

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUÍMICA, AMBIENTAL Y CIVIL
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**ESTUDIO DE LA ADSORCIÓN COMO MÉTODO ALTERNATIVO PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, EN LA REMOCIÓN DE METALES
PESADOS**

DAROLD JOSÉ DÍAZ HERRERA

PAMPLONA, COLOMBIA

JUNIO 2020

**ESTUDIO DE LA ADSORCIÓN COMO MÉTODO ALTERNATIVO PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES, EN LA REMOCIÓN DE METALES
PESADOS**

Trabajo presentado para optar por el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Autor:

DAROLD JOSE DÍAZ HERRERA

Director:

Msc. Ingeniera Química, -DAISSY LORENA RESTREPO SERNA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUÍMICA, AMBIENTAL Y CIVIL

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PAMPLONA, COLOMBIA

JUNIO 2020

DEDICATORIA

Esta meta lograda se la dedico a mi familia, especialmente a mis padres y hermanos

Padres

José Antonio Díaz Montero

María Del Carmen Herrera Pérez

Hermanos

Deimer Díaz Herrera

Jeison Díaz Herrera (Q.E.P.D.)

Liseth Díaz Herrera

por ser esa caldera que suministra todo el apoyo, amor y comprensión a este proceso de formación que ha tenido sus fallas y sus paradas, pero que, aun así, ha seguido su marcha. Este proceso no acaba aquí, vendrán muchas variables por definir, por estudiar y por controlar.

AGRADECIMIENTOS

Agradecido principalmente con Dios por permitirme llegar a esta instancia, en donde se ven culminados mis estudios de pregrado. De la misma forma les doy las gracias a mis amigos por sus consejos, apoyo incondicional

Ana Irina Hostia Ospino

Evelyn Batista Garcés

Héctor Daniel Hostia Ospino

Jaime Enrique Bayona Solano

Johana Paola Flórez Gómez

Néstor Andrés Hostia Ospino

También agradezco el apoyo recibido por mis compañeros de programa, que algún día estuvieron o estarán en esta misma situación especialmente a:

Anatilde Bastidas

Omar Duván Rodríguez

Omar José Nuta Núñez

Silvia Juliana Martínez Álvarez

William Aparicio Bayona

De último, pero no menos importante agradecer el apoyo de mi tutora, a mis evaluadores y todo el personal universitario que de una u otra manera aportaron a este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS	II
CONTENIDO.....	III
CAPITULO I Tablas, Ilustraciones, Anexos y Acrónimos.	V
1.1. LISTA DE TABLAS.....	V
1.2. LISTA DE ILUSTRACIONES.....	VI
1.3. LISTA DE ACRÓNIMOS.	VII
CAPITULO II Introducción y Objetivos.....	1
2. INTRODUCCIÓN.	1
2.1 OBJETIVOS.....	3
2.1.1. OBJETIVO GENERAL	3
2.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPITULO III Contextualización y Desarrollo.....	4
3.1. Contextualización.	4
3.1.1. LA ADSORCIÓN.	7
3.1.2. AGUAS RESIDUALES.....	12
3.1.3. LOS METALES PESADOS.	15
3.1.3.1. Oligoelementos o micronutrientes:.....	15
3.1.3.2. Metales pesados sin función biológica:	15
3.2. Desarrollo.	18
3.2.1. TIPOS DE ADSORBENTES USADOS EN LA RMP.....	18
3.2.1.1. Los adsorbentes convencionales:.....	18
3.2.1.2. Los adsorbentes no-convencionales:	18

3.2.2. COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE LOS TIPOS DE MATERIALES ADSORBENTES.....	19
3.2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO DE ADSORCIÓN.....	20
3.2.4. ANÁLISIS DE LAS MODIFICACIONES REALIZADAS AL PROCESO INICIAL DE ADSORCIÓN.....	22
3.2.4.1. Empleo de biomateriales:	22
3.2.4.2. Combinación de materiales adsorbentes:	22
3.2.4.3. Combinación de materiales adsorbentes y biomateriales:	23
3.2.4.3. Funcionalización o modificación de la superficie con nanomateriales:	23
CAPITULO IV Resultado y Discusión.	24
4.1. RESULTADOS.	24
4.1.1. La Adsorción:	24
4.1.2. Tipos de Adsorbentes usados en la RMP:	24
4.1.3. Comparación de las eficiencias de remoción de los tipos de materiales adsorbentes: 24	
4.1.4. Ventajas y Desventajas del proceso de adsorción:	25
4.1.5. Análisis de las modificaciones realizadas al proceso de adsorción:	25
4.2. DISCUSIÓN.....	26
CAPITULO V Conclusiones, Referencias Bibliográficas y Anexos.....	28
5.1. CONCLUSIONES.	28
5.2. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

CAPITULO I Tablas, Ilustraciones, Anexos y Acrónimos.**1.1. LISTA DE TABLAS.**

	Pág.
Tabla 1. Algunos métodos convencionales empleados para RMP.	5
Tabla 2. Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales.....	13
Tabla 3. Principales actividades industriales generadoras de metales pesados.	16
Tabla 4. Consecuencias para la salud de algunos metales tóxicos.....	17
Tabla 5. Eficiencias de adsorción de algunos materiales convencionales en la RMP.	19
Tabla 6. Eficiencias de adsorción de algunos materiales convencionales en la RMP.	20
Tabla 7. Ventajas y limitaciones de la adsorción en la eliminación de metales pesados.....	21

1.2. LISTA DE ILUSTRACIONES.

	Pág.
Ilustración 1. Esquema estructural del adsorbente.	8
Ilustración 2. Etapas del fenómeno de adsorción. (a) Difusión del adsorbato hacia el adsorbente. (b) Identificación de las fases que intervienen en la Adsorción.	9
Ilustración 3. Parámetros pueden aumentar o disminuir la captación de los iones metálicos.....	11
Ilustración 4. Vertimiento puntal de AR al Río Pamplonita.	12
Ilustración 5. (a) Contaminación causada por las AR´s aguas abajo; (b) Características físicas aguas arriba.	14
Ilustración 6. Tipos de adsorbentes empleados en la RMP.....	18

1.3. LISTA DE ACRÓNIMOS.

RMP: Remoción de Metales Pesados

MP: Metales Pesados

AR: Agua Residual

AR's: Aguas Residuales

TC: Tratamiento Convencional

TNC: Tratamiento no Convencional

AP: Agua Potable

TAR: Tratamiento de Agua Residual

ARD: Agua residual doméstica

ARU: Agua residual municipal o urbana

ARI: Agua residual industrial

ARA: Aguas residuales agrícolas

CAPITULO II Introducción y Objetivos.

2. INTRODUCCIÓN.

El aumento continuo de la población mundial, fundamentalmente concentrada en las mega ciudades, y el cambio climático global que ha alterado los patrones de temperaturas, lluvias y sequías, introducen desafíos cada vez mayores en cuanto al abordaje de la problemática del agua. Ya no podemos considerar al agua como algo dado, sino que debe ser cuidada. Esta valoración de la importancia del manejo del recurso agua está íntimamente vinculada con el cambio general con que la sociedad percibe las cuestiones ambientales. En muchas universidades se han desarrollado carreras o especialidades para formar profesionales que, con enfoques muy variados, sean capaces de enfrentar la complejidad de estos problemas (Sosa and Zalts 2012).

Por tal razón uno de los principales retos del siglo XXI es atajar la escasez de agua que padecen numerosas poblaciones del mundo, ya que en el siglo XX el consumo de agua dulce se multiplicó por cinco como lo informa la UNESCO en su reporte mundial sobre el desarrollo de los recursos hídricos titulado “El agua: una responsabilidad compartida” (UNESCO 2006), lo que ha extendido el número de regiones con carencia de agua. En especial se está produciendo un incremento muy significativo en el uso industrial del agua, ya de por sí elevado. El sector industrial consume gigantes cantidades de agua y es responsable de gran parte de la contaminación que se genera sobre el medioambiente, debido a la cantidad de desechos peligrosos que produce, como lo menciona (Galán 2013). Originándose de esta manera grandes cantidades de agua usada, debido a las diferentes actividades domésticas, industriales y comunitarias; esta agua es un subproducto conocido comúnmente como Agua Residual (AR) (Lizarazo and Orjuela 2013) (Lezcano 2019).

Además, la formación de estas urbes, complican en forma notable el suministro de Agua Potable (AP), debido a que los ríos se utilizan simultáneamente como fuente de abastecimiento y

como de transporte de desechos domésticos. Al drenar cualquier tipo de AR doméstica, industrial y de agricultura en un cuerpo receptor, se producen cambios en él, derivando diversos efectos tales como mal sabor, olor desagradable; estas condiciones del agua, traen como consecuencia la alteración de especies que habitan en el afluente, la fauna acuática se asfixia por falta de oxígeno y además pueden causar diversas enfermedades en los humanos. Por ende es importante contar con agua segura que, es esencial para la salud de los consumidores, de allí el objetivo primordial del tratamiento del agua y del control de calidad del agua de consumo, cuyas características finales dependerán de su origen (agua subterránea o superficial) y del tratamiento de potabilización al que sea sometida (Rodríguez et al. 2017).

