. Obtenido de <http://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/11227/5202/1/Remedacion%20de%20aguas%20contaminadas.pdf>
- Rafatullah, M., Sulaiman, O., Hashim, R., & Ahmad, A. (2009). Adsorption of copper (II), chromium (III), nickel (II) and lead (II) ions from aqueous solutions by meranti sawdust. *Journal of Hazardous Materials*, 170(2-3), 969–977. doi:10.1016/j.jhazmat.200
- Rodriguez, N. (2013). Propuesta metodológica para tratamiento de lodos provenientes de plantas de potabilización en la sabana de bogota (Estudio de caso madrid, Cundinamarca). *Proyecto de grado para obtener el titulo de Ingeniero Ambiental*. Bogotá: Universidad Libre.
- Romero, L. (enero de 2018). Preparación y caracterización de materiales adsorbentes a partir de cáscaras de frutas para su uso en la remoción de metales y aplicación a procesos ambientales. *Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencia y Tecnología*. Mexico: Universidad de Granada.
- Siswoyo, E., Mihara, Y., & Tanaka, S. (2014). Determination of key components and adsorption capacity of a low cost adsorbent based on sludge of drinking water treatment plant to adsorb cadmium ion in water. *Applied Clay Science*, 146-152. doi:dx.doi.org/10.1016/j.clay.2014.05.02
- Stupenengo, F. (2011). Capitulo 10. Materiales compuestos. En *Materiales y materias primas*. Buenos Aires: Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

- Tejada, C., Villabona, A., & Garces, L. (2015). Adsorción de metales pesados en aguas residuales usando materiales de origen biológico. *TecnoLógicas*, 18(34), 109-123.
- Tejada, C., Villabona, A., & Villadiego, M. (2017). Remoción de cromo hexavalente sobre residuos de cacao pretratados químicamente. *U.D.C.A. Actualidad y divulgación científica*, 20(1), 139-147.
- Tripathi, A., & Rawat, M. (2015). Heavy metal removal from wastewater using low adsorbents. *Journal of Bioremediation and Biodegradation*, 6(315). doi:10.4172 / 2155-6199.1000315
- Vinitnantharat, S., Kositchaiyong, S., & Chiarakon, S. (2010). Removal of fluoride in aqueous solution by adsorption on acid activated water treatment sludge. *Applied Surface Science*, 256, 5458-5462.
- Vizcaíno, L., & Fuentes, N. (2015). Biosorción de Cd, Pb y Zn por biomasa pretratada de algas rojas, cascaras de naranja y tuna. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(1), 43-60.
- Wang, S. H. (2005). *Kinetic modelling and mechanism of dye adsorption on unburned carbon*. *Dyes and Pigments* (Vol. 72). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.dyepig.2005.09.005
- Wolowiec, M., & al., e. (2019). The properties of sludge formed as a result of coagulation of backwash water from filters removing iron and manganese from groundwater. *SN Applied Sciences*, 1(639). doi:10.1007/s42452-019-0653-7
- Yang, H. B. (2019). Removal of Arsenate and Chromate by Lanthanum-modified Granular Ceramic Material: The Critical Role of Coating Temperature. *Springer Nature*, 9(7690). doi:10.1038/s41598-019-44165-8

Yang, Y., Tomlinson, D., S., S. K., & Zhao, Y. (2006). Dewatered alum sludge : a potential adsorbent for phosphorus. *Water Science Technology*, 54(5), 207-213.
doi:10.2166/wst.2006.564