

1era Ed.
2024



PUERTO MADERO
EDITORIAL

PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS



PATRICIO VLADIMIR MÉNDEZ ZAMBRANO
ANGEL PATRICIO FLORES OROZCO
EDISON MARCELO MELENDRES MEDINA
LUIS PATRICIO TIERRA PÉREZ

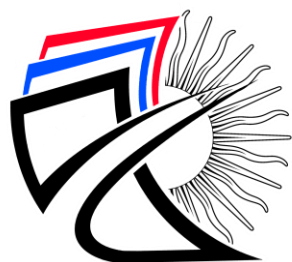


puertomaderoeditorial.com.ar



La Plata - Argentina

PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS



PUERTO MADERO
EDITORIAL

PROCESOS DE ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS

AUTORES:

Patricio Vladimir Méndez Zambrano

Angel Patricio Flores Orozco

Edison Marcelo Melendres Medina

Luis Patricio Tierra Pérez



Procesos de eliminación de metales pesados / Patricio Vladimir Méndez Zambrano...
[et al.] ; Editado por Juan Carlos Santillán Lima ; Guido Patricio Santillán Lima. -
1a ed - La Plata : Puerto Madero Editorial Académica, 2024.
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online
ISBN 978-631-6557-38-4

1. Metales Pesados. I. Méndez Zambrano, Patricio Vladimir II. Santillán Lima, Juan
Carlos, ed. III. Santillán Lima, Guido Patricio, ed.
CDD 363.7288



Licencia Creative Commons:

Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)



Primera Edición, Agosto 2024

Procesos de eliminación de metales pesados

ISBN: 978-631-6557-38-4

Editado por:

Sello editorial: ©Puerto Madero Editorial Académica
Nº de Alta: 933832

Editorial: © Puerto Madero Editorial Académica

CUIL: 20630333971

Calle 45 N491 entre 4 y 5

Dirección de Publicaciones Científicas Puerto Madero Editorial

Académica

La Plata, Buenos Aires, Argentina

Teléfono: +54 9 221 314 5902

+54 9 221 531 5142

Código Postal: AR1900

Este libro se sometió a arbitraje bajo el sistema de doble ciego (peer review)

Corrección y diseño:

Puerto Madero Editorial Académica

Diseñador Gráfico: José Luis Santillán Lima

Diseño, Montaje y Producción Editorial:

Puerto Madero Editorial Académica

Diseñador Gráfico: Santillán Lima, José Luis

Director del equipo editorial: Santillán Lima, Juan Carlos

Editor: Santillán Lima, Juan Carlos
Santillán Lima, Guido Patricio

Hecho en Argentina
Made in Argentina

AUTORES:

Patricio Vladimir Méndez Zambrano

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Sede Morona Santiago. Morona. Ecuador

patricio.mendez@esPOCH.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0002-4305-8152>

Angel Patricio Flores Orozco

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Sede Morona Santiago. Morona. Ecuador

angel.flores@esPOCH.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0003-1484-2949>

Edison Marcelo Melendres Medina

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Sede Morona Santiago. Morona. Ecuador

edison.melendres@esPOCH.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0002-0234-9594>

Luis Patricio Tierra Pérez

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Sede Morona Santiago. Morona. Ecuador

patricio.tierra@esPOCH.edu.ec



<https://orcid.org/0000-0003-3366-7867>

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	<i>xi</i>
RESUMEN	1
PROLOGO	2
INTRODUCCIÓN	5
CAPITULO I.	11
1 PRINCIPALES INDUSTRIAS GENERADORAS DE METALES PESADOS	11
1.1 Introducción	11
1.2 Industrias generadoras de metales pesados	12
1.2.1 Industria minera	12
1.3 Industria química	14
1.4 Industria metalúrgica	16
1.5 Materiales utilizados en la fabricación	17
1.6 Procesos de fabricación	17
1.7 Control de calidad en la producción	18
1.8 Innovaciones tecnológicas en el sector	19
1.9 Síntomas y efectos de la intoxicación por metales pesados en poblaciones expuestas a aguas residuales industriales	19
1.9.1 Definición de intoxicación por metales pesados	19
1.9.2 Importancia de las aguas residuales industriales como fuente de exposición	20
1.9.3 Síntomas de la intoxicación por metales pesados	20
1.9.4 Síntomas físicos	20
1.9.5 Síntomas neurológicos	21
1.9.6 Síntomas gastrointestinales	21
1.10 Daños ocasionados en el ambiente por la presencia de metales pesados	21
CAPITULO II.	24
2 CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR METALES PESADOS	24
2.1 Introducción	24
2.2 Importancia del agua	25
2.3 Aguas residuales	27
2.4 Contaminación por metales pesados	28

2.5	Cadmio	30
2.6	Cromo	35
2.7	Cobre	40
2.8	Plomo	43
2.9	Zinc	46
CAPITULO III.		51
3_ TECNICAS CONVENCIONALES PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN LAS AGUAS RESIDUALES		51
3.1	Introducción	51
3.2	Precipitación química	52
3.3	Coagulación-floculación	55
3.4	Sedimentación/flotación.	60
3.5	Filtración por membranas	65
3.6	Intercambio iónico	69
3.7	Técnicas electrolíticas	71
3.8	Biorremediación	75
CAPITULO IV.		80
4 TECNICAS NO CONVENCIONALES PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS		80
4.1	Introducción	80
4.2	Fundamentos de la absorción	82
4.2.1	Tratamiento de efluentes con materiales de adsorción	83
4.2.2	Relaciones de equilibrio. Isotermas de adsorción.	84
4.2.3	Modelo de Isoterma de Langmuir	86
4.2.4	Modelo de Isoterma de Freundlich	87
4.2.5	Cinética de adsorción	87
4.3	Adsorbentes de bajo costo y nuevos adsorbentes	90
CAPITULO V.		109
5 HUMEDALES ARTIFICIALES EN LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS DE LAS AGUAS RESIDUALES		109
5.1	Introducción	109
5.2	Definición de humedal artificial	111
5.3	Aplicación de los humedales artificiales	120
5.4	Humedales artificiales como técnica en la depuración de las aguas residuales	121

5.5	Mecanismos básicos de depuración de un humedal artificial	124
5.6	Situación actual de los humedales artificiales	126
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		136
AUTORES		145
PATRICIO VLADIMIR MÉNDEZ ZAMBRANO		145
ANGEL PATRICIO FLORES OROZCO		146
EDISON MARCELO MELENDRES MEDINA		147
LUIS PATRICIO TIERRA PÉREZ		148

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	12
Industria minera	12
Figura 2.	13
Proceso de extracción minera	13
Figura 3.	15
Industria química	15
Figura 4.	16
Industria metalúrgica	16
Figura 5.	18
Proceso de elaboración de hierro	18
Figura 6.	30
Flujo del cadmio en el medio ambiente.	30
Figura 7	56
Fases de la coagulación.	56
Figura 8.	58
Equipo para pruebas de jarra.	58
Figura 9	58
Cámara de mezcla con agitación rápida	58
Figura 10.	59
Floculadores hidráulicos.	59
Figura 11.	62
Esquema tanque de sedimentación	62
Figura 12.	63
Esquema flotación por aire disuelto	63
Figura 13.	66
Tipos de filtración por membrana	66
Figura 14.	70
Esquema del proceso de intercambio iónico	70
Figura 15.	72
Electrodialisis	72
Figura 16.	73
Esquema de equipo de Electrocoagulación	73
Figura 17.	75
Mecanismos de eliminación de metales pesados mediados por bacterias	75
Figura 18.	77
Esquema de Biofiltro.	77
Figura 19.	86
Representación gráfica de la adsorción	86

<i>Figura 20.</i>	90
<i>Representación de una columna de adsorción con carbón activado</i>	90
<i>Figura 21.</i>	92
<i>Mecanismos involucrados en la bioadsorción utilizando subproductos agroindustriales</i>	92
<i>Figura 22.</i>	95
<i>Representación esquemática de tres sistemas para la depuración de aguas residuales con bioadsorbente.</i>	95
<i>Figura 23.</i>	99
<i>Formación de hidrogel compuesto para la adsorción de iones metálicos</i>	99
<i>Figura 24.</i>	99
<i>Adsorción de metales pesados por fragmentos de biopolímero</i>	100
<i>Figura 25.</i>	100
<i>Difusión / adsorción de iones de metales en hidrogeles compósitos</i>	100
<i>Figura 26.</i>	101
<i>Estructura del quitosano</i>	101
<i>Tabla 12.</i>	102
<i>Compuestos en las cenizas con alto y bajo contenido de calcio</i>	102
<i>Figura 27.</i>	104
<i>Jacinto de agua (Eichhornia crassipes)</i>	104
<i>Figura 28.</i>	106
<i>Comportamiento de las concentraciones de metales pesados de las muestras 1 y 2 (M1 y M2).</i>	106
<i>Figura 29</i>	111
<i>Construcción de un humedal artificial</i>	111
<i>Figura 30.</i>	113
<i>Operario de humedal artificial</i>	113
<i>Figura 31.</i>	115
<i>Humedal artificial de flujo superficial</i>	115
<i>Figura 32.</i>	117
<i>Humedal artificial de flujo subsuperficial</i>	117
<i>Figura 33.</i>	118
<i>Tipos de humedales artificiales</i>	118
<i>Figura 34.</i>	119
<i>Tipos de plantas utilizadas en el diseño de humedales artificiales</i>	119
<i>Figura 35.</i>	126
<i>Funcionamiento de la depuración de aguas residuales con plantas</i>	126
<i>Figura 35.</i>	127
<i>Prototipo del proyecto "Humedales artificiales: Una técnica verde para el tratamiento de aguas grises"</i>	127
<i>Figura 36.</i>	131

<i>Acondicionamiento del material filtrante</i>	131
<i>Figura 37.</i>	131
<i>Adaptación de la especie Schoenoplectus californicus (totorá) en los humedales artificiales</i>	131
<i>Figura 38.</i>	132
<i>Prueba de flujo</i>	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. _____	32
Principales características de este elemento metálico _____	32
Tabla 2. _____	37
Principales características del cromo _____	37
Tabla 3. _____	41
Características del plomo. _____	41
Tabla 4. _____	44
Características del plomo _____	44
Tabla 5. _____	47
Características del Zinc _____	47
Tabla 6. _____	67
Aplicación de ósmosis inversa para la remoción de metales pesados. _____	67
Tabla 7. _____	68
Estudios de aplicación de nanofiltración para la remoción de metales pesados. _____	68
Tabla 8. _____	69
Estudios de aplicación de ultrafiltración para la remoción de metales pesados. _____	69
Tabla 9. _____	71
Estudios de aplicación de uso de intercambio iónico a través de resinas en la remoción de metales pesados. _____	71
Tabla 10. _____	74
Estudios de aplicación de electrocoagulación para la remoción de metales pesados. _____	74
Tabla 11. _____	74
Estudios de aplicación de electrofloculación para la remoción de metales pesados. _____	74
Tabla 12. _____	93
Capacidad máxima de bioadsorción para distintos subproductos agroindustriales _____	93
Tabla 13. _____	103
Condiciones experimentales de absorción de metales pesados con cenizas volantes _____	103
Tabla 14. _____	105
Concentración de metales pesados antes de la fitorremediación _____	105
Tabla 15. _____	105
Concentración de metales pesados después de la fitorremediación _____	105
Tabla 16. _____	118
Tipos de plantas utilizadas en el diseño de humedales artificiales _____	118
Tabla 17. _____	119
Comparación entre humedales artificiales según el tipo de flujo _____	119
Tabla 18. _____	123
Porcentaje de eliminación de contaminantes en función del tiempo de maduración de la planta _____	123
Tabla 19. _____	123

<i>Porcentaje de remoción de contaminantes según el tipo de gramínea</i>	123
<i>Tabla 20.</i>	133
<i>Técnicas e instrumento para la medición de los parámetros del proyecto</i>	133

RESUMEN

El presente libro aborda de manera clara y precisa la contaminación de las aguas residuales por metales pesados. La obra se divide en 5 capítulos a través de los cuales se van desarrollando diversos tópicos que giran en torno a la temática central. En el primer capítulo se describen cuáles son las principales industrias generadoras de metales pesados, haciendo énfasis en la industria minera, la industria química y en la industria metalúrgica. En este capítulo también se describen los principales síntomas y efectos debido a la intoxicación por metales pesados y los daños que estos ocasionan en el ambiente. En el capítulo dos se profundiza sobre la contaminación de aguas residuales debido a la presencia de metales pesados, específicamente por cromo, cadmio, cobre, plomo y zinc. En el tercer capítulo se describen las técnicas convencionales para la eliminación de estos metales en las aguas residuales, detallando los fundamentos de la precipitación química, la coagulación / floculación, la sedimentación / flotación, la separación por membranas, el intercambio de iones, las técnicas electrolíticas y la biorremediación, para posteriormente, en el capítulo cuatro, describir las técnicas no convencionales empleadas para el mismo fin. Finalmente, el capítulo cinco trata sobre los humedales artificiales y su empleo para la eliminación de metales pesados presentes en las aguas residuales.

PROLOGO

El tratamiento de aguas residuales es un proceso fundamental para conservar los ecosistemas y resguardar la salud de la población. Actualmente, la contaminación de las fuentes hídricas es uno de los mayores retos a nivel ambiental que deben abordar diversos países. En la depuración de aguas residuales se utilizan distintos métodos de acuerdo al tipo de contaminante que se desee remover, bien sea materia orgánica, nutrientes, patógenos o productos químicos.

Uno de los principales motivos por los que se requiere tratar las aguas residuales, se debe a que si estas son descargadas directamente al medio ambiente pueden contaminar las fuentes hídricas como ríos, lagos y mares, amenazando la vida de las especies acuáticas y afectando los parámetros de calidad del agua para el consumo humano. Debido a que el tratamiento de aguas residuales es un proceso clave en la búsqueda de la sostenibilidad, esta obra pretende educar y concientizar a los lectores en la importancia de la preservación de los cuerpos de agua.

A nivel global existe preocupación por la contaminación ambiental, en especial la producida por los metales pesados, debido al impacto negativo que tienen sobre las fuentes de agua y sobre los suelos, por lo que su remoción se ha convertido en un objetivo urgente, ya que en un mundo que está en constante evolución y desarrollo industrial, es imprescindible tener una comprensión profunda del impacto que las acciones ejecutadas por el hombre tienen sobre el ambiente.

Entre las principales fuentes de contaminación por metales pesados están las industrias, las cuales liberan metales como el mercurio, el plomo o el cadmio a los cuerpos de agua, representando una importante amenaza para la salud pública y para la preservación de los ecosistemas. Razón por la cual a través del tiempo se han desarrollado diversas técnicas que conduzcan a la remoción de estos metales contenidos en las aguas residuales.