Como se mencionó anteriormente, al verter cualquier tipo de AR en un cuerpo receptor, se producen cambios en él. Observando esta situación y en miras de dar solución a esta problemática se encuentran los Tratamientos Convencionales (TC) como pretratamiento, tratamientos primarios, secundarios y terciarios como lo da a conocer (Martín 2011) y los no convencionales (TNC) Lagunaje, Lecho de Turba, Lechos Bacterianos o Filtros Percoladores, Filtros Verdes y Humedales Artificiales, mencionados por (Bracho Luzardo et al. 2016) y entre las tecnologías aplicadas en los procesos de depuración de AR's se encuentran los tratamientos físicos, químicos y biológicos, que son utilizados dependiendo de la carga orgánica y los componentes que están presentes en estas aguas (Granados 2015); en donde se estudian las características comunes, agrupadas en parámetros físicos (Sólidos en suspensión, Turbiedad, Color y olor, entre otros), químicos (Oxígeno, Materia orgánica, Compuestos inorgánicos, Sulfuros y cianuros, Metales Pesados (MP) y Dureza) y biológicos (Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y Demanda química de oxígeno (DQO)) (Lezcano 2019).

Pero actualmente el TC de AR's enfrenta el desafío de disminuir el exceso de nutrientes como el nitrógeno y fósforo a niveles aceptables según los valores de referencia estipulados en la legislación referente a las descargas de AR's. Por tal motivo en el presente trabajo se decidió estudiar los procesos de la adsorción como método alternativo para el Tratamiento de Agua Residual (TAR), en la Remoción de Metales Pesados (RMP); mediante la identificación de los tipos de materiales usados como adsorbentes en la RMP en AR's, la comparación de las eficiencias de remoción de los materiales adsorbentes, con el fin de establecer los rendimientos y la determinación las ventajas y desventajas de la adsorción como alternativa en la RMP, además analizar las modificaciones realizadas al proceso de adsorción inicial para mejorar la eficiencia.

2.1 OBJETIVOS

2.1.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar el proceso de adsorción como método alternativo para el tratamiento de aguas residuales, en la remoción de metales pesados.

2.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los tipos de materiales usados como adsorbentes en la remoción de metales pesados en aguas residuales.
- Comparar las eficiencias de remoción de los materiales adsorbentes, con el fin de establecer los rendimientos.
- Determinar las ventajas y desventajas de la adsorción como alternativa en la remoción de metales pesados.
- Analizar las modificaciones realizadas al proceso de adsorción inicial para mejorar la eficiencia de remoción.

CAPITULO III Contextualización y Desarrollo.

3.1. Contextualización.

El saneamiento ambiental básico es el conjunto de acciones, técnicas y socioeconómicas de salud pública que tienen por objetivo alcanzar niveles crecientes de salubridad ambiental, tiene por finalidad la promoción y el mejoramiento de condiciones de vida urbana y rural (Gutiérrez 2016), para lo cual investiga y estudia la diversidad de las formas de contaminación del suelo, el aire y el agua, consecuencia de los desechos resultantes de los modernos satisfactores que ha inventado el hombre para facilitarle su trabajo diario y mejorar su nivel de vida. Comprende primordialmente la potabilización del agua apta para el consumo humano y su manejo adecuado, la disposición correcta de excreta y basuras, la vigilancia de la calidad sanitaria de los alimentos, desde su producción hasta su consumo, el control de fauna nociva, principalmente los insectos y los roedores, capaces de transmitir enfermedades al hombre, el saneamiento de la vivienda y áreas de reunión y esparcimiento (Cor, Sosa Lechuga, and Ayala García 2004). Uno de los puntos centrales de este trabajo es el estudio de la contaminación del agua causada por como los MP, convirtiéndose de esta manera en una de las tareas más importantes en el desarrollo del saneamiento básico.

Para reducir la contaminación del agua, numerosos métodos de tratamiento como la adsorción, extracción de fluidos supercríticos, intercambio iónico, filtración, precipitación por electrodiálisis, sistema microbiano, procesos electroquímicos, coagulación-floculación, precipitación química, flotación, ósmosis inversa, proceso de oxidación avanzada y biorreactores de membrana. Se aplican con diversos grados de éxito para eliminar tintes y MP del agua contaminada (Garba et al. 2020).

Tabla 1. Algunos métodos convencionales empleados para RMP.

REF.	TÉCNICA	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
(Altamirano 2015) (Pastrana and Mora 2017)	COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN	es un método fisicoquímico, que permite la eliminación de los contaminantes mediante su sedimentación. El proceso está basado en la coagulación de las partículas por la adición de un producto químico, lo cual provoca la desestabilización de las partículas coloidales.	Elevada remoción de partículas coloidales y suspendidas. El sistema de coagulación-floculación se puede llevar a cabo en la misma unidad de operación.	Gasto elevado cuando no se realiza adecuadamente. Genera lodos de alto costo de tratamiento. Se necesitan de coagulantes para el proceso. No permiten tratar todos los metales pesados en aguas residuales por lo que requieren de la utilización de otra técnica acoplada para completar el proceso.
(Reyes Toriz, Cerino Córdova, and Suárez Herrera 2006) (Altamirano 2015)	INTERCAMBIO IÓNICO	Se trata de un proceso que involucra una reacción química, en la que un ion de la solución es intercambiado por otro similarmente cargado y unido a una partícula sólida móvil, generalmente resinas. Las resinas de intercambio iónico, tienen la particularidad de que sus iones intercambiables están cargados negativamente, por lo que es capaz de retener selectivamente sobre su superficie los iones disueltos en el agua, para esto mantiene los iones temporalmente unidos a la superficie, y después los cede frente a una disolución con un regenerante	Es posible la eliminación de metales a muy bajas concentraciones. Presentan alta selectividad. Es posible la recuperación de los metales por electrólisis.	La presencia de Calcio, Sodio y Magnesio disminuye su rendimiento debido a que pueden saturar la resina. La posible competencia entre metales pesados y otros cationes. Las resinas no son muy tolerantes al cambio en pH. Los materiales orgánicos pueden envenenar la resina. La solución contaminada debe de ser previamente tratada para eliminar los materiales en suspensión
(Reyes Toriz et al. 2006) (Altamirano 2015)	ÓSMOSIS INVERSA	Es un proceso en el que el agua se separa de las sales disueltas en solución, filtrándola a través de una membrana semipermeable a una presión mayor que la osmótica causada por las sales disueltas en el agua residual. Este proceso es	Altos niveles de remoción. Es un proceso fácilmente automatizado. No hay cambio en la composición química de las aguas residuales.	Mediana selectividad y tolerancia a cambios de pH. Bajo tiempo de vida con soluciones corrosivas. Requiere de presiones muy altas para su funcionamiento.

		eficiente en el tratamiento de colorantes básicos, ácidos, directos, dispersos y reactivos.	La recuperación de metales pesados es posible.	Requiere de mantenimiento frecuente para evitar saturación de la membrana. Alto costo por reemplazar la membrana. Es necesario separar las partículas insolubles o en suspensión para evitar saturación de las membranas.
(Reyes Toriz et al. 2006) (Altamirano 2015)	PRECIPITACIÓN QUÍMICA	La precipitación química se utiliza para remover la mayoría de los metales de las aguas residuales, y algunas especies aniónicas como sulfatos y fluoruros. En este proceso, los productos químicos reaccionan con los iones de metales pesados para formar precipitados insolubles y éstos pueden separarse del agua por sedimentación o filtración	Simplicidad de operación. Alto nivel de eliminación de metales pesados. Bajo costo de operación.	La presencia de agentes orgánicos disminuye su rendimiento. No es selectivo. Se necesitan agentes coagulantes y floculantes para separar los metales del efluente. Generación de lodos con alto costo de tratamiento.
(Pastrana and Mora 2017)	ELECTRO COAGULACIÓN	La electrocoagulación se basa en un principio de coagulación, la formación del coagulante se lleva a cabo por corriente eléctrica que es aplicada al medio líquido contaminado. Así, la electrocoagulación es un proceso en el cual las partículas contaminantes suspendidas son desestabilizadas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados	Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros. Requiere de equipos simples y de fácil operación. Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos. Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos.	Es necesario reponer los electrodos de sacrificio. Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado. Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto. El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.