Este libro busca explorar cómo se generan estos metales y visibilizar el impacto que tienen en la salud de las personas y en el medio ambiente, pero también expone las posibles soluciones que actualmente existen para mitigar los efectos contaminantes de estos metales pesados, brindando al lector una visión clara de la problemática ambiental que rodea a las industrias generadoras de estos tóxicos, así como las consecuencias que pueden ocasionar a largo plazo la exposición a metales pesados

si no se llevan a cabo las medidas pertinentes.

Debido a que la remoción de los metales pesados ha pasado a ser una prioridad a nivel global para profesionales de diversas disciplinas, este libro compila las principales técnicas utilizadas para la remoción de estos contaminantes, ofreciendo una amplia gama de estrategias y tecnologías utilizadas para tal fin, que van desde la precipitación química hasta la adsorción, pasando por métodos electroquímicos y la filtración, dentro de las técnicas convencionales.

Sin embargo, debido a que las técnicas convencionales pueden en algunos casos resultar costosas y requieren de mayor conocimiento, en el libro se desarrolla un capítulo sobre las técnicas no convencionales para la eliminación de los metales pesados en aguas residuales. Estas metodologías no convencionales incluyen técnicas que se basan en los procesos de la naturaleza, como es el caso de la fitorremediación.

Es así como en cada capítulo de este libro, donde se describen las técnicas empleadas para la remoción de metales pesados en las aguas residuales, se detallan de manera clara y precisa los fundamentos teóricos y prácticos de cada una de estas técnicas y sus aplicaciones en diferentes entornos. Además, por medio de casos de aplicación, el lector podrá descubrir cómo la innovación es un factor clave para la preservación del medio ambiente.

Entendiendo la importancia que tiene el manejo sostenible del agua, en el libro se dedica un capítulo a los humedales artificiales como instrumento efectivo para la eliminación de metales pesados presentes en las aguas residuales, puesto que se trata de una técnica que se ha convertido en una alternativa prometedora. A través de un estudio de caso y de la revisión de investigaciones científicas exitosas, se analiza en detalle cómo estos sistemas inspirados en la naturaleza, pueden ser diseñados para operar de manera eficiente en la remoción efectiva de los metales pesados contenidos en las aguas residuales.

El objetivo de este capítulo en particular, es proporcionar información detallada y actual sobre la utilización de humedales artificiales en la eliminación de contaminantes, con el fin de brindar una ayuda a profesionales, investigadores y estudiantes a comprender las aplicaciones de esta tecnología que ha resultado efectiva y sustentable. Al adentrarse en el mundo de los humedales artificiales, el

lector podrá descubrir sus ventajas, componentes y tipos, además de conocer cuáles son las especies vegetales más eficientes utilizadas en la construcción de estos humedales.

A través de la información y casos que se presentan en este libro, se espera crear concienciar a los lectores sobre la necesidad de hacer frente a los contaminantes presentes en las aguas por metales pesados, con el fin de fomentar acciones concretas en pro de la protección de la salud humana y del planeta. Además de servir como una herramienta educativa, este libro busca inspirar a investigadores de todo el mundo para unir esfuerzos en la búsqueda de opciones más efectivas y sostenibles para hacer frente a esta problemática global, ya que el tiempo de actuar es ahora.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para el desarrollo de los ecosistemas y de todos los seres vivos, sin embargo, menos del 1% de las fuentes hídricas como ríos, lagos, corrientes, entre otras, están disponibles para su uso. Actualmente, el uso de este vital recurso se ha incrementado debido al aumento poblacional, lo que ha disparado su demanda, pero además ha ocasionado la aparición de agentes tóxicos producto de la contaminación (Kılıç, 2020). Estos residuos son provenientes de aguas desechadas a nivel doméstico e industrial y generalmente, los compuestos contaminantes de aguas superficiales provienen de plantas industriales (Ortega & Sánchez, 2021).

Las aguas residuales son las que se desechan luego de ser usadas y que, además, su calidad se ha visto afectada debido a la incorporación de distintas sustancias. Generalmente, estas aguas residuales llegan a las fuentes hídricas alterando sus características naturales. Dentro de las aguas residuales, se encuentran las de origen doméstico, por lo que pueden contener materia fecal y otras sustancias que conforman las aguas grises, que son las que provienen de baños, cocinas, lavaderos, entre otros (Mora et al., 2022).

Por otro lado, están las aguas residuales de origen industrial, las cuales corresponden a los vertidos de los procesos industriales y su composición varía de acuerdo al tipo de industria. Estas aguas se caracterizan por tener mal olor, el cual se origina por la descomposición del contenido orgánico, además de ser tóxicas por la presencia de compuestos químicos.

Las aguas residuales deben ser tratadas antes de su disposición final, esto con el fin de minimizar los niveles de contaminación o el contenido tóxico y disminuir el impacto en el cuerpo receptor, cumpliendo además con la normativa de cada país en cuanto a niveles máximos permitidos. La elección del tratamiento dependerá de la composición del agua residual, además de los recursos técnicos y económicos disponibles (Mora et al, 2022). En el caso de esta obra, se profundizará en la contaminación de aguas residuales por metales pesados, la cual constituye un grave problema para el ambiente y que afecta la salud de las personas e impacta de forma negativa a los ecosistemas acuáticos.

Los metales pesados son elementos tóxicos que pueden ocasionar una gran cantidad de efectos negativos en la salud de las personas, tales como problemas neurológicos,

enfermedades del tracto respiratorio, trastornos reproductivos, cáncer, entre otros. Estos metales, como el mercurio, el plomo, el arsénico y el cadmio, son liberados al medio ambiente por la actividad de diversas industrias, especialmente la minería, la química y la metalúrgica y debido a su capacidad de acumularse en los sedimentos, son absorbidos por los organismos acuáticos, generando un daño en estos ecosistemas (Pabón et al, 2020).

Debido a que la contaminación que producen los metales pesados en las aguas residuales es un problema complejo, se requiere de medidas urgentes para su control y mitigar sus efectos adversos, por lo que es fundamental implementar técnicas de tratamiento eficientes y sostenibles que permitan la remoción de estos metales pesados antes de ser vertidas al medio ambiente, esto con el fin de prevenir la contaminación de los cuerpos hídricos, su acumulación en los organismos acuáticos y el impacto en la biodiversidad. Para ello, se han explorado diversas técnicas que permitan remover estos contaminantes contenidos en las aguas residuales.

Dentro de las técnicas convencionales están la precipitación química, la adsorción en carbón activado, la separación por membrana, el intercambio iónico, las evaporaciones, los tratamientos electroquímicos, la coagulación / floculación, la sedimentación / flotación y la biorremediación. De estas técnicas, una de la más utilizada por su versatilidad, es la adsorción, debido a la cantidad de ventajas que ofrece, como lo es su fácil operación, es económica, presenta buena tolerancia al pH y tiene capacidad para el tratamiento a nivel industrial (Collins et al., 2020).

Es así como existe gran cantidad de materiales que se emplean como adsorbentes en la remoción de metales pesados, donde el más común es el carbón activado debido a su gran capacidad de adsorción, su abundante disponibilidad, sus diversas formas de obtención y a su aplicabilidad para adsorber principalmente plomo, cromo y mercurio (González, 2018). Otro material inorgánico empleado como adsorbente es la zeolita, ya que presenta buen rendimiento, es económicamente viable y es capaz de encapsular grupos activos. Generalmente, se emplea en la adsorción de iones de plomo, cobre y mercurio (Collins et al, 2020).

Las tecnologías convencionales empleadas en la eliminación de metales pesados presentan ciertas restricciones de factibilidad técnica o económica, en especial cuando las concentraciones de metales son bajas. Además, algunos tratamientos

convencionales requieren el uso de químicos que pueden generar productos halogenados nocivos para los seres vivos, mientras que otros tienen una vida de útil corta o requieren de un gran conocimiento para su análisis e implementación (Chuquilin, 2020).

Algunos métodos convencionales de remoción de metales pesados, como la ósmosis inversa, requiere de una infraestructura costosa, es sensible a interferencias y presenta una selectividad dependiente del potencial eléctrico. En el caso de la separación por membranas, el tiempo que dura la remoción va a depender de la selectividad que tenga la membrana al metal, su capacidad para el uso es limitada, no ofrece un buen desempeño a valores extremos de pH y su selectividad para la remoción depende del tipo de membrana.

Por otro lado, los tratamientos electroquímicos también requieren de una infraestructura de alto costo y el tipo de los electrodos establecen la velocidad y eficiencia del tratamiento, mientras que, en el intercambio iónico, la composición química de las resinas establece la velocidad y eficiencia de la eliminación, la cual a su vez depende del pH. Finalmente, los hidrogeles compósitos a pesar de su alta capacidad de remoción, fácil aplicabilidad y de que no requieren una infraestructura costosa, generan subproductos que al degradarse son tóxicos y que dependen de la composición química del hidrogel (Collins et al, 2020).

Debido a lo anterior, se hace necesario explorar nuevas técnicas para la eliminación de metales pesados de las aguas residuales con el objetivo de implementar procesos eficientes que ayuden a la remoción de estos contaminantes e incluso que puedan recuperarse para su reutilización en diversos procesos productivos. En este sentido, en esta obra se explican de manera detallada, las técnicas no convencionales que se emplean para la eliminación de metales pesados de aguas residuales entre las que destacan el uso de biopolímeros, la biorremediación y el uso de residuos agroindustriales, por lo que se consideran técnicas limpias o verdes (Gómez et al, 2020).

Los biopolímeros son elementos plásticos que se obtienen a partir de recursos naturales y renovables, generalmente provenientes de residuos agrícolas que contengan almidón o celulosa (Zschimmer & Schwarz, 2022) y representan una alternativa viable para la obtención de hidrogeles, debido a que se encuentran

abundantemente en la naturaleza, además de ser biodegradables y favorecer el desarrollo de microorganismos que contribuyen a la adsorción de iones metálicos. Debido a sus propiedades fisicoquímicas que los hacen capaces de retener contaminantes, los biopolímeros más utilizados son: el quitosano, los alginatos, la celulosa y el colágeno.

Por su parte, la biorremediación o remediación verde, es una técnica que se fundamenta en el uso de plantas con el fin de remediar la contaminación ocasionada por metales pesados, por lo que se considera una tecnología amigable con el medio ambiente y de bajo consumo energético que ha demostrado resultados prometedores (Ghuge et al, 2023). Mientras que el uso de residuos agroindustriales se utiliza para la bioadsorción, la cual es una técnica empleada para la remoción de contaminantes en soluciones líquidas utilizando biomasa viva o muerta, resultando un proceso económico que no requiere de nutrientes y que ha arrojado resultados efectivos en la adsorción de metales pesados en el agua (Duany et al, 2022).

Dentro de las técnicas consideradas verdes, se encuentran los sistemas de humedales artificiales, los cuales al basarse en los procesos que se dan en la naturaleza como la descomposición, la estabilización, la absorción, la sedimentación y la degradación, permiten tratar las aguas residuales en un ambiente controlado, representando una opción para la remoción de metales pesados (Vásquez, 2023). Los humedales artificiales proporcionan un ambiente ideal para los procesos biológicos que descomponen y transforman los contaminantes que están en las aguas residuales. Además, son sistemas generalmente más económicos y requieren menos mantenimiento que otras técnicas de tratamiento de agua tradicionales y que aportan un valor añadido al ecosistema al crear hábitats para la vida silvestre, aumentando la biodiversidad y generando un atractivo desde el punto de vista paisajístico.

En definitiva, la remoción de metales pesados de las aguas residuales es de gran importancia debido a los efectos devastadores que puede tener sobre el ambiente y la salud de las personas. La presencia de estos contaminantes en el agua puede ocasionar daños en los ecosistemas acuáticos y mermar la calidad del agua para el consumo humano. Por consiguiente, es imprescindible explorar tecnologías efectivas para la depuración de aguas residuales que garanticen la remoción segura de metales pesados contenidos en ellas antes de ser vertidas en las fuentes hídricas.

En este sentido, este libro constituye una herramienta educativa que permitirá comprender el origen de los metales pesados en las aguas residuales, así como sus efectos en el ambiente y en la salud. Además de mostrar las principales técnicas convencionales y no convencionales que existen para la eliminación de metales pesados en las aguas residuales y por medio de la exposición de casos de aplicación, aprender sobre los materiales más eficientes que se pueden utilizar para tal fin, sirviendo de inspiración para futuras investigaciones relacionadas con tan importante problemática, como lo es la contaminación de las aguas residuales por metales pesados.

CAPITULO I.

1 PRINCIPALES INDUSTRIAS GENERADORAS DE METALES PESADOS

1.1 Introducción

Las industrias generadoras de metales pesados juegan un papel significativo en la economía global, pero también plantean desafíos ambientales y de salud pública debido a la liberación de estos elementos tóxicos en el medio ambiente. Entre las principales industrias generadoras de metales pesados se encuentran la minería, la metalurgia, la industria química y la producción de energía.

La minería es una de las principales fuentes de metales pesados, ya que implica la extracción de minerales de la corteza terrestre, que a menudo contienen altas concentraciones de metales como plomo, mercurio, cadmio y arsénico. Durante el proceso de extracción y procesamiento de minerales, se liberan metales pesados en forma de polvo, residuos líquidos y gases, lo que puede contaminar el suelo, el agua y el aire en las áreas circundantes.

La metalurgia es otra industria importante en la generación de metales pesados. Este sector se dedica al procesamiento de minerales para producir metales puros o aleaciones. Durante la fundición y refinación de metales, pueden generarse emisiones atmosféricas y efluentes líquidos que contienen metales pesados, lo que contribuye a la contaminación ambiental.

La industria química también es una fuente significativa de metales pesados, ya que utiliza estos elementos en una variedad de procesos de fabricación, como la producción de productos químicos, plásticos, pinturas y pigmentos. Los residuos generados por estas actividades pueden contener metales pesados que representan un riesgo para la salud humana y el medio ambiente si no se gestionan adecuadamente.

Además, la producción de energía, especialmente a partir de combustibles fósiles como el carbón, puede generar emisiones de metales pesados como el mercurio y el plomo. Estos metales pueden ser liberados en forma de gases y partículas finas

durante la combustión del carbón y luego depositarse en el suelo y el agua a través de la lluvia ácida. La contaminación por metales pesados representa una seria amenaza para la salud humana y el medio ambiente. Estos elementos pueden acumularse en los organismos vivos a lo largo de la cadena alimentaria, causando efectos adversos como daños neurológicos, problemas reproductivos, trastornos del desarrollo y enfermedades crónicas. Además, la contaminación por metales pesados puede dañar los ecosistemas acuáticos y terrestres, reduciendo la biodiversidad y afectando la calidad del agua y del suelo.