Fuente: Elaborada por el autor

En la tabla anterior se resumen algunas de las técnicas anteriormente mencionadas, con el fin de diferenciar los fundamentos fisicoquímicos en los que están basados y comparar las ventajas y desventajas para identificar la viabilidad de su aplicación. Encontrándose restricciones en cada una de ellas como por ejemplo; la coagulación-floculación tiene la limitante de no tratar todos los MP, la presencia de Ca, Na y Mg y otros cationes disminuyen el rendimiento del proceso en la técnica de intercambio iónico, por otro lado la osmosis inversa requiere un alto valor de mantenimiento para evitar la saturación de la membrana, el proceso de precipitación química no es selectivo y presenta generación de lodos con alto precio de tratamiento y finalmente la electrocoagulación puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de energía eléctrica sea alto. Por estas razones se decidió estudiar el proceso de la adsorción como método alternativo para el TAR, en la RMP.

A continuación, se dará información acerca del proceso de Adsorción, como las condiciones y características del fenómeno, por medio de un estudio bibliográfico.

3.1.1. LA ADSORCIÓN.

En las carreras que estudian problemáticas ambientales, un tema particularmente importante es el tratamiento de efluentes industriales. Entre las diversas técnicas empleadas, está la adsorción, que puede definirse como la acumulación de una sustancia o un material en la interface entre una superficie sólida y una solución con la que está en contacto (Sosa and Zalts 2012). El proceso de esta técnica se basa en la separación y concentración de uno o más componentes, por medio de la retención de contaminantes presentes a bajas concentraciones en el interior del material por los átomos que tienen todos sus electrones enlazados, y por la superficie, en donde se representa una discontinuidad de esos enlaces. Para esos enlaces incompletos, es energéticamente favorable el reaccionar con lo que se encuentre disponible y por ello la adsorción

se produce de forma espontánea. En la **Ilustración 1** se detallan las características físicas de la superficie de un adsorbente.

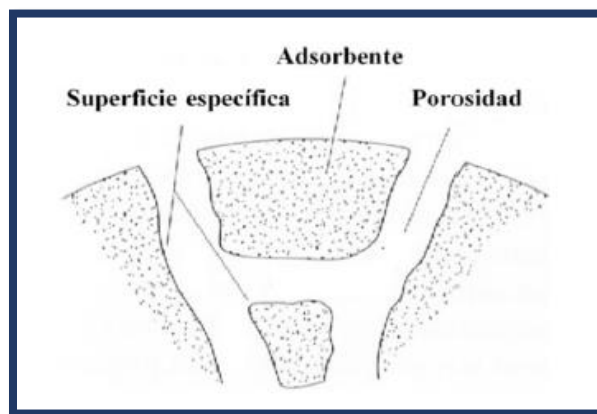


Ilustración 1. Esquema estructural del adsorbente.

Fuente: (Galán 2013)

Existen 3 mecanismos de adsorción por el cual se logra la separación de material adsorbible del medio en el que se encuentra, estos son el mecanismo estérico, cinético y de equilibrio. El mecanismo de adsorción estérico hace referencia a los poros que presenta el sólido adsorbente, dichos poros pueden tener determinado tamaño lo que permite solo el paso de moléculas pequeñas e impiden el paso de las moléculas de tamaño mayor al del poro del adsorbente, el mecanismo de adsorción de equilibrio hace referencia a la afinidad que existe entre el adsorbente y el material adsorbible indicando que el adsorbato que pueda retener con mayor fuerza será el que tendrá mayor eficiencia de separación en comparación de otros, por último, el mecanismo de adsorción cinética, se fundamenta en las velocidades de difusión del material adsorbible e indica que el tiempo de exposición determinará que la especie con mayor difusión será ya que se elimine preferentemente por el sólido adsorbente (Chacaltana Torres 2018). Para los anteriores mecanismos la adsorción se desarrolla en tres etapas: difusión hasta la superficie del adsorbente, difusión hasta el interior de los poros y adsorción sobre la superficie libre de los poros. Las etapas de transferencia de materia

son las limitantes en el proceso, ya que la adsorción es prácticamente instantánea. Además, en sistemas hidrodinámicos bien agitados, la difusión externa es muy rápida y resulta cinéticamente controlante el proceso de difusión interna. Por ello, es fundamental evaluar parámetros como: la superficie externa y la porosidad del sólido, el tamaño de partícula, y el tamaño y estructura de los poros (Galán 2013). En la siguiente representación se muestran las etapas del proceso de adsorción y de las fases involucradas.

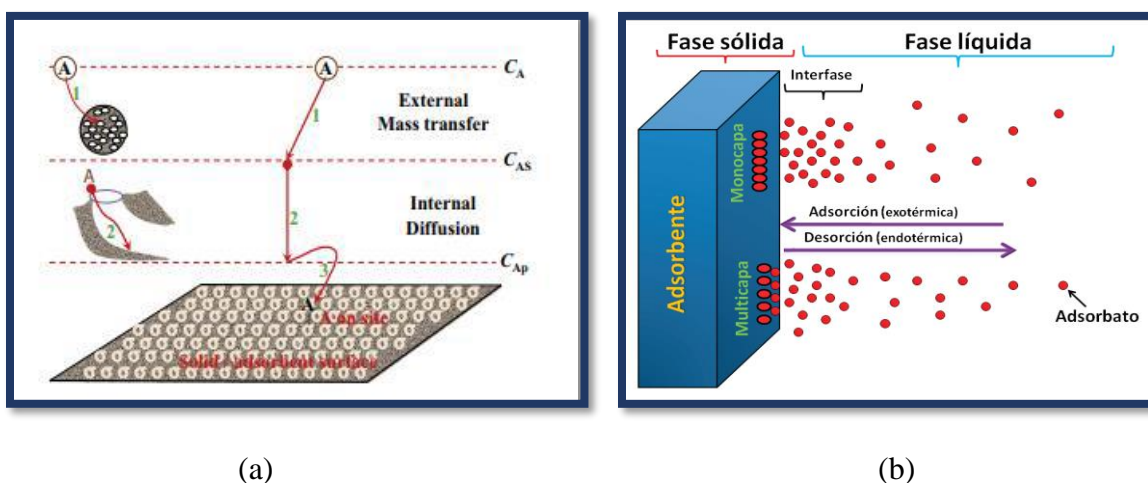


Ilustración 2. Etapas del fenómeno de adsorción. (a) Difusión del adsorbato hacia el adsorbente. (b) Identificación de las fases que intervienen en la Adsorción.

Fuente:(Arroyo Ramírez and Ruiz Rivera 2018) (Granados Correa, Serrano Gómez, and Bonifacio Martínez 2010)

En la **Ilustración 2 (a)** se explica detalladamente los procesos involucrados de difusión del adsorbato afín con el adsorbente, donde se observa el movimiento (difusión externa) del adsorbato desde el seno de la solución hasta la superficie del adsorbente, y por último un movimiento desde la superficie del adsorbente hasta el interior de los poros de este (difusión interna). De esta manera la concentración de los contaminantes presentes en la solución va disminuyendo a medida que transcurre el proceso de adsorción. En cambio, en **Ilustración 2 (b)** se distinguen las fases presentes en el proceso como; la líquida (solución acuosa contaminada), la sólida (adsorbente) y

el interfaz sólido/líquido donde se desarrolla la formación de la monocapa de adsorbato adsorbido. Además, se distingue la posible aparición del proceso contrario de la adsorción (desorción), en el cual los adsorbatos retenidos se liberan de la superficie e interior del adsorbente.

Desde el punto de vista cinético, la etapa de adsorción es la más rápida de todas, de hecho, se considera que se alcanza el equilibrio de forma instantánea, de modo que la cantidad de soluto adsorbido sobre la superficie del poro se considera en equilibrio con la concentración del soluto en disolución. En estas condiciones, el transporte externo y/o la difusión intraparticular serán los factores limitantes que condicionarán la velocidad global del proceso de adsorción (García 2014). Sin embargo la eficiencia de los procesos de adsorción depende de las características del adsorbente (área específica, estructura y tamaño de partícula, entre otras) y de las propiedades de las especies químicas en solución (cationes y aniones, tamaño del ion y carga eléctrica), además del tipo de mecanismo de adsorción que pueda ocurrir entre las fases, las condiciones del proceso (pH, temperatura, concentración) y las fuerzas que controlan el proceso (Van der Waals, electrostáticas, enlaces químicos) (Granados Correa et al. 2010). Por lo cual se aclara que, la adsorción puede ser física o química dependiendo de la unión de las moléculas. En el caso de la adsorción física, la unión se da por medio de fuerzas de Van der Waals, por lo cual la estructura de las moléculas no se ve afectada, mientras que la adsorción química ocurre por atracciones electrostáticas en donde la distribución electrónica en las moléculas es objeto de modificaciones. La adsorción química se caracteriza por ser mucho más lenta que la física debido a que requiere un tiempo determinado para llegar al estado estacionario en función de la presión y la temperatura del proceso, junto con las propiedades químicas del sistema con el cual se está trabajando (Rodríguez, Campos Rosario, and Pérez Flores 2019).