Para abordar estos desafíos, es crucial que las industrias generadoras de metales pesados adopten prácticas de producción más limpias y tecnologías de control de la contaminación para minimizar la liberación de estos elementos en el medio ambiente. Además, se necesitan regulaciones ambientales más estrictas y programas de monitoreo para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad del aire y del agua y proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos adversos de la contaminación por metales pesados. A lo largo del presente capítulo se estudiará a fondo esta temática.

1.2 Industrias generadoras de metales pesados

1.2.1 Industria minera

La industria minera es un sector económico que se encarga de la extracción de minerales del suelo. Estas actividades se realizan tanto a cielo abierto como en minas subterráneas, y pueden abarcar la extracción de minerales metálicos, como el hierro, el cobre o el oro, así como minerales no metálicos, como el carbón, la sal o la arena. La industria minera emplea diversas técnicas y maquinaria especializada para la extracción eficiente de los minerales, asegurando así el abastecimiento de materias primas para otras industrias y contribuyendo al desarrollo económico y tecnológico de los países.

Figura 1.
Industria minera



Fuente: <http://revistabusinessvenezuela.com/webv/actualidad/las>

A continuación, se presenta el proceso de extracción minera llevado a cabo en dichas industrias. (Ver Figura 2).

- Extracción de minerales

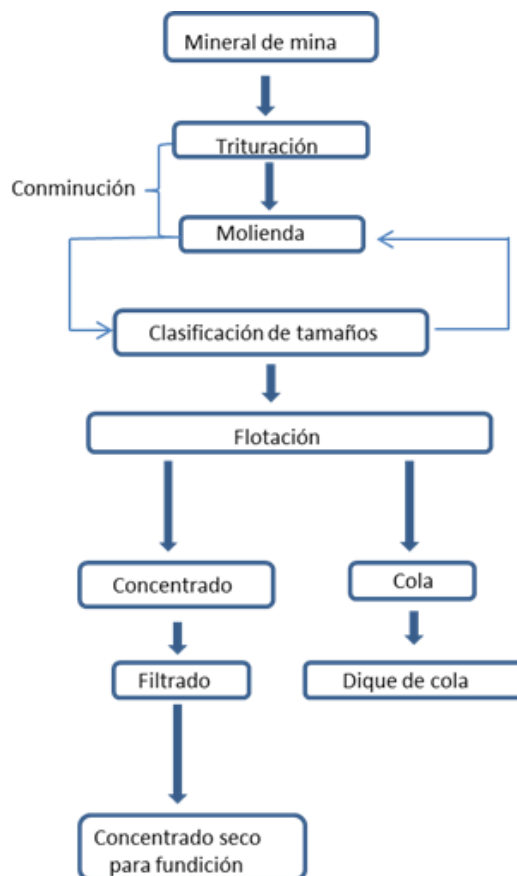
La extracción de minerales es una etapa fundamental en la industria minera. Consiste en la remoción de minerales del suelo o de minas subterráneas a través de diferentes métodos, como la minería a cielo abierto o la minería subterránea. En este proceso se utilizan maquinarias pesadas, como excavadoras, camiones mineros y perforadoras, para extraer los minerales y transportarlos a la superficie. Además, se deben considerar diversos factores ambientales y de seguridad para minimizar el impacto en el entorno y garantizar la salud y seguridad de los trabajadores.

- Procesamiento de minerales

El procesamiento de minerales es una fase posterior a la extracción, donde se lleva a cabo la separación y concentración de los minerales útiles de la ganga. En esta etapa se utilizan diferentes técnicas, como la trituración, la molienda, la flotación y la separación magnética, para obtener un concentrado de minerales de alto valor. Es importante destacar que el procesamiento de minerales puede variar dependiendo del tipo de mineral y de las características específicas de cada yacimiento. Además, se deben cumplir estrictos estándares de calidad y normativas ambientales para minimizar los impactos negativos en el medio ambiente y en la salud humana.

Figura 2.

Proceso de extracción minera



Fuente:

https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Beneficio-y-transformacion--minerales.html

- Fundición y refinación de metales

La fundición y refinación de metales es el proceso que transforma los minerales concentrados en metales puros o aleaciones. En la fundición, se calienta el concentrado de minerales en hornos especiales a altas temperaturas, lo que permite separar el metal de la escoria y otros subproductos. Por otro lado, la refinación consiste en eliminar impurezas y mejorar las propiedades del metal mediante diferentes técnicas, como la electrólisis, la destilación o el proceso de cloración. Estos procesos son fundamentales para obtener metales de alta calidad que puedan ser utilizados en diversas industrias, como la automotriz, la construcción o la electrónica.

1.3 Industria química

La producción de productos químicos es una parte fundamental de la industria

química. Esta se dedica a la fabricación de sustancias químicas que se utilizan en una amplia variedad de sectores, como la agricultura, la medicina, la cosmética y la alimentación. La producción de productos químicos implica procesos como la síntesis química, la destilación, la fermentación, la extracción, entre otros. Además, se deben seguir estrictas normas de seguridad y control de calidad para garantizar la pureza y la eficiencia de los productos químicos fabricados. (Ver Figura 3).

Figura 3.

Industria química



Fuente: <https://www.ekon.es/blog/existe-una-solucion-de-gestion-completa-y-avanzada-para-la-industria-quimica/>

- Fabricación de productos farmacéuticos

La fabricación de productos farmacéuticos es una rama importante de la industria química. Esta se dedica a la producción de medicamentos y productos relacionados que se utilizan para prevenir, diagnosticar y tratar enfermedades. La fabricación de productos farmacéuticos involucra procesos como la síntesis de sustancias activas, la formulación de medicamentos, el envasado y el etiquetado. Además, se deben cumplir rigurosos estándares de calidad y seguridad para garantizar la eficacia y la seguridad de los productos farmacéuticos fabricados.

- Fabricación de pinturas y recubrimientos

La fabricación de pinturas y recubrimientos es otra área de la industria química. Este

sector se dedica a la producción de sustancias utilizadas para proteger y decorar diferentes superficies, como paredes, automóviles y muebles. La fabricación de pinturas y recubrimientos implica la formulación de composiciones químicas que incluyen pigmentos, aglutinantes y solventes. Estos productos se fabrican en diferentes formas, como pinturas líquidas, esmaltes, barnices y recubrimientos en polvo. También se deben cumplir estándares de calidad para garantizar el rendimiento y la durabilidad de los productos fabricados.

- Fabricación de productos electrónicos

La fabricación de productos electrónicos es un sector clave dentro de la industria química. Se dedica a la producción de componentes químicos utilizados en la fabricación de dispositivos electrónicos, como circuitos integrados, semiconductores y pantallas. Este proceso implica la síntesis de materiales semiconductores, la deposición de capas delgadas de materiales conductores y aislantes, así como el grabado y el ensamblaje de los componentes. La fabricación de productos electrónicos requiere instalaciones y equipos altamente especializados para garantizar la calidad y la precisión en la producción de los componentes.

1.4 Industria metalúrgica

La industria metalúrgica se dedica a la fabricación de una amplia variedad de productos metálicos. Estos productos pueden incluir estructuras metálicas, piezas de automóviles, herramientas, maquinaria y mucho más. Los productos metálicos se fabrican utilizando una combinación de diferentes materiales, como acero, aluminio, cobre y hierro. La fabricación de productos metálicos implica una serie de procesos, como corte, soldadura, doblado y conformado. Para garantizar la calidad de los productos, se lleva a cabo un riguroso control de calidad durante todo el proceso de fabricación. La industria metalúrgica también está constantemente innovando tecnológicamente para mejorar los procesos de fabricación y desarrollar nuevos productos con mejores propiedades y rendimiento.

Figura 4.
Industria metalúrgica



Fuente: <https://www.metalurgicoscba.com.ar/avances-en-la-industria-metalurgica/>

1.5 Materiales utilizados en la fabricación

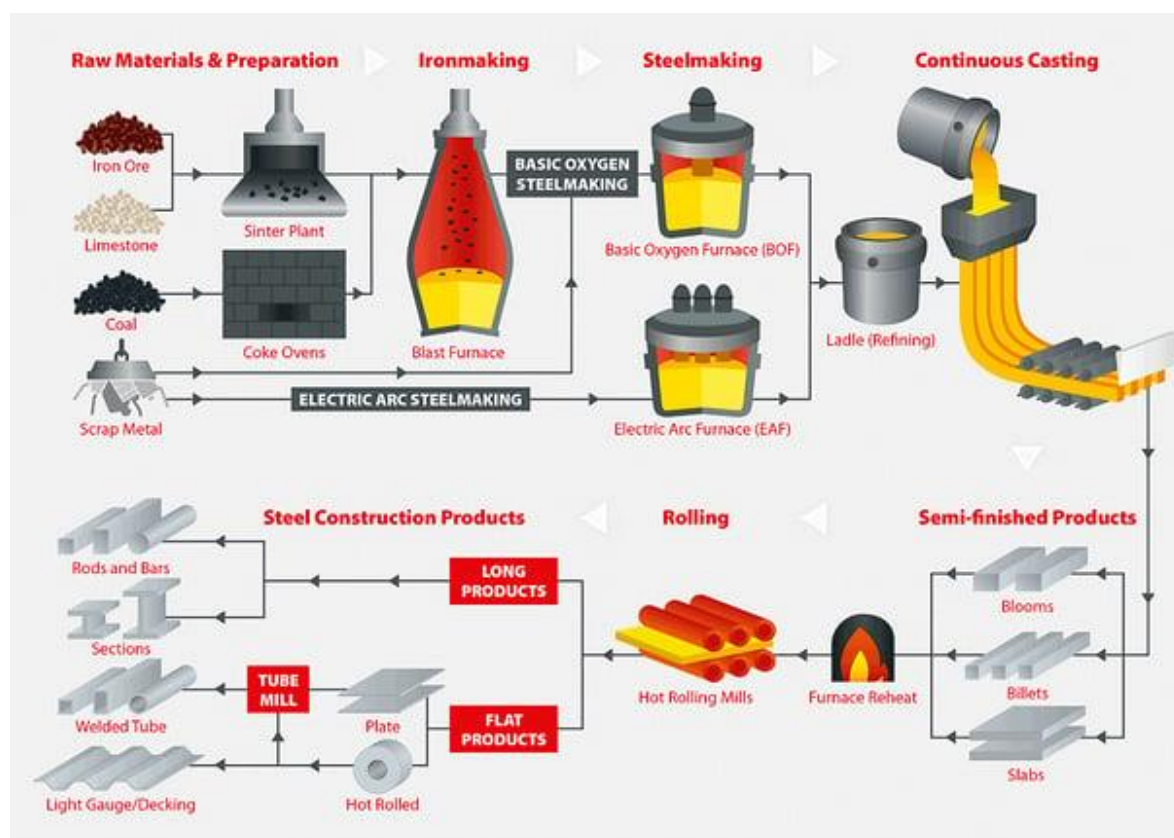
En la fabricación de productos metálicos, se utilizan una variedad de materiales, dependiendo de las características y requerimientos de cada producto. Algunos de los materiales más comunes incluyen acero, aluminio, cobre y hierro. El acero es ampliamente utilizado debido a su resistencia y durabilidad, mientras que el aluminio se utiliza por su ligereza y resistencia a la corrosión. El cobre se utiliza principalmente en aplicaciones eléctricas debido a su excelente conductividad, y el hierro se utiliza en la fabricación de productos más pesados y estructuras. Estos materiales son sometidos a un proceso de transformación, como la fundición, forja o laminado, para dar forma a los productos metálicos deseados.

1.6 Procesos de fabricación

La fabricación de productos metálicos implica una serie de procesos que transforman los materiales en productos finales. Estos procesos pueden incluir corte, soldadura, doblado, conformado, perforación, fundición y mecanizado. El corte se realiza utilizando herramientas como sierras o láseres para dar forma a las piezas metálicas. La soldadura une diferentes piezas metálicas mediante calor y fusión. El doblado y conformado se utilizan para dar forma a las láminas o tubos metálicos. La perforación se utiliza para crear agujeros en las piezas metálicas, y la fundición permite crear productos a partir de metal líquido vertido en moldes. Finalmente, el mecanizado se utiliza para dar los toques finales a las piezas, como el pulido o el roscado.

Figura 5.

Proceso de elaboración de hierro



Fuente: <https://www.vepica.com/es/blog/produccion-de-acero-desde-mineral-de-hierro>

1.7 Control de calidad en la producción

El control de calidad en la producción de productos metálicos es fundamental para garantizar la satisfacción del cliente y la fiabilidad de los productos. Durante todo el proceso de fabricación, se llevan a cabo diversas pruebas y controles para asegurar que los productos cumplan con los estándares de calidad establecidos. Estas pruebas pueden incluir inspecciones visuales, pruebas no destructivas, pruebas de resistencia y de funcionalidad. Además, se utiliza maquinaria especializada para medir y verificar las características de las piezas metálicas, como la precisión de las dimensiones y la resistencia a la tracción. Se implementan protocolos de control de calidad exhaustivos para detectar cualquier defecto o inconsistencia en los productos, asegurando así que solo los productos de alta calidad lleguen al mercado.

1.8 Innovaciones tecnológicas en el sector

El sector de la industria metalúrgica está constantemente innovando tecnológicamente para mejorar los procesos de fabricación y desarrollar productos más eficientes y avanzados. Una de las innovaciones más destacadas es la adopción de la fabricación aditiva, también conocida como impresión en 3D. Esta tecnología permite crear productos metálicos complejos con formas y estructuras personalizadas, utilizando capas sucesivas de material metálico. Otra innovación importante es el uso de la robótica en los procesos de fabricación, lo que mejora la precisión y la eficiencia. Además, se están utilizando cada vez más sistemas de inteligencia artificial y análisis de datos para optimizar los procesos de producción y predecir posibles fallos. Estas innovaciones tecnológicas están transformando la industria metalúrgica, permitiendo la fabricación de productos más sofisticados y de mayor calidad.

1.9 Síntomas y efectos de la intoxicación por metales pesados en poblaciones expuestas a aguas residuales industriales

La intoxicación por metales pesados es una condición causada por la acumulación de metales tóxicos en el organismo, lo cual puede producir diversos síntomas y efectos negativos en la salud de las personas expuestas. En este libro, nos enfocaremos en la intoxicación por metales pesados en poblaciones expuestas a aguas residuales industriales, debido a la importancia que estas aguas tienen como fuente de exposición a estos contaminantes en diversos sectores de la industria. Nuestro objetivo es analizar los síntomas y efectos de la intoxicación por metales pesados en estas poblaciones expuestas, con el fin de generar información relevante para la prevención y tratamiento de esta condición (Sarria-Villa et al., 2020).