El fenómeno de adsorción se puede ver afectado de manera positiva o negativa, por ciertas variables como la temperatura, pH, tamaño de partículas o simplemente por la presencia de otros iones. Estos parámetros pueden aumentar o disminuir la captación de los iones metálicos. A continuación, se explican los factores que influyen en el proceso de adsorción.

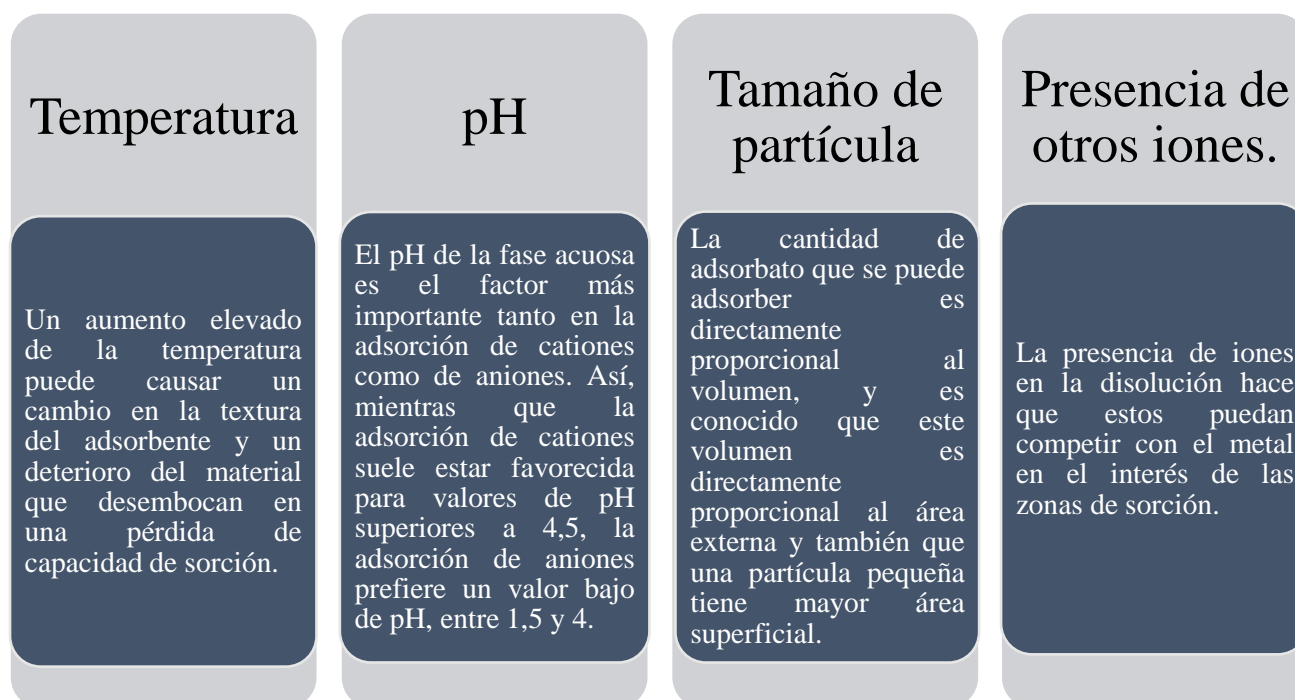


Ilustración 3. *Parámetros pueden aumentar o disminuir la captación de los iones metálicos.*

Fuente: (Tejada Tovar, Villabona Ortiz, and Gárces Jaraba 2015) y elaboración propia.

Como se describió anteriormente, que el desarrollo de actividades domésticas, industriales y de agricultura generan contaminación ambiental mediante el vertimiento de AR's por metales, colorantes, plaguicidas y otros compuestos que se disponen en menor proporción como lo exponen (Valladares et al. 2017). Por ende, es necesario tener claro que son las AR's, que tipos existen y cuáles son sus características para poder entender cómo tratarlas y cómo darle disposición final sin que afecte en gran medida al medioambiente.

3.1.2. AGUAS RESIDUALES.

Se denomina AR al agua que resulta después del uso del agua en los diferentes sectores como agrícola, pecuario, industrial y doméstico; estas llevan residuos físicos, químicos y biológicos, sin embargo, los componentes de cada AR varían dependiendo el sector. La cantidad y calidad de las AR's depende del uso del agua ya que no todos los seres humanos e industrias generan la misma cantidad de residuos. Por lo tanto, las AR's se clasifican así: Agua residual doméstica (ARD), Agua residual municipal o urbana (ARU), Agua residual industrial (ARI), Aguas lluvias y Aguas residuales agrícolas (ARA) (Patiño 2019). En la siguiente ilustración se da un ejemplo de ARU, donde ésta es vertida directamente a una fuente hídrica sin ningún control o tratamiento previo, generando una contaminación directa al medio ambiente hídrico. Este vertimiento puntual se encuentra en el municipio de Pamplona Norte de Santander Colombia, en la zona de la terminal de transporte terrestre.

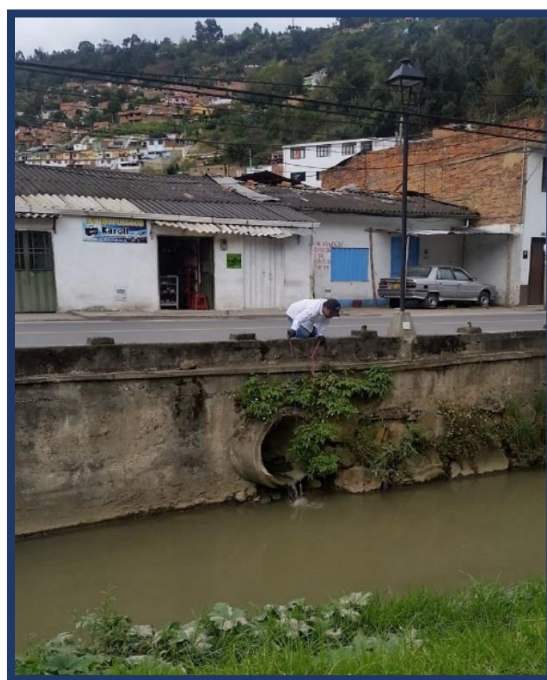


Ilustración 4. *Vertimiento puntual de AR al Río Pamplonita.*

Fuente: Autor

En la **Tabla 2** se da información de las características Físicas, Químicas y Biológicas que poseen las AR's. Siendo las físicas las más sensibles al ojo humano, como se observa en la **Ilustración 5 (a)** donde se visualiza la presencia de una espuma blanquecina originada por la contaminación del vertimiento de ARU, además se evidencia el mal olor que expide la cuenca hídrica aguas abajo del vertimiento puntual (pasos abajo del sector del camellón, vía Cúcuta) y la presencia de animales carroñeros. En la **Ilustración 5 (b)** se observan las características físicas del río aguas arriba del punto de vertimiento (imagen captada sobre la zona del colegio San José Provincial). Donde también se observó que existen otras causas de contaminación como, por ejemplo; la urbanización creciente a lo largo y ancho del río, que lo convierten en un área de deposición de residuos sólidos y en una zona de vertimiento directo de ARD y de otras actividades comerciales presentes. Esta comparación se realiza para entender la magnitud de dicha contaminación causada por los malos manejos en la Gestión del Saneamiento Básico dentro del Plan Integral de Gestión Ambiental.

Tabla 2. *Características físicas, químicas y biológicas de las aguas residuales.*

CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES		
Físicas	Químicas	Biológicas
Color	Sustancias Orgánicas	Presencia de:
Material Flotante	Carbohidratos	Animales
Sólidos Disueltos	Colorantes	Plantas
Sólidos suspendidos	Fenoles	Protistas
Conductividad	Compuestos orgánicos gaseosos	Virus
Olor	Plaguicidas	
Temperatura	Grasas y aceites	
Turbidez	Tensioactivos	
Densidad	Proteínas	
	Sustancias Inorgánicas	
	Sustancias alcalinas y ácidas	
	Metales pesados	
	Compuestos de azufre	
	Cloruros, gases	
	Compuestos de nitrógeno y fósforo	

Fuente: (Romero Hernández 2017)



(a)



(b)

Ilustración 5. (a) Contaminación causada por las AR's aguas abajo; (b) Características físicas aguas arriba.

Fuente: Autor

En el presente trabajo se discutirá también la contaminación causada por los MP puesto que estos no son biodegradables, y tienden a bioacumularse en los organismos y en el medio ambiente, y muchos cuentan con características tóxicas o cancerígenas (Del Paso Weppen 2019).

3.1.3. LOS METALES PESADOS.

El término de metal pesado refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas. Los ejemplos de MP o algunos metaloides, incluyen el mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl), y plomo (Pb), entre otros.

Los MP se clasifican en dos grupos como se muestra seguidamente:

3.1.3.1. Oligoelementos o micronutrientes: Son los requeridos en pequeñas cantidades, por plantas y animales, disponibles para que los organismos completen su ciclo vital. Dentro de este grupo están: As, Co, Cr, Cu, Mo, Ni, Fe, Se y Zn.

3.1.3.2. Metales pesados sin función biológica: Cuya presencia de determinadas cantidades en seres vivos produce difusiones en el funcionamiento de su organismo. Entre estos se encuentran el Cd, Hg, Pb, Bi, Sn, Tl (Serpa 2017).

Los MP pueden contaminar por una variedad de razones y en una variedad de contextos, incluso a través de industrias químicas modernas, producción de fertilizantes, instalaciones de recubrimiento de metales, fabricación de baterías, pesticidas y producción de papel, la extracción de combustibles fósiles, curtiembres y la producción y uso de fabricación de diferentes plásticos son algunas de las fuentes portadoras de MP al medio ambiente (Fiyadh et al. 2019), en la **Tabla 3** se resumen varias actividades industriales generadoras de metales.

Tabla 3. Principales actividades industriales generadoras de metales pesados.

INDUSTRIA	METALES	PROCESO Y CONTAMINACIÓN DERIVADA
Pinturas y pigmentos	Pb, As, Cr, Zn, Ti, Ba	Residuos acuosos procedentes de la fabricación y el deterioro de la pintura vieja.
Aleaciones y aceros	Te, Pb, Ni, Cu, Zn, Cd, As, Te, Mo, U	Fabricación, eliminación y reciclaje de metales. Relaves y escoriales. Contaminación aguas y suelo.
Fundición	Pb, As, Cd, Tl	Procesado del mineral para obtención de metales, Contaminación atmosférica. Residuos sólidos.
Metalurgia	Cu, Cr, Mn, Zn, Pb, Sb	Procesado térmico de metales. Contaminación atmosférica.
Hidrocarburos	As, Cu, Cr, Fe, Hg, Ni, Pb, Ag, Mn	Proceso de exploración, explotación y refinería generando contaminación las aguas superficiales, subterráneas y del suelo.
Baterías	Pb, Sb, Zn, Cd, Ni, Hg	Fluido residual de la pila, la contaminación las aguas subterráneas y del suelo.
Gestión de residuos	Zn, Cu, Cd, Pb, Ni, Cr, Hg, Mn	Incineración de residuos o en lixiviados. Contaminación atmosférica, de las aguas superficiales, subterráneas y del suelo.
Corrosión metálica	Fe, Cr, Pb, Ni, Co, Zn	Inestabilidad de los metales expuestos al medio ambiente.
Galvanoplastia	Cr, Ni, Zn, Cu	Los efluentes líquidos de procesos de recubrimiento. Contaminación hídrica.
Minería de metales ferrosos	Cd, Cu, Ni, Cr, Co, Zn	Drenaje ácido de mina, relaves, escombreras. Generación de lodos.
Agricultura y ganadería	Cd, Cr, Mo, Pb, U, V, Zn, As, Mn, Cu	Contaminación de escorrentía, aguas superficiales y subterráneas, Producción de agroquímicos, la bioacumulación vegetal y animal.
Electrónica	Pb, Cd, Hg, Pt, Au, Cr, As, Ni, Mn	Residuos metálicos acuosos y sólidos desde el proceso de fabricación y reciclaje. Contaminación atmosférica e hídrica.
Servicios y otras actividades	Cd, Cr, Hg, Ag, Pb, Zn, Sn, Fe, Ni, Mo, V, Mn, Co	Atención a servicios de salud, Pompas fúnebres y actividades relacionadas, Generación de energía eléctrica.
Extracción de minerales	As, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn	Presencia en las menas como en los subproductos. Contaminación de las aguas superficiales, subterráneas y del suelo.

Tomado de: (Caviedes Rubio, Delgado, and Olaya Amaya 2016)

La toxicidad de los metales provoca la disminución de la función cerebral y nerviosa, daña el contenido sanguíneo, los pulmones, los riñones y otros órganos, provoca debilidad, pérdida de memoria, un aumento de las alergias, aumenta la presión arterial en el cuerpo humano. La muerte celular también se produce debido a la formación de radicales libres y estos radicales son responsables del estrés oxidativo. En la **tabla 4** se da a conocer varios efectos tóxicos para la salud a consecuencia de la ingesta de algunos MP.

Tabla 4. Consecuencias para la salud de algunos metales tóxicos.

METALES PESADOS	EFECTOS TÓXICOS
CADMIO	Insuficiencia renal, carcinógeno humano, osteomalacia, enfermedad itai-itai, debilita los huesos, enfermedades respiratorias, enfermedades gastrointestinales, defectos congénitos, anemia, inhibe el control del calcio en los sistemas biológicos.
CROMO	Genotóxico, alopecia
NIQUEL	Anafilaxia, cáncer de pulmón, pérdida de cabello, destruye glóbulos rojos, causa enfermedades hepáticas, nefrotóxico
PLOMO	Daña el desarrollo del cerebro infantil, insuficiencia renal, afecta los órganos sensoriales y el sistema circulatorio, pérdida de la función muscular voluntaria
COBRE	Enfermedad hepática, cáncer en el tracto respiratorio, falta de sangre, irritación estomacal e intestinal.
MERCURIO	Afecta las articulaciones del cuerpo humano, enfermedad renal, afecta los movimientos musculares, muerte, inconsciencia, aborto, muerte de células de la piel en humanos, inflamación de las encías, extremidades dolorosas, nerviosismo, afecta la visión, pérdida de memoria
ZINC	Crea mareos

Tomado de: (Carolin et al. 2017)

3.2. Desarrollo.

3.2.1. TIPOS DE ADSORBENTES USADOS EN LA RMP.

Para la RMP en AR's se identificaron dos categorías de material adsorbente, las cuales se clasifican según su origen y composición química.

3.2.1.1. Los adsorbentes convencionales: Principalmente constituidos por carbono activado, alúmina activada, arenas y zeolitas. Estos adsorbentes son previamente tratados y, una vez utilizados, deben regenerarse para recuperar sus propiedades. Estos materiales actúan como adsorbentes porque pueden formar interacciones intermoleculares débiles con el adsorbato (contaminante).

3.2.1.2. Los adsorbentes no-convencionales: (verdes o bioadsorbentes) surgen del aprovechamiento de los materiales de desecho que provienen de la industria alimentaria y agrícola; estos son desechos de fruta, residuos vegetales y plantas (Valladares et al. 2017).

En la **Ilustración 5** se da a conocer de manera resumida algunos de los tipos de adsorbentes utilizados para RMP, para dar una idea de la amplitud de opciones de adsorbentes con que se cuenta para el estudio de la adsorción en la RMP en AR's.



Ilustración 6. *Tipos de adsorbentes empleados en la RMP.*

3.2.2. COMPARACIÓN DE LAS EFICIENCIAS DE REMOCIÓN DE LOS TIPOS DE MATERIALES ADSORBENTES.

En las siguientes tablas se plasman los antecedentes de varios trabajos que dan información acerca de las eficiencias de adsorción de los materiales convencionales como (la bentonita, carbón activado y zeolitas naturales) y los no convencionales como por ejemplo (residuos de café molido, algas rojas, cáscara de naranja y tuna) usados para la RMP en AR's como el Plomo (Pb), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg) entre otros, con la finalidad de comparar dichas eficiencias de remoción que en algunos casos alcanzan unos valores entre 90 y el 99 %, esta comparación determina la viabilidad de empleo de cada tipo de adsorbente en cada caso de estudio, por tanto da una idea general en el rendimiento del proceso para futuros estudios que involucren estos tipos de adsorbentes.

Tabla 5. *Eficiencias de adsorción de algunos materiales convencionales en la RMP.*

Convencionales			
Especie	Trabajo	% Eficiencia	Ref.
Pb Cd Mn	ADSORCIÓN DE COLUMNA MULTIMETALES DE PLOMO (II), CADMIO (II) Y MANGANESO (II) EN ARCILLA DE BENTONITA NATURAL	29,1 % 23,5 % 6,7 %	(Alexander et al. 2017)
Pb/ANZ2 Li/ANZ2	MODELADO CINÉTICO PARA LA ADSORCIÓN DE METALES PESADOS CON ZEOLITA NATURAL JORDANIA DE BAJO COSTO (ESTUDIO DE COLUMNA DE CAMA FIJA)	94,55 % 99,54 %	(Dwairi, Omar, and Al-Harabsheh 2015)
Co Ni	ADSORCIÓN DE NÍQUEL Y COBALTO SOBRE CARBÓN ACTIVADO DE CASCARÓN DE COCO	99,6 % 98,21 %	(Penedo et al. 2015)

Fuente: Autor

Tabla 6. Eficiencias de adsorción de algunos materiales convencionales en la RMP.