1.9.1 Definición de intoxicación por metales pesados

La intoxicación por metales pesados se refiere a un trastorno provocado por la acumulación excesiva de metales tóxicos en el cuerpo humano. Estos metales, como el plomo, el mercurio, el cadmio y el arsénico, son altamente contaminantes y pueden ingresar al organismo a través de múltiples vías, incluyendo la exposición a aguas residuales industriales. La toxicidad de estos metales puede causar daños en varios

sistemas del cuerpo y generar una amplia gama de síntomas y efectos negativos para la salud.

1.9.2 Importancia de las aguas residuales industriales como fuente de exposición

Las aguas residuales industriales desempeñan un papel significativo como fuente de exposición a metales pesados para numerosas poblaciones. Estas aguas pueden contener altas concentraciones de metales tóxicos como resultado de los procesos industriales, y su descarga sin tratamiento adecuado puede contaminar cuerpos de agua y suelos cercanos. Como resultado, las personas que viven en áreas cercanas o que trabajan en industrias relacionadas están en riesgo de exposición a metales pesados a través del consumo de agua, alimentos cultivados en suelos contaminados o el contacto directo con estas aguas residuales, lo que aumenta la posibilidad de desarrollar intoxicación por metales pesados.

1.9.3 Síntomas de la intoxicación por metales pesados

La intoxicación por metales pesados puede presentar una variedad de síntomas que afectan diferentes sistemas del cuerpo. Estos síntomas pueden incluir manifestaciones físicas, neurológicas y gastrointestinales. Es importante reconocer estos síntomas para poder diagnosticar y tratar adecuadamente la intoxicación por metales pesados en poblaciones expuestas a aguas residuales industriales.

1.9.4 Síntomas físicos

Los síntomas físicos de la intoxicación por metales pesados pueden variar dependiendo del tipo y grado de exposición. Algunos de los síntomas físicos comunes incluyen fatiga persistente, debilidad muscular, dolores de cabeza frecuentes, dolores articulares y musculares, y alteraciones en la piel como erupciones o picazón. Además, la exposición a ciertos metales pesados puede provocar problemas respiratorios, como dificultad para respirar o tos crónica. Estos síntomas físicos pueden interferir con la calidad de vida de las personas y deben ser tratados adecuadamente para evitar complicaciones a largo plazo.

1.9.5 Síntomas neurológicos

La intoxicación por metales pesados también puede afectar el sistema nervioso, causando una variedad de síntomas neurológicos. Estos síntomas pueden incluir temblores involuntarios, problemas de memoria y concentración, dificultad para coordinar movimientos, cambios en el estado de ánimo como ansiedad o depresión, e incluso convulsiones en casos graves. Los síntomas neurológicos pueden ser especialmente preocupantes, ya que pueden afectar la funcionalidad y el bienestar mental de la persona afectada. Es esencial buscar tratamiento médico adecuado para mitigar estos síntomas y prevenir complicaciones a largo plazo.

1.9.6 Síntomas gastrointestinales

Los síntomas gastrointestinales son otra manifestación común de la intoxicación por metales pesados. Las personas expuestas a aguas residuales industriales contaminadas con metales pesados pueden experimentar náuseas y vómitos frecuentes, dolor abdominal, diarrea o estreñimiento crónico, pérdida de apetito y alteraciones en el gusto o el olfato. Estos síntomas pueden causar malestar significativo y afectar la capacidad de una persona para llevar una vida normal. En casos graves, la exposición prolongada a metales pesados puede dañar el tracto gastrointestinal de manera irreversible. Por lo tanto, es fundamental identificar y tratar adecuadamente los síntomas gastrointestinales asociados con la intoxicación por metales pesados en poblaciones expuestas.

1.10 Daños ocasionados en el ambiente por la presencia de metales pesados

La presencia de metales pesados en el medio ambiente puede ocasionar una serie de daños que afectan tanto a los ecosistemas naturales como a la salud humana. Algunos de los principales impactos ambientales causados por la contaminación con metales pesados incluyen: (Rodríguez Heredia, 2017).

- Contaminación del agua: los metales pesados pueden contaminar las fuentes de agua superficiales y subterráneas a través de actividades industriales, agrícolas y urbanas. Esto puede afectar la calidad del agua potable y los ecosistemas acuáticos, causando la muerte de peces y otros organismos acuáticos, así como la degradación de los hábitats.

- **Acumulación en el suelo:** la deposición de metales pesados en el suelo puede tener efectos adversos en la microbiota del suelo y en las plantas que crecen en él. Esto puede afectar la productividad agrícola y la calidad de los alimentos, así como la biodiversidad del suelo.
- **Bioacumulación:** los metales pesados pueden acumularse en los tejidos de los organismos vivos a lo largo de la cadena alimentaria, lo que puede llevar a niveles peligrosos de exposición en los organismos superiores, incluyendo los seres humanos. Esto puede causar una serie de efectos adversos en la salud, como daño al sistema nervioso, trastornos reproductivos, problemas de desarrollo y enfermedades crónicas.
- **Efectos sobre la biodiversidad:** la contaminación por metales pesados puede tener impactos negativos en la biodiversidad, afectando a las poblaciones de especies vegetales y animales en los ecosistemas contaminados. Esto puede resultar en la pérdida de hábitats naturales y la reducción de la diversidad genética dentro de las poblaciones afectadas.
- **Contaminación atmosférica:** algunos metales pesados pueden ser liberados al aire durante procesos industriales como la combustión de combustibles fósiles y la metalurgia, contribuyendo a la contaminación del aire. Estos contaminantes atmosféricos pueden ser inhalados por los seres humanos y los animales, causando problemas respiratorios y otros efectos adversos para la salud.

En resumen, la presencia de metales pesados en el medio ambiente puede tener una serie de efectos perjudiciales que afectan tanto a los ecosistemas naturales como a la salud humana. Es crucial implementar medidas de control de la contaminación y programas de monitoreo ambiental para minimizar estos impactos y proteger la salud y el bienestar de las personas y el medio ambiente.

CAPITULO II.

2 CONTAMINACIÓN DEL AGUA POR METALES PESADOS

2.1 Introducción

El agua siempre ha sido un recurso de mucha importancia para las poblaciones en los aspectos social, económico y ambiental; sin embargo, en los últimos tiempos su calidad física, química y microbiológica ha sufrido un deterioro de manera progresiva a consecuencia del uso de las fuentes hídricas como receptores de contaminantes, que son producidos en las diferentes actividades humanas, las cuales se incrementan a medida que se ha producido la sobreexplotación de los recursos a raíz del crecimiento demográfico (Pabón et al., 2020). Entre los diferentes contaminantes incorporados a los cuerpos de aguas se pueden encontrar los llamados metales pesados, estos compuestos causan toxicidad a las personas y afectación al ambiente, de manera que, su detección y eliminación de los recursos hídricos es sumamente necesaria (Zúñiga et al., 2022).

De acuerdo a lo establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS), los metales que más problemas ambientales causan son el plomo (Pb), el cadmio (Cd), el mercurio (Hg), el cobre (Cu), el cromo (Cr), el zinc (Zn), el talio (Tl) y el semimetal arsénico (As). Sin embargo, autores como Duany *et al* (2022), mencionan que son trece los compuestos metálicos pesados que se caracterizan por su persistencia y baja biodegradabilidad, causando afectación en la salud y medioambiente, y que deben ser eliminados de las aguas; entre estos, además de los ya mencionados se encuentran el manganeso (Mn), el titanio (Ti), el estroncio (Sr), el cobalto (Co) y el Hierro (Fe). Otros elementos como el aluminio (Al) y el berilio (Be), también se incluyen en la lista de metales pesados, elementos tóxicos y ligeros causantes de contaminación (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023). De la tabla periódica de los elementos químicos se puede deducir que estos metales pesados presentan características como las siguientes: densidad por encima de los 4g/cm^3 , peso atómico mayor de 20, y toxicidad en bajas concentraciones, lo que conlleva a establecer que estos contaminantes son un grave problema para las personas que se abastecen de los recursos hídricos que los contienen y al ecosistema

en general. Los procesos por los que estos metales llegan a depositarse en los cuerpos de aguas varían de acuerdo a las actividades que se desarrollan en zonas aledañas a los mismos; sin embargo, tienen un origen común en los efluentes de aguas residuales tanto domésticas, como industriales y correntías pluviales (Pabón et al., 2020)

Entre los diferentes efectos que estos metales pueden producir en la naturaleza se tienen: necrosis en hojas, inhibición de crecimiento y muerte de las plantas y peces; así como también problemas cutáneos, y respiratorios, daño en los sistemas neurológico, nervioso, inmunológico, renal y hepático, cáncer de pulmón, afecciones óseas, cardíacas, y testiculares, y hasta la muerte por envenenamiento (Duany et al., 2022). Por estos motivos, es urgente encontrar métodos para eliminar estos metales pesados de los recursos hídricos y disminuir la toxicidad preservando la vida de los ecosistemas y de la población humana (Pabón et al, 2020). A lo largo del presente capítulo se estará explicando de forma detallada los efectos de la contaminación de las aguas residuales por metales pesados.

2.2 Importancia del agua

El agua cubre el 70 % de la superficie terrestre, encontrándose en océanos, ríos, lagos, suelos y aire, y de esta tan solo un 3% del contenido total de agua es dulce, siendo esta la que más necesita el ser humano para realizar sus actividades (Eco-Intellutions, 2019). Aun cuando la cantidad total del agua presente en el planeta es constante, la disponibilidad de esta no, de allí que, es muy necesario considerar la importancia del agua y así implementar gestiones adecuadas y sostenibles para su consumo, de manera que se evite el agotamiento de este vital recurso y el estrés hídrico de la tierra (Fundación Aquae, 2021).

Su importancia va más allá de su utilización en las actividades comunes de la vida del hombre, pues un acceso seguro al agua proporciona salud mental, equilibrio emocional, bienestar espiritual, lo cual se traduce en felicidad (UNESCO, 2021). Además, las propiedades químicas que presenta el agua, logran que la misma sea indispensable para la vida de los seres humanos, entre estas las más importantes son el ser un solvente universal excelente, y estar presente en los distintos estados de la materia, en un intervalo de temperatura relativamente estrecho. De manera que, dar

al agua la importancia debida y determinar su valor absoluto resulta muy difícil, por lo que en muchos países del mundo no se le da una atención política y una inversión financiera correcta a este tema, lo que trae como consecuencia un acceso al agua y a los servicios hídricos en general muy restringido en muchas regiones del planeta (UNESCO, 2021).

Según datos aportados por las Naciones Unidas, durante el año 2021 el 26% de la población mundial carecía de agua y el 46% de servicios de saneamiento seguros, lo cual trajo como consecuencia que no se trataran adecuadamente las aguas residuales en el 44% de los hogares y que más de 3.000.000 de personas no tuvieran acceso a aguas de calidad para cubrir su demanda de consumo (ONU, 2021).

Por otra parte, entre las muchas propiedades del agua se tiene que esta contribuye en gran manera a que el clima del mundo sea regulado y es un reactivo indispensable en muchos procesos metabólicos de los seres vivos; presenta alta capacidad calorífica y una de sus propiedades es expandirse al congelarse. En el recorrido que el agua realiza por los diferentes ecosistemas esta realiza una modelación de los mismos, afectando el clima. Además, puede llegar a absorber importantes cantidades caloríficas sin que aumente su temperatura significativamente, ya que 1 g de agua puede absorber 1 cal para que su temperatura se eleve en 1° C (Fernández C., 2012). Gracias a su alta capacidad calórica, el agua requiere de calor en gran cantidad para poder cambiar de forma apreciable la temperatura en la masa de agua, esto favorece la estabilidad en la temperatura en las zonas geográficas circundantes a un cuerpo de agua. Esta importante propiedad logra contribuir a que se dé una producción de cambios repentinos de temperatura en las fuentes de agua que puedan afectar a los seres vivos que permanecen en medios acuáticos por choques térmicos. La cantidad de agua contenida en células es de aproximadamente 80% y esta propiedad permite que moléculas disueltas o contenidas dentro de ellas sean protegidas. Otra característica que posee el agua y es de gran importancia, es una constante dieléctrica elevada, que permite la disolución de sustancias iónicas, favoreciendo, además, la ionización de estas (Fernández C., 2012).

Por su alto calor latente de fusión, el agua proporciona estabilidad en los cuerpos de agua en cuanto a la temperatura del punto de congelación, evitando los daños ocasionados por temperaturas bajas en el ecosistema que se encuentra allí presente.

Su elevado calor de vaporización contribuye a la transferencia atmosférica del calor y del vapor de las fuentes de agua. Su alta tensión superficial permite la acción capilar lo que le da movilidad al agua para que se desplace por medio de las raíces de las plantas y de los finos vasos sanguíneos que posee el cuerpo humano, así como la disolución de sustancias.

Por lo que se puede afirmar sin objeción alguna que el agua es indispensable para la vida y la salud, así como también en todos los procesos de producción que desarrolla el hombre; pues esta es el eje del desarrollo económico y social sostenible, la supervivencia del ser humano y la salud de ecosistemas. Además, este recurso es fundamental para mejorar la salud y para la reducción de la propagación mundial a enfermedades, y aunque no siempre se reconoce su valor, este es infinito, pues la vida en este planeta no fuera posible sin agua y no existe ningún elemento que pueda sustituirla (UNESCO, 2021).

2.3 Aguas residuales

El agua, además de haber sido un elemento fundamental en el origen y crecimiento de las civilizaciones, ha permitido el desarrollo tanto económico, como industrial y comercial de estas, sin embargo, este avance de los pueblos ha tenido como resultado el incremento en la demanda y uso de las aguas y el desarrollo de infraestructuras para seguir abasteciendo las demandas (Molina Salgado, 2021). Esto ha ocasionado un aumento progresivo de la contaminación de las aguas y la desmejora en la calidad de las mismas. De allí que, actualmente existe una crisis por falta de aguas limpias para el consumo del ser humano, animales y ambientes; por lo cual, el reúso de efluentes residuales y grises, una vez han sido depuradas, destaca como una de las alternativas sostenibles más viables y como un instrumento para la gestión adecuada de las mismas (Torres López, 2018).

De acuerdo a Chango Panchi (2022), el agua residual se define como el agua que presenta una composición diversa y que proviene de usos tanto doméstico, como industrial y comercial, agrícola y pecuario, que también puede ser de otra índole, bien sea público, o privado y que por su uso haya sufrido degradación de su calidad natural. De manera que, en la depuración de las aguas, los tratamientos dependerán de las características de esta, de la concentración y tipos de contaminantes que contenga y

del origen de la misma, pero generalmente se incluyen procesos físicos, biológicos y químicos (Chango Panchi, 2022).