No Convencionales			
Especie	Trabajo	% Eficiencia	Ref.
Hg	EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL RESIDUO DE CAFÉ MOLIDO EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO (II) EN MATRICES ACUOSAS.	97 %	(Pastrana and Mora 2017)
Pb y Cd	ADSORCIÓN CONTINUA DE PLOMO Y CADMIO DE CAMA FIJA SOBRE RESIDUOS DE CACAO	91,32 y 87,80% respectivamente	(Lara et al. 2016)
Cd, Pb y Zn	BIOSORCIÓN DE Cd, Pb y Zn POR BIOMASA PRETRATADA DE ALGAS ROJAS, CÁSCARA DE NARANJA Y TUNA	Cd y Pb, con promedios superiores al 95%; Zn se removió con mejor eficiencia (62%) al emplear tuna modificada	(Vizcano Mendoza and Fuentes Molina 2015)

Fuente: Autor

3.2.3. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL PROCESO DE ADSORCIÓN.

En la **tabla 7** se dan a conocer las ventajas y desventajas más sobresalientes del proceso de Adsorción de MP en AR's, donde se detalla que dicho proceso presenta condiciones de desarrollo favorables tales como la fijación de metales en presencia de otros logrando de esta manera la utilización en ciclos sucesivos de adsorción-desorción del adsorbente, por otro lado unas no favorables como las interacciones de los metales de la disolución y de adsorbentes con otros compuestos presentes en el AR pueden ocasionar cambios en las capacidades de retención, disminuyendo la eficacia del proceso. Por ello, es importante caracterizar adecuadamente las AR's a tratar para evitar interacciones indeseables y programar adecuadamente los ciclos de operación,

para conseguir el máximo aprovechamiento del sistema manteniendo las condiciones de calidad requeridas al efluente.

Tabla 7. *Ventajas y limitaciones de la adsorción en la eliminación de metales pesados.*

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Fácil de operar. Y presenta bajo costo económico y energético	El costo del adsorbente y su regeneración pueden ser muy altos
Permite la fijación de metales en presencia de otros cationes	La capacidad de adsorción es altamente dependiente del pH
Elevada eficacia, especialmente cuando la concentración de metal en el agua residual es baja	Las técnicas convencionales están ampliamente extendidas y son muy conocidas en diversos sectores industriales, lo que dificulta enormemente su sustitución
Es posible la regeneración de un gran número de adsorbentes, pudiéndose utilizar en ciclos sucesivos de adsorción-desorción. Y puede permitir la recuperación del metal tras el proceso de regeneración en el que se obtiene una solución concentrada en el compuesto de interés	Las interacciones de los metales de la disolución y de adsorbentes con otros compuestos presentes en el agua residuales pueden ocasionar cambios en las capacidades de retención, disminuyendo la eficacia del proceso. Por ello, es importante caracterizar adecuadamente las aguas residuales a tratar para evitar interacciones indeseables y programar adecuadamente los ciclos de operación, para conseguir el máximo aprovechamiento del sistema manteniendo las condiciones de calidad requeridas al efluente
La adsorción no genera fangos químicos, y el único residuo del proceso es el adsorbente agotado	Es necesario eliminar los materiales en suspensión antes de que el efluente sea tratado

Fuente: (Altamirano 2015) (Murrieta 2019) (Reyes Toriz et al. 2006) y elaboración propia.

3.2.4. ANÁLISIS DE LAS MODIFICACIONES REALIZADAS AL PROCESO INICIAL DE ADSORCIÓN.

A continuación, se dan a conocer algunas de las modificaciones o mejoras realizadas al proceso de adsorción para aumentar la eficiencia del proceso.

3.2.4.1. Empleo de biomateriales: Estudios recientes han establecido el uso de metodologías alternativas para la adsorción de contaminantes, tales como los MP, que emplean materiales de origen biológico como bacterias, algas y hongos, residuos industriales, agrícolas y urbanos, debido a su gran viabilidad, bajo costo y alta eficiencia de remoción (Vizcano Mendoza and Fuentes Molina 2015). La bioadsorción es un proceso fisicoquímico que incluye los fenómenos de adsorción y absorción de iones y moléculas. Este método poco convencional busca principalmente RMP de AR's provenientes del sector industrial (Tejada Tovar et al. 2015). (Altamirano 2015) en su estudio “Remoción de Pb^{+2} por medio de adsorción en quitosano” da un ejemplo del empleo de un biomaterial, en este caso un biopolímero (quitosano) obteniendo como resultados porcentajes de eficiencia de adsorción se por encima del 80%, lo que demuestra que el proceso es adecuado para la eliminación de metales en agua mediante quitosano.

3.2.4.2. Combinación de materiales adsorbentes: (Salazar and Rodriguez 2017) en su investigación “Desarrollo y evaluación de un material adsorbente a partir de residuos orgánicos para la adsorción de Cu^{+2} en soluciones sintéticas” consideraron a la cáscara de huevo, conchas marinas, carbón activado y arcilla tipo bentonita como los adsorbentes de estudio, concluyendo que la mezcla más adecuada para obtener máximos rendimientos de remoción del catión Cu^{+2} son: Relación de mezcla cáscara de huevo/conchas marinas = 0.25, Temperatura de sinterización = 1000°C, Tiempo de sinterización = 1 hora, Remoción de catión Cu^{+2} = 99.88% y Composición de mezcla: 10% cáscara de huevo, 40% conchas marinas, 5% carbón activado y 45% arcilla bentonita.

3.2.4.3. Combinación de materiales adsorbentes y biomateriales: (Yang et al. 2019) reportaron en su trabajo un nuevo escenario para eliminar MP titulado “Un método novedoso para eliminar metales pesados del sistema de compostaje: la combinación de bacterias funcionales y materiales adsorbentes” utilizando un método de combinación bacterias funcionales y materiales adsorbentes, en esta ocasión se usó la esponja y el algodón. Obteniendo buenos resultados de eliminación de MP como Cr en un rango del 19.09% – 26.36% de eficiencia.

3.2.4.3. Funcionalización o modificación de la superficie con nanomateriales: La modificación de la superficie también se ha realizado para desarrollar materiales huecos nanoestructurados y/o nanocompuestos multifuncionales, para alterar sus propiedades de volumen, así como para personalizar sus propiedades de superficie como densidad de carga, reactividad, funcionalidad, biocompatibilidad, estabilidad y dispensabilidad. La funcionalización o modificación de la superficie se presenta aquí como una forma de eliminar las restricciones destacadas o limitaciones inherentes que presentan los materiales adsorbentes (Manyangadze et al. 2020). El rendimiento de adsorción de los adsorbentes también podría estimularse mediante la introducción de nanopartículas con estructuras especiales por varios métodos como muestran (Huang et al. 2020) en su trabajo de recopilación, donde se ha combinado la biomasa con materiales nano magnéticos, que tienen la estructura especial para mejorar el rendimiento de adsorción de los bioadsorbentes.

CAPITULO IV Resultado y Discusión.

4.1. RESULTADOS.

4.1.1. La Adsorción: Se llevó a cabo una investigación detallada sobre la adsorción como método alternativo para RMP en AR's, mediante la búsqueda de información en bases de datos científicas, encontrando de manera clara y precisa que; El proceso de adsorción se percibe actualmente como el método de tratamiento más económico, eficiente y selectivo para la eliminación de MP de las AR's. Este proceso proporciona flexibilidad en la operación y el diseño en la recuperación completa de MP de las AR's. Además que la adsorción es una operación de transferencia de masa sólido-líquido, donde el metal pesado (adsorbato) se migra desde el AR a la superficie sólida (llamado adsorbente) y luego se adhiere debido a la adsorción química o física sobre la superficie adsorbente (Vardhan, Kumar, and Panda 2019).

4.1.2. Tipos de Adsorbentes usados en la RMP: En la adsorción intervienen una gama de materiales convencionales y no convencionales que actúan como adsorbentes de MP en soluciones acuosas, siendo los no convencionales (biomateriales) los más utilizados, ya que están disponibles en una gran cantidad, como los productos de desecho agrícola y los subproductos o desechos industriales, esto es debido a que los recursos naturales en el medio ambiente se cultivan en un período más corto por el desarrollo las actividades agrícolas y estos recursos se consideran activos inagotables(Vardhan et al. 2019).

4.1.3. Comparación de las eficiencias de remoción de los tipos de materiales adsorbentes: En las **tablas 5 y 6** se observa que los materiales adsorbentes tanto convencionales como no convencionales poseen excelentes eficiencias de adsorción en la RMP en AR's, pero en comparación con los adsorbentes convencionales, los bioadsorbentes o adsorbentes no convencionales tienen las ventajas de fácil disponibilidad, bajo costo, eficiencia de adsorción

atractiva, operación simple, reutilización satisfactoria y libres de la formación de contaminantes como se ha mencionado anteriormente, además de tener la capacidad de adsorber selectivamente y eliminar contaminantes del medio ambiente del agua (Huang et al. 2020).