Entre los contaminantes más comúnmente presentes en aguas residuales destacan: (i) los sólidos suspendidos, los cuales son partículas sólidas pequeñas que se encuentran suspendidas en el agua en forma de coloides, que funcionan como un indicador de calidad en las aguas, siendo determinados por gravimetría y eliminados por filtración; (ii) los patógenos, estos generalmente son de origen fecal y transmiten enfermedades; (iii) los nutrientes, de estos los principales son el fósforo, el nitrógeno y el carbono, los cuales propician el crecimiento de organismos acuáticos no deseados; y (iv) la materia orgánica, que agrupa aquellas sustancias que pueden ser degradadas biológicamente en formas más simples, y cuyos parámetros más importantes son DBO, DQO, y COT (Guevara & Gayoso, 2022).

Actualmente, una gran cantidad de procesos industriales introducen el uso de metales pesados en la extracción de materiales o en la refinación de productos específicos, lo que generalmente implica la obtención de productos con costos de producción bajos, sin embargo, la utilización de estos metales trae consigo graves problemas ambientales a causa del alto grado de toxicidad que estos compuestos ejercen sobre los organismos con los que entran en contacto al ser descargados. De manera que, en los últimos años, los metales pesados han encontrado un lugar entre los contaminantes más frecuentes en aguas residuales, por lo cual su determinación, cuantificación y eliminación es de interés en el tema de la caracterización y depuración de estas (Pabón et al., 2020).

Los principales métodos cuantitativos para caracterizar las aguas residuales involucran métodos fisicoquímicos, gravimétricos y volumétricos (Guevara & Gayoso, 2022). Y los tratamientos para la purificación de aguas residuales incluyen procedimientos y trampas que permitirán la separación de contaminantes de gran tamaño y elementos como aceites y grasas (Chango Panchi, 2022). Lo cierto es que, el reúso de aguas residuales en los últimos años es una medida que ha logrado gran relevancia desde el aspecto social, ambiental y sanitario, que conlleva a la implantación de una gestión adecuada para la purificación de aguas de residuo, planificación hidrológica y protección ambiental (Torres López, 2018).

2.4 Contaminación por metales pesados

Actualmente en el mundo, entre los problemas ambientales más graves se cuenta la contaminación causada por los metales pesados en los recursos hídricos utilizados en diversas actividades antropogénicas, pues estos compuestos presentan un alto grado de toxicidad, afectando las poblaciones circundantes a estas fuentes acuíferas, los ecosistemas y el ambiente en general. Dentro de los compuestos metálicos considerados como pesados, se pueden encontrar el mercurio, el plomo, el hierro, el estaño, el cadmio, el cromo, el vanadio, el zinc, entre otros. Estos suelen ser liberados hacia las fuentes hídricas y suelos por medio de las descargas de efluentes residuales de diferentes actividades humanas y debido a características como persistencia, no biodegradabilidad, bioacumulación y toxicidad aun a bajas concentraciones, representa una amenaza grave para animales, plantas y seres humanos. Procesos productivos como las operaciones de extracción de petróleo, minería, fundición, metalurgia y curtido de cueros, son origen frecuente de metales pesados a las aguas, además de otras acciones y procesos industriales y urbanos (Pabón et al., 2020).

De manera que, la contaminación de los recursos hídricos que producen los metales pesados, tanto de manera natural, o a raíz de las actividades humanas, ha venido causando afectación considerable a la seguridad alimentaria y a la salud pública desde hace algunos años (Huang et al., 2014). De allí que, diferentes investigaciones han comprobado la existencia de metales pesados y de metaloides, como el plomo (Pb), el mercurio (Hg), el (Cd), el arsénico (As), el zinc (Zn), el cromo (Cr) y el níquel (Ni) en diferentes hortalizas entre las que se encuentran el repollo, la lechuga, el brócoli, la papa y la calabaza (Singh, 2010), debiéndose esto entre otras causas a la utilización de aguas contaminadas para regar las siembras.

Por otra parte, han sido reportado hallazgos de diversos metales en concentraciones diferentes en peces, leche y carne, producto del proceso de bioacumulación y del desplazamiento de estos desde la atmósfera hasta las fuentes de aguas. En definitiva, es preocupante la presencia de estos metales en los diferentes ecosistemas, puesto que gran cantidad de seres vivos dependen de un equilibrio adecuado en su hábitat, por lo que sus efectos, caracterización y depuración es tema de muchos estudios (Pabón et al, 2020). Por lo que en este trabajo, a continuación se describen algunos de los compuestos metálicos pesados, sus efectos en la salud del ser humano y del ambiente, así como los diferentes métodos existentes para su tratamiento.

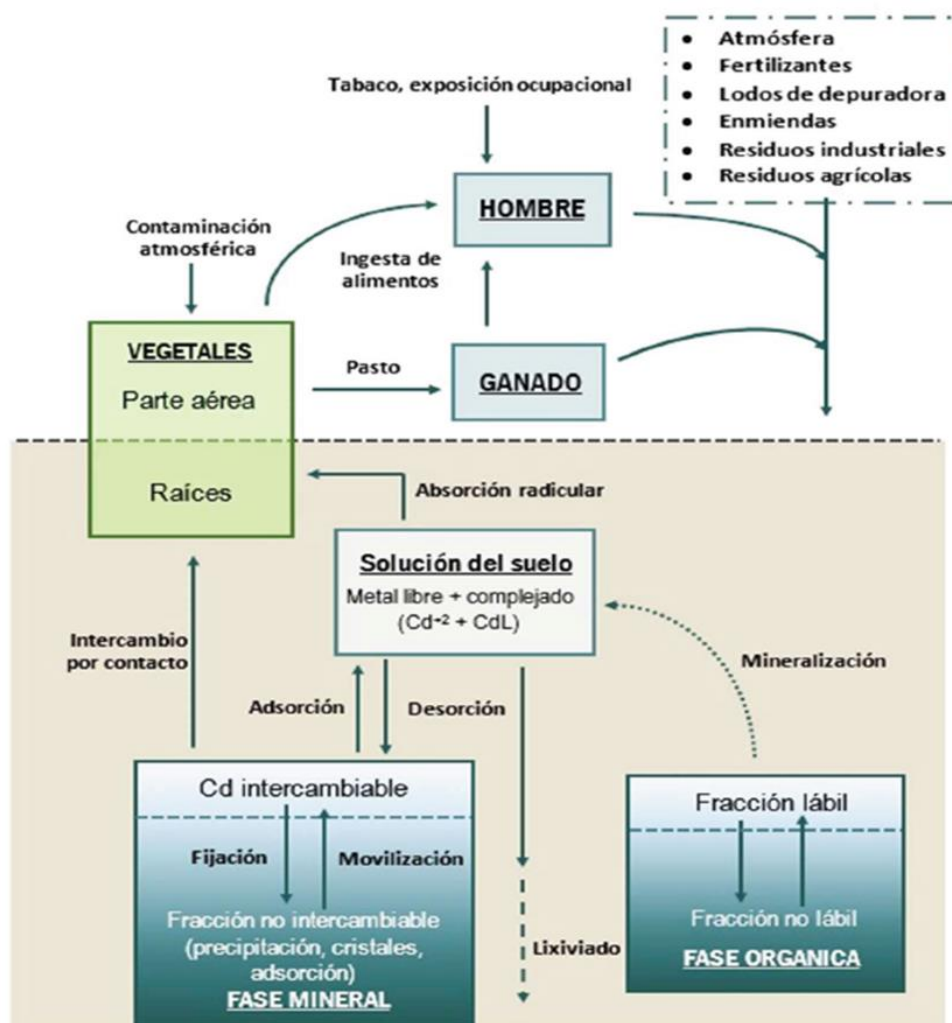
2.5 Cadmio

En la corteza de la tierra el cadmio se puede encontrar distribuido en concentraciones cercanas a los 0,1 mg/kg, aunque en rocas ígneas y sedimentarias no sobrepasa los 0,3 mg/kg al igual que en depósitos arcillosos y rocas metamórficas. Cuando existe en suelos en altas concentraciones se debe principalmente a contaminación, pudiendo ser también de origen litológico (Sánchez Barrón, 2016). La Agencia de Estados Unidos para la Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) ha establecido el valor máximo permisible del cadmio en aguas en 0,005 mg/L y la Organización Mundial de la Salud (OMS) fija este valor en 0,003 mg/L. No obstante, se recomiendan concentraciones menores debido a que este metal tiene características de bioacumulación (Barrón, 2016), es decir, se va acumulando en tejidos de organismos vivos llegando a alcanzar concentraciones mayores que las ambientales, pudiendo desencadenar trastornos químicos (OPS, 2020).

Por otro lado, el cadmio (Cd), según a lo planteado por Mero *et al* (2019), se caracteriza por ser un metal pesado, el cual presenta toxicidad cuando es liberado al medioambiente proveniente de diferentes fuentes antrópicas y naturales. Entre las fuentes naturales están incluidos los incendios forestales, la actividad volcánica y la movilización de partículas del suelo causada por las corrientes de aire; y entre las causas de origen antrópico se encuentran las actividades mineras, la fundición de metales, los agroquímicos, fertilizantes fosfatados, los combustibles de origen fósil, la producción de las baterías, el cemento, los pigmentos (amarillo, rojo, naranja) y los plásticos.

Figura 6.

Flujo del cadmio en el medio ambiente.



Fuente: Sánchez Barrón, (2016).

Años atrás el cadmio fue muy usado como un recubrimiento para el hierro y el acero, a fin de evitar la corrosión. Particularmente, el isótopo de número 113 fue muy utilizado en reactores nucleares y en barras de control como recubrimiento, gracias a la capacidad que tiene de absorber los neutrones (Lenntech, 2022). El cadmio llega al ambiente y ríos por medio de las aguas residuales tanto domésticas, como industriales, donde va a depositarse en los sedimentos, se acumula en los suelos y se absorbe por plantas y animales, entrando de esta manera a la cadena alimentaria, tal como se puede observar en la Figura 6. Las plantas resultan ser el primer paso en la cadena trófica, y algunas de las especies presentes acumulan grandes concentraciones del cadmio, lo cual conlleva a que los animales que se alimentan de hierbas consuman porciones importantes del metal (Mero *et al*, 2019).

- Características

Este elemento químico de composición metálica, y que Cd es el símbolo con el que se le encuentra diferenciado en la tabla periódica de los elementos, es blando y con un color entre blanco, plateado y azulado, está considerado como un elemento muy raro, pues este no es encontrado de forma libre en el medio natural, sino que este se encuentra mayormente asociado al zinc, pero es más blando y más maleable que el mismo; además, se puede encontrar también con la esfarelita y la otavita. En la Tabla periódica de los elementos se encuentra en el grupo IIb, junto al zinc y al mercurio, siendo divalente en cada uno de sus compuestos estables. Existiendo en la naturaleza solo ocho isótopos que son estables, además, once radioisótopos de tipo inestable y artificial (Lenntech, 2022). Comúnmente es encontrado en estado sólido a temperatura ambiente. La solubilidad de este metal tiende a reducirse cuando el pH se incrementa y puede ser controlado en el suelo con altas concentraciones de materia orgánica y pH alcalino (Barrón, 2016).

Tabla 1.

Principales características de este elemento metálico

Propiedad	2.5.1.1 Valor
Número atómico	48
Valencia	2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1,7
Radio covalente	1,48
Radio iónico	0,97
Radio atómico	1,54
Isótopos estables	^{110}Cd , ^{111}Cd , ^{112}Cd
Configuración electrónica	$[\text{Kr}]4d^{10}5s^2$
Primer potencial de ionización (eV)	9,03
Masa atómica (g/mol)	112,40
Densidad (g/mL)	8,65
Punto de ebullición (°C)	765
Punto de fusión (°C)	320,9

Fuente: Lenntech (2022).

- Efectos sobre la salud humana

En términos generales, la población se encuentra expuesta a contaminación por cadmio a través del aire, del agua, del suelo, de alimentos y del tabaco, estando la dieta considerada como la principal fuente de exposición a este metal para los que no son fumadores (Sánchez Barrón, 2016). Este metal puede ocasionar daños alarmantes en concentraciones consideradas elevadas para el organismo, su consumo es por lo general a través de los alimentos, y se calcula que alrededor del 80% del cadmio que se ingiere procede de los cereales (en especial del trigo y arroz), raíces y verduras de hoja, a pesar que existen diferentes fuentes de entrada al mismo. Se tiene también que alimentos como mejillones, champiñones, mariscos, cacao, patés y algas son ricos en cadmio. Por otro lado, otros alimentos que contienen altos niveles de cadmio que van desde los 0,05 a los 0,12 mg/cadmio/Kg son las hojas de hortalizas como las espinacas y lechugas, los cereales, los cacahuetes, la soja, las patatas y las semillas del girasol. De acuerdo a la Agencia Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, por las siglas en inglés European Food Security Agency), algunos de los alimentos que aportan diariamente a la ingesta cantidades mayores de cadmio son:

- ✓ Los moluscos de agua: un 3,2%
- ✓ El Pan: un 11,7%
- ✓ Las patatas: un 13,2%
- ✓ El chocolate: un 4,3%
- ✓ Las hojas de vegetales: un 3,9%
- ✓ Y los productos de pastelería: un 5,1%.

Otra fuente considerable de ingreso al cuerpo del cadmio es el humo de tabaco, quien es responsable de llevar este metal hasta los pulmones, y de allí, el mismo ingresa al torrente sanguíneo, para luego distribuirse a todo el organismo, causando daños peligrosos en pulmones, además, una vez que el metal llega hasta el hígado se combina con las proteínas y forman complejos que al transportarse por vía sanguínea a los riñones, se deposita en estos produciendo daños al proceso de filtrado, ocasionando que estos expulsen proteínas y azúcares esenciales para el cuerpo, siendo que la expulsión del elemento desde los riñones necesita un largo tiempo (Lenntech, 2022).

Se estima que un individuo fumador, que consuma al menos 20 cigarrillos diariamente,

absorberá aproximadamente 1µg del compuesto, puesto que ha sido determinado que la planta del tabaco puede acumular naturalmente concentraciones elevadas de cadmio en sus hojas, de manera que un solo cigarrillo puede contener concentraciones desde 1 hasta 2 µg de cadmio (Sánchez Barrón, 2016). De acuerdo a Sánchez Barrón (2016), en los intestinos el cadmio se absorbe a razón de 1-5 % del total ingerido, y esta absorción va a depender de factores como la concentración de vitamina D, ingesta de proteínas y otras moléculas tal como el ácido fítico.

En los individuos que tengan consumos bajos en proteínas y en calcio, o que presenten deficiencia de hierro, la absorción de este metal se incrementará hasta en un 20%. De igual manera, el almacenamiento de cadmio en el cuerpo causa otros efectos, tales como dolor gástrico, emesis, diarrea, debilidad en huesos que conlleva a fracturas, disminución de la fertilidad, alteración de los sistemas inmune y nervioso central, cáncer, posible afectación en el ADN, alteración psicológica, entre otras afecciones (ATSDR, 2022). También se determinó que el metal cadmio afecta órganos renales, pulmones, sistema óseo, sistema reproductor masculino y sistema nervioso, generando diabetes, hipocalcemia, osteoporosis y hasta cáncer (Mero et al., 2019). De allí que, la Agencia Internacional de investigación de cáncer (IARC por sus siglas en inglés) ha establecido una clasificación de los compuestos del cadmio como probables causantes de cáncer (Terrel, 2019).

- Efecto sobre el medio ambiente.

Se han realizado estimaciones que arrojan que cerca de 25.000 toneladas del elemento cadmio es liberado al medioambiente, de estas aproximadamente un 50% tiene su origen natural en diferentes fuentes, ejemplo de esto es la descomposición que sufren las rocas existentes en ríos, en incendios forestales y en las erupciones volcánicas, el 50% restante proviene de actividades manufactureras antropogénicas (Lenntech, 2022). Las diferentes actividades que realizan las industrias de manufactura producen efluentes residuales con alto contenido de cadmio, especialmente las industrias que se destinan a producir zinc, el cual va a parar a los suelos, siendo luego absorbido por la materia orgánica presente y transferido posteriormente a las siembras de alimentos que serán después consumidos por personas y animales.

Otra importante fuente de contaminación por cadmio de los suelos es el empleo de

fertilizantes a base de fosfatos, ya que, el cadmio es transferido a las plantas que crecen en este, ocasionando daños a en animales consumidores como los bovinos, quienes en su alimentación dependen de plantas, siendo este acumulado en los riñones lo que ocasiona enfermedades renales, hipertensión, daños cerebrales y nervioso. En suelos ácidos, en las plantas se incrementa la capacidad de absorción del cadmio. Existen seres vivos, tal como como las lombrices cuyo hábitat son los suelos, que son susceptibles a sufrir envenenamiento por concentraciones bajas de cadmio, ocasionando afectación al ecosistema de los suelos (Lenntech, 2022).

El cadmio puede llegar a los suelos por causa de las fuentes citadas anteriormente, pero también puede ser arrastrado por las aguas de lluvias o riegos de plantaciones, llegando hasta los cuerpos de aguas que se encuentran superficialmente (Pesca, 2015). El aire se puede llegar a contaminar con el cadmio a causa de la incineración abierta de los desechos o desperdicios residenciales y de los combustibles fósiles, ocasionando daños respiratorios a las personas.

En los ecosistemas hídricos este metal suele bioacumularse en peces, ostras langostas, mejillones, y otros, diversificando la resistencia a envenenamiento por el cadmio, de acuerdo a la fuente, encontrándose más resistentes a las especies de aguas saladas, respecto a las especies de aguas dulces (Lenntech, 2022). Una concentración elevada de cadmio en las fuentes acuosas podría tener como consecuencia la disminución en la reproducción de los delfines de río, los peces y el zooplancton, además de causar la extinción de otras especies. Por otra parte, se tiene que, en plantas, este elemento metálico inhibe el desarrollo de las enzimas, promueve la clorosis, el estrés oxidativo, la oxidación de proteínas, la peroxidación lipídica y causa daños al ADN (Mero *et al*, 2019).

2.6 Cromo

El cromo se trata de un compuesto metálico que es considerado como pesado, y que no se encuentra en estado elemental en la naturaleza, sino que entra fácilmente a aguas y suelos durante su uso industrial, convirtiéndose en un contaminante inorgánico de toxicidad considerable (Moreira *et al.*, 2022). Su uso en la obtención de aleaciones de alta dureza, tal como el acero inoxidable, anticorrosivos, con resistencia al calor, y recubrimientos de galvanizados. La EPA, estableció el nivel máximo de

contaminación en 0,1 mg/L de cromo total en aguas potables. Y se están realizando monitoreos de cromo hexavalente para establecer niveles límites a futuro. Por otra parte, la Oficina de Administración de Drogas y Alimentos (FDA por sus siglas en inglés), ha establecido que el nivel máximo de cromo, en aguas embotelladas, no debe sobrepasar los 0,1 mg/L (Rosero Arteaga, 2021).

Este metal es un elemento ampliamente usado en la industria metalúrgica, debido a que proporciona alta resistencia contra la corrosión; además de suministrar un acabado muy brillante, en los anodizados de aluminio, sirve de antioxidante en pinturas, y por sus colores variados es muy utilizado como mordente en la manufactura de colorantes y pinturas, en la higienización de vidriería utilizada en laboratorios analíticos ($K_2Cr_2O_7$), también es usado como un catalizador durante la síntesis de amoníaco (NH_3), entre otros usos.

La liberación de este elemento al ambiente es resultado de la utilización del mismo en industrias manufactureras como curtidoras de cueros, galvanizados, quemas del petróleo, del gas natural, del carbón, y por medio del humo de los cigarrillos. El vertido sin control de este metal pesado al ambiente se produce principalmente porque los sistemas colectores usados para las aguas residuales, en su mayoría, no permiten la separación de efluentes residuales que provienen de industrias, de los efluentes urbanos. Además, los sistemas de tratamientos de aguas convencionales, constituidos por tratamientos primario y secundario, no remueven eficientemente este metal pesado; siendo el más utilizado para aguas residuales contaminadas con cromo hexavalente Cr (VI) la fotocátalisis heterogénea utilizando dióxido de titanio (TiO_2), el cual es un tratamiento físico-químico el cual ha llegado a ser uno de los tratamiento alternativos que mejores resultados a arrojados en la reducción química de este elemento metálico (Castiblanco & Perilla, 2019).

- Características

Este compuesto metálico tiene de número atómico el 24, su peso molecular es de 51,1 y su densidad es de 7,19 g/cm³, es un metal muy duro y presenta un color plateado. Respecto a su abundancia en la naturaleza, es el 7mo de los elementos, y en la superficie terrestre el 21vo metal respecto a la abundancia. Presenta una compleja

distribución electrónica, y una valencia con alto potencial para variar sus estados de oxidación de forma fácil (Prado et al., 2016). Este metal tiene estados de oxidación que varían entre -2 a +6, pero el Cr (VI) o cromo hexavalente y el Cr (III) o cromo trivalente, son los que se encuentran más comúnmente en el medio ambiente y de forma más estable (Rosero Arteaga, 2021).

Este elemento químico característicamente se presenta como metal de transición, de color gris, duro, pero a la vez frágil, y con alta resistencia a la corrosión; forma tres óxidos diferentes con otros elementos, estos son: el óxido de cromo (II) u óxido cromoso (CrO), el óxido de cromo (III) u óxido crómico (Cr₂O₃), y el anhídrido de cromo (VI) o anhídrido de ácido crómico (CrO₃), adicionalmente puede llegar a formar otros compuestos, al unirse a diferentes elementos en los estados de oxidación (II), (III) y (VI).

Tabla 2.
Principales características del cromo

Propiedad	Valor
Nº CAS	7440-47-3
Densidad	7140 kg/m ³
Masa atómica	51.9961
Radio atómico	166 pm
Radio covalente	127 pm
Punto de fusión	2173 K
Punto de ebullición	2915 K
Calor de fusión	16.9 kJ/mol
Presión de vapor	990 Pa a 2130 K
Electronegatividad	1,66 eV
Calor específico	450 J/(K*kg)
Conductividad eléctrica	7,74·10 ⁶ S/m
Conductividad térmica	93,7 W/(K*m)
Solubilidad en agua	Ninguna

Fuente: Díaz Cabañas (2019).

- Efectos sobre la salud humana

De acuerdo a lo establecido por la OMS, este metal al ser evaluados sus riesgos,

reportó que, según la dosis, posee un potencial genotóxico, mutagénico, teratogénico y carcinogénico en la salud tanto de humanos como animales. Este metal en su forma Cr (III) posee baja solubilidad en agua y posee baja toxicidad; además la ausencia del mismo puede llegar a causar alteraciones metabólicas, problemas cardíacos y diabetes en humanos; no obstante, a concentraciones elevadas puede producir efectos genotóxicos en el ADN de células, y en la salud humana como las siguientes: erupciones en la piel, representando también un riesgo alto en la salud animal (Arias Patiño, 2019).

Según lo expuesto por Rosero Arteaga (2021), las personas se exponen al cromo al ingerirlo en comidas y bebidas, al inhalarlo durante la respiración e incluso mediante el contacto directo del cromo o compuestos cromados con la piel; también se tiene que en ambientes laborales en los que se utiliza este metal, la exposición al mismo en su forma Cr (VI) es común. El cromo, al ingresar al organismo, se reparte hacia la médula ósea y luego a otros órganos; donde los eritrocitos toman el Cr (VI), el cual es el compuesto más fácilmente absorbible, y lo integran a otras células a través del sistema que transporta los sulfatos. Este, al llegar a las mitocondrias y al núcleo, es reducido a su forma Cr (III) y siendo degradado por los reductores intracelulares dentro del citoplasma. Reducción que origina reactivos intermedios como el Cr (III), el Cr (IV) y el Cr (V), además de radicales libres, oxígeno e hidroxilo; siendo las formas del compuesto capaces de propiciar alteraciones en el ADN (Rosero Arteaga, 2021).

De igual manera, el este metal pesado cuando ingresa al organismo es conducido por todo el torrente sanguíneo llegando hasta la médula, ganglios linfáticos, sistema pulmonar, el riñón, el bazo y el hígado, ocasionando problemas respiratorios, erupciones cutáneas, afecciones en el sistema inmune, cáncer de pulmón, afectación en los riñones y en el hígado, y alterando la información genética (ATSDR, 2007, CAS#: 7440-47-3) (Molina *et al.*, 2010). Además, la aspiración de cromo con estado de oxidación $+6$ o hexavalente causa daños a la salud como malestar gástrico, úlceras, debilita el sistema inmune, problemas en riñones, respiratorios y en sistema hepático, altera la información genética y propicia el cáncer en pulmones, por lo que es considerado como el metal pesado más peligroso para el ser humano. Por otra parte, el cromo en estado de oxidación $+3$ causa interferencias en el metabolismo del azúcar y origina problemas cardíacos en pequeño porcentaje.

Asimismo, el ácido crómico (CrO_3) el cual es un reactivo ampliamente utilizado en la higienización de tuberías y cristalería, es un fuerte agente corrosivo que al contacto con la piel causa quemaduras y lesiones generales en la piel, al sufrir una exposición aguda a este compuesto, que adicionalmente produce una insuficiencia renal repentina. También han sido encontrados casos de desgaste dental en personas que se han expuesto a este ácido o a sus compuestos nativos como el cromo y la cromita (Molina *et al.*, 2010). Las principales vías para eliminar hasta el 60% del cromo son por la orina o vía renal como Cr (III), cuando se forma un complejo con el glutatión, y la vía biliar (por heces) en un porcentaje menor; además las uñas, el sudor y la leche ayudan en la depuración de este metal del organismo (Rosero Arteaga, 2021).

- Efectos sobre el medio ambiente

En sistemas acuáticos los comportamientos toxicológicos del cromo van a variar en función del pH, la temperatura, la dureza del agua y de los organismos que se encuentren en el agua (Arias Patiño, 2019). Al estar presente en las fuentes de aguas en altas concentraciones puede causar afectaciones importantes en los peces, específicamente en sus agallas; además, por tratarse de un elemento altamente tóxico, puede ocasionar problemas en las vías respiratorias, de fertilidad, tumores y defectos de nacimiento a la fauna en general. Además, el cromo⁺³ resulta ser un nutriente fundamental que, al ser absorbido de manera excesiva por las plantas al encontrarse altas concentraciones en los suelos, puede retrasar el crecimiento de estas.

En los suelos, la movilidad del cromo puede ser valorada considerando la capacidad de adsorción y la de reducción de estos y de los sedimentos. Gracias al pH de los suelos se reducen las concentraciones del Cr (VI) a niveles bajos, sin embargo, sigue siendo potencialmente tóxico. Además, la utilización de abonos fosfatados favorece el incremento del cromo en el suelo. Por otra parte, se tiene que el efecto tóxico del cromo en las plantas se evidencia en un crecimiento deficiente de raíces, una falta de color en hojas y desarrollo retardado, adicionalmente, aparecerán daños en el sistema radicular de las plantas (Arias Patiño, 2019).

La contaminación en cuerpos de aguas por cromo tiene severas repercusiones no solo en las aguas, sino también en los suelos aledaños, puesto que se involucran dos

factores: (i) las probables irrigaciones a cultivos con aguas provenientes de las fuentes contaminadas, y (ii) la contaminación en las zonas inundables del río durante épocas de lluvia; además, el suelo es contaminado con cromo debido a la utilización de agroquímicos fosfatados, nitrogenados y fitosanitarios. Por otra parte, se tiene que el efecto de la contaminación de aguas y suelos con cromo trae consigo una desmejora en la calidad de la vida de los ecosistemas y en su equilibrio (Hincapié & Puerto, 2019).

2.7 Cobre

Este compuesto metálico o químico cuyo símbolo que lo identifica en la tabla periódica de los elementos es Cu, es un metal de transición no ferroso, excelente como conductor de electricidad y de calor. Presenta un color rojizo-anaranjado brillante (Lenntech, 2022). Es un metal, que generalmente es encontrado en la superficie terrestre como óxido, sulfuro y extrañamente, en su estado metálico. Pueden encontrarse sales de cobre en solución acuosa en las aguas superficiales y en mantos subterráneos a consecuencia del contacto del agua con la corteza terrestre, y por la actividad industrial, en concentraciones menores a 20 µg / L. Sin embargo, a causa de la corrosión de tuberías de cobre y latón pueden encontrarse concentraciones más elevadas en lugares de uso de agua (Carbotech, 2023).

El cobre es un metal es muy utilizado debido a que posee características tanto físicas como químicas, mecánicas y eléctricas las cuales le permiten unirse a otros elementos formando aleaciones. Es dúctil, pero no magnético, y puede ser obtenido en estado puro, también es resistente a la corrosión y a la oxidación. Además, a partir de sulfuros minerales tales como la calcocita, la covelita, la bornita, la calcopirita y la enargita se puede obtener este compuesto (Lenntech, 2022).

Este elemento es liberado al medio ambiente a través de procesos naturales como la degradación de vegetales, los incendios forestales, los volcanes, el polvo que sopla el viento, entre otros, y por las actividades humanas, tales como la industria de minería, las actividades agrícolas, de manufactura, y por la disposición de aguas residuales a cuerpos de aguas. Una vez liberado al ambiente, el cobre se adhiere a las pequeñas

partículas de la materia orgánica, de la arcilla, de la tierra o la arena, luego estos compuestos de cobre pueden degradarse y liberando cobre al aire, al agua o a los alimentos (Lenntech, 2022).