4.1.4. Ventajas y Desventajas del proceso de adsorción: En la **tabla 7** se expresan algunas de las ventajas y desventajas del proceso de adsorción, encontrando que este proceso para la RMP es apropiado por varias razones tales como; la tecnología utilizada es fácil de operar y no presenta un alto costo tanto económico como energético, haciéndola más rentable desde el punto de vista económico y por ende convirtiéndola en una de las técnicas más aplicadas en los procesos de adsorción de MP. Otras de las razones más importantes es la alta eficiencia de retención de MP que presenta y la posible regeneración de los materiales usados como adsorbentes. Pero una de las limitantes más relevantes es su dependencia del pH, ya que debido a este se pueden presentar interacciones entre iones H^+ o H^- presentes en la solución con los sitios activos de la superficie del adsorbente y además por la posible adsorción competitiva con otros iones metálicos con afinidad de dichos sitios activos, como se explica en la **Ilustración 3**, donde estos parámetros pueden aumentar o disminuir la captación de los iones metálicos.

4.1.5. Análisis de las modificaciones realizadas al proceso de adsorción: Se encontró que no solamente los adsorbente convencionales y no convencionales son empleados para la RMP en AR's, sino que existe una variedad de alternativas como el empleo biomateriales, la combinación de materiales adsorbentes convencionales, combinación de estos últimos y la modificación superficial del adsorbente mediante la presencia de nanomateriales.

4.2. DISCUSIÓN.

Los niveles de salubridad ambiental se alcanzan realizando tareas conjuntas de acciones técnicas y socioeconómicas que permiten el desarrollo y promoción de las políticas de salud pública, las cuales van de la mano con los objetivos de la gestión ambiental, articulándose de esta manera para el mejoramiento de la investigación y estudio de las distintas formas de contaminación y fortalecimiento de los protocolos para el desarrollo de un Plan Integral de Saneamiento Básico satisfactorio que abarque todos los programas de salubridad ambiental. Uno de los programas primordiales es la potabilización del agua apta para el consumo humano y su manejo adecuado. En este programa además se analiza la generación de AR's, la cual es una de las formas de contaminación por la acción de los MP presente en ellas, como se mencionó anteriormente y como se explica en las ilustraciones 4, 5 (a) y 5 (b). La presencia de estos MP genera consecuencias adversas como se da a conocer en la **tabla 4** tanto para los seres vivo presentes en las fuentes hídricas como para el ser humano, de allí la importancia de la remoción y el tratamiento de estas fuentes contaminadas. Para reducir la contaminación del agua, numerosos métodos de tratamiento como la coagulación-floculación, intercambio iónico, ósmosis inversa entre otros se han estudiado presentando sus ventajas y desventajas como se detalla en la **tabla 1**, pero el interés considerable de los investigadores se ha dirigido hacia la adsorción de iones de metales pesados de las aguas residuales mediante el uso de diversos materiales naturales (Božić et al. 2013), ya que entre las diferentes tecnologías de tratamiento de agua, la adsorción es un proceso potencial y competitivo, porque es relativamente simple de operar y genera bajos desechos secundarios (Zhang et al. 2020). Anteponiéndose de esta manera delante de las demás técnicas o métodos debido a su versatilidad y a la variedad de configuraciones adsorbente/adsorbato con que se cuenta para el estudio de la adsorción en la RMP en AR's, encontrando que las configuraciones con adsorbentes no

convencionales tienen las ventajas de fácil disponibilidad, bajo costo, eficiencia de adsorción atractiva, operación simple, reutilización satisfactoria y libres de la formación de contaminantes, además de presentar altas eficiencias de remoción y algunas ventajas como se ha mencionado en la **tabla 6** y **7** respectivamente. Otro de los motivos que hacen a la adsorción atractiva para los científicos ha sido su pulimiento a través de las modificaciones logradas en el tiempo para alcanzar mayores rendimientos de operación por medio del uso de tecnologías adecuadas, entre estas modificaciones se encuentran muchas matrices de combinación simple y compleja que se desarrollan para estudiar sus propiedades de superficie tales como: la densidad de carga, la reactividad, funcionalidad, biocompatibilidad, estabilidad y dispensabilidad, ya que estas propiedades influyen directamente en el rendimiento del proceso de adsorción y por lo tanto en el TAR para la eliminación de MP. En resumen los científicos continúan haciendo sus investigaciones adicionales con el objetivo único de obtener una tecnología más viable desde el punto de vista económico y más sostenible para el medio ambiente que pueda proporcionar el nivel más bajo de iones de MP en un efluente tratado que será lo suficientemente bajo como para descargarse de manera segura en una superficie corriente de agua (Božić et al. 2013).

CAPITULO V Conclusiones, Referencias Bibliográficas y Anexos.

5.1. CONCLUSIONES.

La identificación de los tipos de materiales usados como adsorbentes en la RMP en AR's se realizó mediante un estudio bibliográfico donde se encontraron dos categorías que según su origen y composición química se clasifican en convencionales y no convencionales. Esta identificación se realizó con el fin de comparar las eficiencias de remoción de dichos materiales adsorbentes y de establecer los rendimientos del proceso de adsorción, hallándose que los no convencionales son los más utilizados debido a que alcanzan valores entre 90 y el 99 % en sus eficiencias de remoción y además por ser productos de desecho agrícola y subproductos o desechos industriales convirtiéndolos en fuentes disponibles en gran cantidad.

El proceso de adsorción tiene las características de ser fácil de operar y no presentar un alto costo económico y energético además tiene su dependencia al pH del sistema, estas características se determinaron como algunas las ventajas y desventajas de la adsorción como alternativa en la RMP. Por tal razón se analizaron las modificaciones realizadas al proceso de adsorción inicial, para estudiar las mejoras aplicadas, donde se evidenció que la eficiencia del proceso de remoción se vio favorecida logrando porcentajes aceptables en todos los casos estudiados.

El estudio del proceso la adsorción como método alternativo para el tratamiento de AR's, en la RMP se llevó a cabo como profundización y entendimiento de los TC terciarios, para atajar la contaminación generada por los vertimientos de AR a fuentes hídricas, impactando de manera positiva al cuidado del agua y fortaleciendo los protocolos existentes en la gestión ambiental. Dándole de esta manera una valoración importante al proceso de adsorción en la RMP como una opción de tratamiento previo eficaz y eficiente para ser empleada.

5.2. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Alexander, Jock Asanja, Abdulsalam Surajudeen, El Nafaty Usman Aliyu, Aroke Umar Omeiza, and Muhammad Abbas Ahmad Zaini. 2017. "Multi-Metals Column Adsorption of Lead(II), Cadmium(II) and Manganese(II) onto Natural Bentonite Clay." *Water Science and Technology* 76(8):2232–41.
- Altamirano, Monserrat. 2015. "Remoción de Pb (II) Por Medio de Adsorción En Quitosano." (Noviembre):55.
- Arroyo Ramírez, Laura Daniela, and Diana María Ruiz Rivera. 2018. "DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE CLORUROS DE VERTIMIENTOS DEL SECTOR AGRÍCOLA CULTIVOS ENERGÉTICOS, SOBRE CARBÓN ACTIVADO COMERCIAL." Fundación Universitaria de América.
- Božić, Dragana, Milan Gorgievski, Velizar Stanković, Nada Štrbac, Snežana Šerbula, and Nevenka Petrović. 2013. "Adsorption of Heavy Metal Ions by Beech Sawdust - Kinetics, Mechanism and Equilibrium of the Process." *Ecological Engineering* 58:202–6.
- Bracho Luzardo, Mildred, Paula Marcos Barquilla, Laura Moreno Arias, and José Antonio Olivares Peña. 2016. "Tratamiento No Convencional de Las Aguas Residuales Urbanas de Tucaní, Venezuela." Escuela de Organización Industrial.
- Carolin, C. Femina, P. Senthil Kumar, A. Saravanan, G. Janet Joshiba, and Mu Naushad. 2017. "Efficient Techniques for the Removal of Toxic Heavy Metals from Aquatic Environment: A Review." *Journal of Environmental Chemical Engineering* 5(3):2782–99.
- Caviedes Rubio, Diego Iván, Daniel Ricardo Delgado, and Alfredo Olaya Amaya. 2016. "Remoción de Metales Pesados Comúnmente Generados Por La Actividad Industrial,

- Empleando Macrófitas Neotropicales.” *Producción + Limpia* 11(2):126–49.
- Chacaltana Torres, Gianluigi. 2018. “Uso de Borra de Café Como Bioadsorbente Para La Remoción de Cadmio y Plomo Disuelto En El Agua Del Río Añasmayo Sector La Perla-Huaral, 2018.” *Universidad César Vallejo*.
- Cor, M. C., Alfredo Isaías Sosa Lechuga, and Oscar Galo Ayala García. 2004. “Saneamiento Ambiental de Las Unidades Operativas Militares.” 58(1):223–27.
- Dwairi, Reyad Al, Waid Omar, and Sura Al-Harabsheh. 2015. “Kinetic Modelling for Heavy Metal Adsorption Using Jordanian Low Cost Natural Zeolite (Fixed Bed Column Study).” *Journal of Water Reuse and Desalination* 5(2):231–38.
- Fiyadh, Seef Saadi, Mohammed Abdulhakim AlSaadi, Wan Zurina Jaafar, Mohamed Khalid AlOmar, Sabah Saadi Fayaed, Nuruol Syuhadaa Mohd, Lai Sai Hin, and Ahmed El-Shafie. 2019. “Review on Heavy Metal Adsorption Processes by Carbon Nanotubes.” *Journal of Cleaner Production* 230:783–93.
- Galán, José. 2013. “PREPARACIÓN Y SÍNTESIS DE MATERIALES ADSORBENTES PARA LA ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES EN EFLUENTES ACUOSOS.” UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID.
- Garba, Zaharaddeen N., Lawan, Weiming Zhou, Mingxi Zhang, Liwei Wang, and Zhanhui Yuan. 2020. “Microcrystalline Cellulose (MCC) Based Materials as Emerging Adsorbents for the Removal of Dyes and Heavy Metals – A Review.” *Science of the Total Environment* 717(Mcc):135070.
- García, Natalia. 2014. “UNA NUEVA GENERACIÓN DE CARBONES ACTIVADOS DE

ALTAS PRESTACIONES PARA APLICACIONES MEDIOAMBIENTALES.”