Es un metal necesario para las plantas, pues ayuda en los diferentes procesos internos de estas; sin embargo, si su presencia se encuentra en concentraciones superiores a los 30 mg/kg en peso seco, puede ser tóxico, inhibiendo el crecimiento, retardando el proceso de división celular, afectar la expansión celular y causar muerte celular (Arciniega Galaviz, 2023). Sin embargo, la OMS advierte que el cobre puede desarrollar efectos tóxicos a niveles mayores de 2,0 mg/L (Moreira *et al*, 2022).

- Características

Entre las características principales de este metal pesado se encuentran en la tabla mostrada a continuación:

Tabla 3.

Características del plomo.

Propiedad	Valor
Número atómico	29
Valencia	1,2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1,9
Radio covalente	1,38
Radio iónico	0,69
Radio atómico	1,28
Isótopos estables	⁶³ Cu, ⁶⁵ Cu
Configuración electrónica	[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹
Primer potencial de ionización (eV)	7,77
Masa atómica (g/mol)	63,54
Densidad (g/mL)	8,96
Punto de ebullición (°C)	2595
Punto de fusión (°C)	1083

Fuente: Lenntech (2022).

- Efectos sobre la salud humana

El metal pesado cobre es encontrado en la naturaleza, en fuentes como agua potable, aire, alimentos, entre otros. Generalmente es liberado en el agua consumida en hogares que tienen tuberías de este material a causa de la corrosión de estas (Lenntech, 2022). El cobre propicia que el organismo realice procesos biológicos principales, por lo cual es importante para la salud del cuerpo, y es necesario en la

producción de energía, la formación y mantenimiento de los tejidos conectivos y de los vasos sanguíneos, además contribuye al mantenimiento del sistema nervioso central, el sistema inmune y la activación de los genes. No obstante, la aspiración por vías respiratorias de gran cantidad de polvo que contenga el metal pesado cobre puede ser causante de irritaciones en fosas nasales y en garganta, mareos y dolores de cabeza. Además, en personas que trabajan en contacto con el cobre, una exposición por largo plazo puede ser causante de la enfermedad conocida como “fiebre del metal”, irritación en mucosas, dolores de cabeza, estómago, vómitos, mareos, diarrea, dañar hepáticos y renales, que pudiesen a la vez ocasionar la muerte a la persona (Lenntech, 2022).

Aun cuando el cobre es indispensable para el funcionamiento normal del metabolismo humano, su elevado consumo mediante aguas y/o bebidas contaminadas, puede llegar a producir vómitos, náuseas y dolor abdominal, anemia, daños renales, daño hepático y pérdida del cabello, por lo que en la actualidad se están evaluando innovadoras tecnologías que incluyen microorganismos y sus derivados metabólicos, en los tratamientos de las aguas residuales industriales y mineras. Entre las cuales el empleo de biosurfactantes tiene un lugar importante en la remoción del cobre y otros metales pesados de dichos efluentes (Rodríguez et al., 2020).

- Efectos sobre el medio ambiente

El cobre es liberado en los cuerpos de agua proveniente de industrias y manufactureras que arrojan las aguas residuales contaminadas con este compuesto a los cuerpos de aguas, y al ambiente por las actividades mineras, la elaboración de fertilizantes fosfatados, la producción de madera y vertederos, de manera que también logra llegar hasta los suelos, incorporándose allí materia orgánica y minerales presentes en este, siendo posteriormente depositado en plantas y consumido por animales, causándoles daños al disminuir su crecimiento y envenenándoles, además puede ocasionar daños a microorganismos y a lombrices que habitan en suelos descomponiendo materia orgánica, lo que provoca que disminuya la fertilidad de los mismos (Lenntech, 2022).

En animales puede producir intoxicación con efectos muy negativos como hemólisis en vacas lecheras, con dosis de apenas 38 mg/Kg, siendo el ganado ovino más sensible, pues solo tolera hasta 25 mg/Kg, y los bovinos al consumir de 220 a 880

mg/Kg pueden llegar a morir (Bilandzic et al., 2012). El cobre en elevadas concentraciones es tóxico para todo tipo de organismo, y su afectación es alta en peces y plantas. En estas últimas afecta raíces, inhibiendo el desarrollo radicular y es promotor de la aparición de raíces secundarias, pequeñas y pardas. Además, causa clorosis y previene que germinen esporas de algas y hongos. Por otro lado, en los peces, se ve interrumpida la regulación del sodio por causa de los iones de cobre y en los animales mamíferos causa daños hepáticos (Del Olmo, 2015). Las trazas de metales pesados presentes en los plaguicidas inorgánicos basados en cobre, resultan un serio problema ambiental y toxicológico, puesto que el Cu es inmovilizado fácilmente por la materia orgánica del suelo y los óxidos de Fe⁺ y Mn⁺, de manera que permanece en altas concentraciones sobre las capas superiores de los suelos.

2.8 Plomo

Este elemento metálico que tiene como símbolo Pb en la tabla periódica de los elementos químicos, es de color azul y al empañarse es de color gris, se encuentra en la naturaleza en su forma de sulfuro de plomo (PbS) y forma parte del mineral llamado galena, también se puede encontrar junto a los minerales cerusita o carbonato de plomo (PbCO₃) y anglosita o sulfato de plomo II (PbSO₄). Es brillante y pesado, y se puede encontrar en estado sólido, siendo sus compuestos más importantes el Óxido de plomo y el Tetraetilo de plomo; además, hace aleaciones excelentes con el cadmio, el cobre, el arsénico, el estaño, el antimonio, el sodio y el bismuto.

Además, se encuentra en forma natural como parte de óxidos, y sales metálicas y compuestos organometálicos, y su extracción se da a partir de minerales en donde se encuentra en concentraciones entre el 3% y el 10%. Este metal pesado puede ser obtenido en actividades mineras, en industrias manufactureras, durante la quema de los combustibles fósiles, y es ampliamente utilizado en la construcción de urbanismos y en el sector automotriz. La determinación y depuración del plomo a nivel químico resulta de vital importancia debido a los efectos dañinos que ocasiona al ser humano y al medio ambiente, en especial los problemas ocasionados por cationes Pb²⁺, ya que este catión se permanece en solución y su detección es muy difícil por encontrarse a muy bajas concentraciones, sin embargo, en estas condiciones es muy tóxico, por lo que es muy difícil de eliminar (Vallés et al., 2018).

Este metal es resistente a las acciones del aire y agua, que al exponerse al primero forma una fina capa de compuestos del plomo en su superficie, que lo protegen de otros ataques. Puede formar aleaciones con otros compuestos metálicos, y ser parte de componentes de uso diario como cañerías, baterías, proyectiles, cables, revestimiento de láminas, entre otros. También son utilizados los compuestos de este metal como pigmentantes para pintura y barniz de cerámicas, en bajas concentraciones para evitar el daño en seres humanos.

- Características

Entre las características principales de este compuesto metálico se encuentran:

Tabla 4.

Características del plomo

Propiedad	Valor
Número atómico	82
Valencia	2,4
Estado de oxidación	+2,+4
Electronegatividad	1,9
Radio covalente	1,47
Radio iónico	1,20
Radio atómico	1,75
Isótopos estables	²⁰⁴ Pb, ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁷ Pb, ²⁰⁸ Pb
Configuración electrónica	[Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²
Primer potencial de ionización (eV)	7,46
Masa atómica (g/mol)	207,19
Densidad (g/mL)	11,4
Punto de ebullición (°C)	1725
Punto de fusión (°C)	327,4

Fuente: Lenntech (2022).

- Efectos sobre la salud humana

Este compuesto metálico es altamente tóxico a los seres humanos, una prolongada exposición al plomo causa efectos muy negativos al cuerpo, pues la contaminación

por este metal ocasiona saturnismo o plumbosis, la cual es una enfermedad que aparece al absorber por vías respiratorias, digestivas o cutáneas, una baja concentración del elemento, y puede llegar a ocasionar daños severos en el sistema nervioso, y generar alteraciones en el comportamiento como la agresividad, la hipersensibilidad, acciones impulsivas, daños renales, disminución de hemoglobina en sangre y anemia, afección del equilibrio y de la audición, debilitamiento en articulaciones, vértigos, diarreas, daños cerebrales, emesis, abortos espontáneos, disminución de la fertilidad masculina, pubertad retardada en mujeres, y hasta el cáncer.

Las vías principales de ingreso de compuestos del plomo al organismo son: (i) los pulmones, y (ii) el tracto gastrointestinal. Se estima que a diario se ingieren entre 0,3 y 0,5 mg del metal pesado, aun cuando no se esté expuesto directamente al plomo. Alrededor del 10 % del metal que se ingiere, se excreta por orina y otro pequeño porcentaje a través del sudor, el cabello y las uñas. Un 90 % del plomo encontrado en el cuerpo humano es depositado en los huesos, y el que es transportado por el torrente sanguíneo se deposita en los tejidos. Las señales de intoxicación plúmbica más habituales son problemas gastrointestinales los cuales comprenden síntomas como vómito, náusea, cólicos, diarrea y anorexia. Además, el plomo causa daños al sistema nervioso periférico y central, al proceso de síntesis de hemoglobina y al tiempo medio de vida de glóbulos rojos. En los riñones contaminados por plomo se producen variaciones mitocondriales e inflamatorias en las células epiteliales pertenecientes al túbulo proximal; además de alteraciones en las funciones las cuales derivan en hiperfosfaturia o Síndrome de Fanconi, aminoaciduria y glucosuria.

La Organización Mundial de la Salud sugiere que los niveles de plomo en la sangre de niños no deberían superar los 30 mg/100 mL de sangre y en los adultos no debe alcanzar los 40 mg/100 mL de sangre. El tiempo de exposición máxima a los distintos compuestos inorgánicos de este metal no deberá sobrepasar las 8 horas, para trabajadores que no utilicen mascarillas para su respiración, ni los 50 mg/m³ de aire, recomendando la utilización de ventilación, ropa apropiada y mascarillas.

- Efecto sobre el medio ambiente

El agua se contamina con sales de plomo solubles en ella al ser estas generadas en la extracción minera, en la manufactura de pinturas, en la producción de

acumuladores, en pirotecnia, en la coloración del vidrio, en la fototermografía, y en industrias químicas que se dedican a producir el Tetraetilo de plomo usado como antidetonador de la gasolina, entre otros usos. Cuando este elemento metálico es liberado en el ambiente, es retenido en los suelos y su permanencia en estos es determinada por su capacidad de intercambio catiónico, por su capacidad de formar de complejos con la materia orgánica, su precipitabilidad y su absorción.

La interacción del plomo con el suelo va a depender de pH, la presencia de compuestos quelantes y de elementos orgánicos, por lo que, si el suelo que lo retiene presenta un pH ácido, este metal se solubilizará y lixiviará causando la contaminación de las corrientes de aguas (Barrón, 2016). Como el plomo es altamente tóxico, cuando se libera en cuerpos de agua actúa sobre el plancton, las plantas y todos los organismos del agua. En los peces, los compuestos plúmbicos producen la formación de películas coagulantes que causan alteraciones a nivel hematológico.

2.9 Zinc

Se trata de un elemento metálico de transición, el símbolo que lo identifica en la tabla periódica de los elementos es Zn, es maleable, dúctil, de color grisáceo y moderadamente duro, con la propiedad de conducir eficientemente la electricidad y el calor. Es posible encontrarle en la corteza de la tierra en un porcentaje entre el 0,0005 y el 0,02%, entre minerales como la blenda, la marmatita y el sulfuro de zinc, y en los alimentos ricos en proteínas. Mayormente el zinc se haya en el ambiente como el sulfuro de zinc. Se recomienda una ingesta diaria de zinc de 11 mg/día para los hombres y 8 mg/día para las mujeres. Por lo que se sugiere consumir alimentos como: huevos, arroz integral, mariscos, carnes magras, quesos, pollo, pavo, carnes de cerdo, chocolate negro y frutos secos.

Entre la utilización industrial más frecuente del zinc se encuentra la formación de aleaciones y la protección de otros metales, mediante recubrimientos con zinc, elaborados en procesos de galvanizados como el hot-dip que es sumergir el metal en Zn fundido; el electrogalvanizado, que es la adición de zinc electrolíticamente sobre un artículo; el sherardizing que es la exposición del objeto a Zn en polvo cercano al punto de fusión; y el metalizado que se trata de rociar el objeto con zinc fundido. También se puede mezclar con diferentes metales como el bronce y el latón, para así

formar aleaciones (Lenntech, 2022). Sin embargo, entre los usos más relevantes del zinc se realiza en la industria farmacéutica, como ingrediente principal en la elaboración de ungüentos, suplementos vitamínicos, champús, desodorantes, preparaciones para tratar el pie de atleta y el acné, entre otros.

- Características

Entre las características principales de este compuesto metálico se diferencian:

Tabla 5.

Características del Zinc

Propiedad	Valor
Número atómico	30
Valencia	2
Estado de oxidación	+2
Electronegatividad	1,6
Radio covalente	1,31
Radio iónico	0,74
Radio atómico	1,38
Isótopos estables	⁶⁴ Zn, ⁶⁶ Zn, ⁶⁷ Zn, ⁶⁸ Zn, ⁷⁰ Zn
Configuración electrónica	[Ar]3d ¹⁰ 4s ²
Primer potencial de ionización (eV)	9,42
Masa atómica (g/mol)	65,37
Densidad (g/mL)	7,14
Punto de ebullición (°C)	906
Punto de fusión (°C)	419,5

Fuente: Lenntech (2022).

- Efectos sobre la salud humana

El zinc es un metal pesado que se puede encontrar en cantidades muy bajas en diferentes productos y es de mucha importancia en la salud del hombre, puesto que la deficiencia de zinc en el organismo puede ser causante de efectos adversos como la anemia, la anorexia, erupciones en la piel, disminución de la percepción de sabores y olores, entre otros daños. Contrariamente, una acumulación de concentraciones altas de zinc pueden ser causantes de graves daños a la salud, como defectos congénitos, náuseas, emesis, úlceras gástricas, irritaciones en la piel, daños pancreáticos, arterioesclerosis, deficiencia en la respiración al estar expuesto al clorato de zinc, alteración en el metabolismo proteico, entre otras (Lenntech, 2022). La exposición directa y con este compuesto metálico puede llegar a causar irritación ocular, piel y vías respiratorias, además de propiciar una metahemoglobinemia,

ocasionar daño renal, náuseas, emesis y anemia, así como también la gripe conocida como “fiebre del metal”. Actualmente, las investigaciones realizadas en esta área indican que existe alrededor de 100 enzimas que necesitan zinc para realizar sus funciones catalíticas, entre estas se encuentran las oxidoreductasas, las transferasas, las lipasas, las isomerasas, las ligasas y las hidrolasas, además de participar en procesos bioquímicos distintos que se involucran en el metabolismo de los seres humanos, cumpliendo funciones reguladoras, catalíticas y estructurales. En las enzimas de acción catalítica existen las carboxipeptidasas, la β -lactamasa, la anhidrasa carbónica y la fosfatasa alcalina para llevar a cabo funciones biológicas. El rol estructural del zinc permite estabilizar la dimensión terciaria de las enzimas y les da la forma llamada “dedos de zinc” que se unen en procesos de expresión génica y transcripción al ADN.