Universidad de Oviedo.

Granados Correa, Francisco, Juan Serrano Gómez, and Juan Bonifacio Martínez. 2010. “Síntesis y Caracterización de Materiales Inorgánicos Para Ser Empleados Como Adsorbentes de Metales Tóxicos y de Interés Nuclear.” *Contribuciones Del Intituto Nacional de Investigaciones Nucleares Al Avance de La Ciencia y La Tecnología En México* 3–4.

Granados, Yurley. 2015. “EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LA REMOCIÓN DE NITRÓGENO TOTAL Y ORTOFOSFATO DE AGUAS RESIDUALES POR *Chlorella Sp.*, EN UN FOTOBIORREACTOR AIRLIFT.” UNIVERSIDAD DE PAMPLONA.

Gutiérrez, Jorge Fernando. 2016. “Calidad de Los Servicios de Saneamiento Básico y Su Relación Con La Satisfacción Del Usuario en El Distrito de Juanjui-Provincia de Mariscal Cáceres 2016.” Universidad César Vallejo.

Huang, Danlian, Bo Li, Jing Ou, Wenjing Xue, Jing Li, Zhihao Li, Tao Li, Sha Chen, Rui Deng, and Xueying Guo. 2020. “Megamerger of Biosorbents and Catalytic Technologies for the Removal of Heavy Metals from Wastewater: Preparation, Final Disposal, Mechanism and Influencing Factors.” *Journal of Environmental Management* 261(June 2019).

Lara, José, Candelaria Tejada, Ángel Villabona, and Alfonso Arrieta. 2016. “Adsorption of Lead and Cadmium in Continuous of Fixed Bed on Cocoa Waste.” *Revista ION VO - 29* 29(2):113.

Lezcano, Dallan. 2019. “APLICACIÓN DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS PROVENIENTES DE LA PRODUCCIÓN DEL QUESO.” UNIVERSIDAD DE PAMPLONA.

Lizarazo, Jenny, and Martha Orjuela. 2013. "SISTEMAS DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN COLOMBIA." Universidad Nacional de Colombia.

Manyangadze, M., N. H. M. Chikuruwo, T. B. Narsaiah, C. S. Chakra, M. Radhakumari, and G. Danha. 2020. "South African Journal of Chemical Engineering Enhancing Adsorption Capacity of Nano-Adsorbents via Surface Modified Cation : A Review." *South African Journal of Chemical Engineering* 31(September 2019):25–32.

Martín, Mila. 2011. "Tratamiento de Depuración de Aguas II: Tratamientos Convencionales | Gestión Ambiental Municipal." Retrieved May 5, 2020 (<http://tecnicoambientalenreciclaje.blogspot.com/2011/11/tratamiento-de-depuracion-de-aguas-ii.html>).

Murrieta, Lleyly. 2019. "Evaluación de La Capacidad de Adsorción Del Carbón Activado Mediante Cáscara de Naranja (Citrus Cinensis) Para La Remoción de Iones de Arsénico En Aguas Residuales Industriales."

Del Paso Weppen, Alina. 2019. "Tratamiento de Aguas Residuales de La Industria de Acabados Metálicos." Universidad de las Américas Puebla.

Pastrana, Jhonny, and Nubia Mora. 2017. "EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DEL RESIDUO DE CAFÉ MOLIDO EN LA REMOCIÓN DE MERCURIO (II) EN MATRICES ACUOSAS." Universidad de Nariño.

Patiño, Angie. 2019. "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FOTOBIOREACTOR AIR-LIFT PARA LA LA REMOCIÓN DE NUTRIENTES EN AGUAS RESIDUALES URBANAS CON LA MICROALGA *Chlorella Vulgaris*." UNIVERSIDAD DE PAMPLONA UNIVERSIDAD.

- Penedo, Margarita, Enma Manals, Frank Vendrell, and Dolores Salas. 2015. "Adsorción de Níquel y Cobalto Sobre Carbón Activado de Cascarón de Coco." *Tecnología Química* XXXV(1):7.
- Reyes Toriz, Erik, Felipe Cerino Córdova, and Martha Suárez Herrera. 2006. "Remoción de Metales Pesados Con Carbón Activado Como Soporte de Biomasa." *Ingenierías* (31):3.
- Rodríguez, Andrea Carolina, Ana María Campos Rosario, and Alejandro Pérez Flores. 2019. "Obtención y Caracterización de Materiales Adsorbentes a Partir de Cascarilla de Arroz." *Revista Mutis* 9(1):29–39.
- Rodriguez, María S., Liliana B. Moraña, María M. Salusso, and Lucas Seghezzo. 2017. "Spatial and Seasonal Characterization of the Drinking Water from Various Sources in a Peri-Urban Town of Salta." *Revista Argentina de Microbiología* 49(4):366–76.
- Romero Hernández, Vicent. 2017. "MATERIALES POLIMÉRICOS PROVENIENTES DE RESIDUOS VEGETALES, USADOS EN SÍNTESIS DE ADSORBENTES PARA REMOCIÓN DE IONES METÁLICOS Y COLORANTES PRESENTES EN AGUAS RESIDUALES." UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO.
- Salazar, Delia, and Lisethe Rodriguez. 2017. "DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN MATERIAL ADSORBENTE A PARTIR DE RESIDUOS ORGANICOS PARA LA ADSORCION DE Cu^{+2} EN SOLUCIONES SINTETICAS." UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO.
- Serpa, Margarita. 2017. "Remoción de Metales Pesados de Cd y Hg En Lodos Residuales de La Laguna de Estabilización Secundaria El Espinar- Puno, Utilizando Vermicomposteo." UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO.
- Sosa, Griselda L., and Anita Zalts. 2012. "Adsorción de Colorantes Sobre Tierra de Diatomeas." UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO.

Un Trabajo de Laboratorio Con Enfoque Ambiental.” *Educacion Quimica Para Unfuturo Sostenible* 23(4):492–97.

Tejada Tovar, Candelaria, Ángel Villabona Ortiz, and Luz Gárces Jaraba. 2015. “Adsorción de Metales Pesados En Aguas Residuales Usando Materiales de Origen Biológico.” 18(34):109–23.

UNESCO. 2006. *UN World Water Development Report 2*.

Valladares, María, Cintya Valerio, Patricia De la Cruz, and Rosa Melgoza. 2017. “Adsorbentes No-Convencionales, Alternativas Sustentables Para El Tratamiento de Aguas Residuales.” 16(31):55–73.

Vardhan, Kilaru Harsha, Ponnusamy Senthil Kumar, and Rames C. Panda. 2019. “A Review on Heavy Metal Pollution, Toxicity and Remedial Measures: Current Trends and Future Perspectives.” *Journal of Molecular Liquids* 290:8.

Vizcano Mendoza, Lissette, and Natalia Fuentes Molina. 2015. “Biosorción de Cd, Pb y Zn Por Biomasa Pretratada de Algas Rojas, Cáscara de Naranja y Tuna.” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* 25(1):43.

Yang, Kangjie, Longji Zhu, Yue Zhao, Zimin Wei, Xiaomeng Chen, and Changhao Yao. 2019. “A Novel Method for Removing Heavy Metals from Composting System : The Combination of Functional Bacteria and Adsorbent Materials.” *Bioresource Technology* 293(August):122095.

Zhang, Yanhao, Yuchen Wang, Haohan Zhang, Yang Li, Zhibin Zhang, and Wen Zhang. 2020. “Recycling Spent Lithium-Ion Battery as Adsorbents to Remove Aqueous Heavy Metals:

Adsorption Kinetics, Isotherms, and Regeneration Assessment.” *Resources, Conservation and Recycling* 156(October 2019):1.