- Efectos sobre el medio ambiente

En el medio ambiente el zinc puede llegar a causar fitotoxicidad, disminución de nutrientes indispensables a las plantas e intervenir de forma negativa en el mecanismo de la fotosíntesis (Ariza & Pinzón, 2022). Este metal se encuentra naturalmente en el ambiente, pero también puede provenir de actividades de minería, por deposición de residuos del zinc por industrias que procesan metales, y de las cenizas generadas por el carbón en plantas eléctricas, contaminando el ambiente y ocasionando una acidificación en las aguas de la superficie, que, al ser absorbida por peces, es acumulado en estos, pudiendo ser transferido por ingesta a las personas.

Al llegar a las aguas superficiales, la mayor cantidad de zinc suele posicionarse en el fondo; sin embargo, una poca cantidad puede permanecer disuelta o suspendida en el agua en forma de partículas finas, disminuyendo en ambos casos la calidad de las aguas (Bernaola & Gutierrez, 2023). En suelos, este elemento metálico tiende a interferir en las actividades biológicas naturales al actuar negativamente en microbios y lombrices existentes en los mismos, además causa un efecto toxicológico en plantas impidiendo su desarrollo y crecimiento. Por otro lado, se sabe que la mayor concentración del zinc en los suelos está ligada a este y es tiene poca o ninguna solubilidad en agua. Sin embargo, según el tipo de suelo, algunas trazas de zinc pueden pasar a las aguas subterráneas y causar contaminación. También, se tiene que el zinc puede llegar a contaminar el agua potable en los sitios donde se eliminan

los desechos peligrosos (Bernaola & Gutierrez, 2023).

CAPITULO III.

3 TECNICAS CONVENCIONALES PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS EN LAS AGUAS RESIDUALES

3.1 Introducción

En todos los ecosistemas siempre están presentes los elementos metálicos en diferentes concentraciones, algunos representan micronutrientes esenciales para animales y plantas como el manganeso, molibdeno, cobre, cobalto, zinc, níquel, estaño, cromo, entre otros. Pero si la concentración de estos metales supera ciertos niveles puede causar daños a los seres vivos y resultar tóxicos. Aquellos metales que tienen una densidad superior a 4 g/cm^3 y peso atómico mayor a 20, resultan tóxicos así se encuentren en concentraciones bajas, por lo que se les conoce con el nombre de metales pesados, entre estos se tienen: aluminio, berilio, cobre, hierro, manganeso, cadmio, plomo, mercurio, entre otros (Barrón, 2016).

En la actualidad existen una gran cantidad de industrias manufactureras y metalmeccánicas que emplean metales pesados para la extracción de algún material o como materia prima, lo que trae como consecuencia que las aguas residuales industriales tengan concentraciones de metales que no cumplen con las especificaciones de calidad y seguridad de las aguas, y si no son removidos hasta niveles aceptados estos metales ya sea bajo su forma iónica o elemental, y luego son vertidos en las fuentes hídricas ocasionan un desequilibrio ambiental.

Por estas razones el tratamiento de aguas residuales para la eliminación o remoción de metales pesados es un proceso complejo debido a la gran cantidad de variables y condiciones que se pueden presentar, lo que hace que sea de gran interés científico, en búsqueda de soluciones que permitan mitigar el daño al medioambiente. Bien sea implementando técnicas tradicionales o diseñando nuevas tecnologías que permitan reducir la concentración de los metales pesados en las aguas residuales provenientes de industrias mineras, metalúrgicas, galvanoplásticas, productora de componentes electrónicos, entre otras (Castiblanco & Perilla, 2019).

En este capítulo se detallarán los fundamentos de los principales métodos y técnicas

que se pueden aplicar en la remoción de metales pesados, entre los cuales se tiene la precipitación química, coagulación-floculación, sedimentación-flotación, filtración por membranas, intercambio iónico, técnicas electrolíticas y de biorremediación para el tratamiento de aguas residuales.

3.2 Precipitación química

La precipitación química es un proceso ampliamente usado en el tratamiento de aguas residuales para retirar agentes contaminantes, especialmente para reducir la concentración de metales a valores de concentración que no generen problemas de contaminación. También se utiliza para remover otras sustancias inorgánicas, grasas, aceites, sólidos suspendidos, organofosfastos, entre otros (EPA, 2000).

El proceso de precipitación química consiste en eliminar una o más sustancias indeseables disueltas o suspendidas en la solución, mediante la producción de un compuesto insoluble (partículas sedimentables) en las aguas residuales por efecto de la adición de sustancias químicas. Estos sólidos precipitados pueden eliminarse fácilmente por filtración, centrifugación o cualquier otra técnica que los separe de la fase líquida.

La finalidad de aplicar la técnica de precipitación química es eliminar iones contaminantes adicionando iones de carga opuesta, conocidos también como contraiones, los cuales forman compuestos menos solubles con dichos iones contaminantes (González, 2021). Esta técnica se fundamenta en el equilibrio de solubilidad de los compuestos iónicos y en la constante del producto de solubilidad, debido a que el sólido formado es un compuesto iónico con poca solubilidad que se encuentra en equilibrio con el resto de los iones presentes en la solución. Este fenómeno se puede explicar con la siguiente ecuación química general:



Si se aumenta la concentración del anión ($A_{(ac)}^{m-}$) el equilibrio se desplaza hacia la formación del sólido $M_m A_n(s)$ por lo que la concentración final del metal M en solución estará determinada por la constante de equilibrio, la reacción y por la cantidad del anión que se añade. El equilibrio de las reacciones de precipitación química también puede verse afectado por el pH de la solución, sobre todo en aquellos casos en los que se precipita un hidróxido (González, 2021).

Para llevar a cabo el proceso de precipitación química primeramente se debe adicionar el agente precipitante más adecuado para el tipo de contaminante que se requiera remover y ajustar el pH a valores que favorezcan al máximo la reacción de precipitación, de forma tal que se pueda optimizar la eliminación del contaminante en el agua tratada. La adición de la sustancia se realiza con agitación constante para mantener la concentración del precipitante equivalente en toda la solución tratada.

Una vez que se ha precipitado el sólido insoluble se procede a aplicar una etapa de floculación para que favorezca la formación de flóculos mediante la unión de las partículas pequeñas que se formaron en la primera etapa de la precipitación. Para propiciar la formación de estos flóculos la agitación de la mezcla debe ser más lenta (González, 2021).

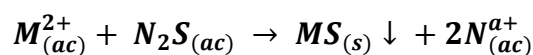
La finalidad de formar partículas de mayor tamaño con la floculación es que éstas sean más fáciles de sedimentar, que corresponde a la etapa subsiguiente; en la cual se deja reposar la mezcla en un tanque de forma tal que los flóculos se depositen en el fondo del mismo, es decir, se sedimenten. Finalmente, la última etapa de la precipitación consiste en separar la fase sólida de la líquida, generalmente se realiza con una simple decantación del agua que está arriba del sedimento, pero también se puede realizar mediante filtración o centrifugando el agua ya tratada.

La precipitación química es un método con muchas ventajas debido a que no requiere el uso de tecnología sofisticada por lo que generalmente los reactivos y los equipos se tienen disponibles casi de forma inmediata, por otro lado, muchos de los agentes precipitantes son económicos, con la excepción de algunos polímeros que tienen un costo elevado. Los equipos utilizados no requieren de mucho mantenimiento ni de operadores muy especializados, pero si requiere del uso de equipos de protección personal porque en ocasiones los productos utilizados son corrosivos. La mayor desventaja que presenta el método de precipitación son las reacciones que ocurren como competencia de la reacción de precipitación deseada y el mantenimiento de valores de pH que favorezcan la precipitación, de allí la importancia de realizar pruebas de jarra que permitan confirmar las condiciones óptimas para el tratamiento. Entre los equipos que se utilizan en un sistema de tratamiento por precipitación química se tienen para la coagulación tanques o depósitos, bombas dosificadoras, impulsores giratorios para la mezcla rápida y mezcladoras o batidores; para la

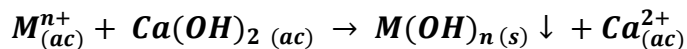
floculación se usan tanques con palas para la agitación; y para la sedimentación generalmente se usa un clarificador con placas inclinadas o tubos que funciona por gravedad. Adicionalmente, también se pueden instalar cubetas de contención para desbordamiento, canillas de inyección, accesorios, tuberías y válvulas (CEUPE, 2021).

Entre los tipos de precipitación química más comúnmente utilizados se tienen (González, 2021):

- Precipitación con sulfuros: utilizada para eliminar metales pesados como plomo o mercurio mediante la formación de sulfuros que tienen muy baja solubilidad. Los sulfuros que se utilizan con mayor frecuencia son el sulfuro de hidrógeno y el de sodio (H_2S y Na_2S). La reacción que ocurre es la siguiente:



- Precipitación de hidróxidos: que se fundamenta en aumentar la alcalinidad del agua añadiendo hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) para formar un hidróxido con muy poca solubilidad con el metal que se desea eliminar. La reacción química que ocurre en este tipo de precipitación sería la siguiente:



En este tipo de precipitación la purificación final del agua tratada está directamente relacionada con el aumento del pH, es decir, mientras más alto sea el pH la cantidad del metal removido será mayor.

- Precipitación de carbonatos: consiste en añadir carbonato de calcio a las aguas para precipitar los carbonatos de los metales que son insolubles. También es posible producir estos carbonatos haciendo pasar dióxido de carbono gaseoso a la mezcla alcalinizada, transformando los hidróxidos del metal en carbonatos del mismo, los cuales presentan una menor solubilidad.

La precipitación química puede ser usada para remover metales de aguas residuales de la industria de galvanizado, eliminación de fosfatos provenientes de aguas de lavado, eliminar aceites y grasas emulsionadas y para disminuir la dureza del agua debido a la presencia de concentraciones más altas de compuestos de bicarbonato, carbonato de calcio y magnesio principalmente, y en menor cantidad por cloruros, silicatos y sulfatos de estos metales, los cuales se pueden remover utilizando esta técnica. Además, también se utiliza en la industria farmacéutica, textil., minera,

metalúrgica (acabados metálicos y fundiciones), manufactura de explosivos, purificación del agua utilizada en el enfriamiento de los reactores nucleares, entre otros.

Por lo tanto, la precipitación química es una técnica muy común utilizada en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria galvánica y metalúrgica para remover cromo, zinc, hierro y níquel (Pochteca, 2022). Además de estos metales, en las aguas residuales de la industria minera y de las fábricas de baterías y componentes electrónicos se puede utilizar para reducir la concentración o eliminar metales como mercurio, cobre, plomo o cadmio (Caviedes Rubio et al., 2015)

3.3 Coagulación-floculación

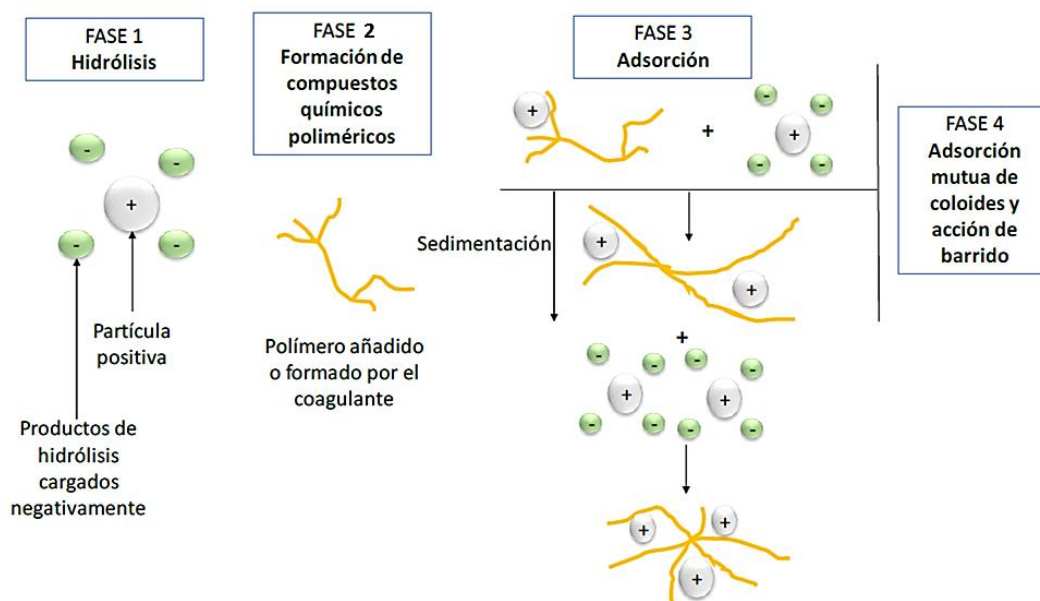
Este método es ampliamente utilizado para separar partículas de un líquido en el tratamiento de aguas residuales, consiste en adicionar agentes coagulantes/floculantes, con la finalidad de que ocurra la coagulación conjuntamente con la floculación; estos dos procesos están muy estrechamente relacionados, ya que ambos se fundamentan en el aglutinamiento de partículas en flóculos de forma tal de que puede precipitar por efecto del aumento de su peso específico, en otras palabras, mediante la unión de partículas pequeñas se forman agregados de mayor tamaño, lo que permite mejorar la eficacia en los procesos posteriores de separación como la filtración, la flotación o la sedimentación. Sus principales desventajas son el gasto de aditivos y una mayor producción de lodos (Ibarra, 2020).

Mediante el proceso de coagulación se desestabilizan las partículas coloidales por efecto de las cargas, eliminando la doble capa eléctrica que tienen las partículas coloidales que se encuentran en suspensión en el medio acuoso. Este proceso dependerá del pH, la turbidez, la temperatura, presencia de sales disueltas, las condiciones de mezclado, el coagulante empleado, etc. por lo que es importante determinar las mejores condiciones para remover eficazmente los contaminantes. Los coagulantes que se utilizan con mayor frecuencia son sales inorgánicas como por ejemplo el FeCl_3 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y el $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$. La Figura 7 muestra las fases que ocurren en la coagulación, comenzando por la hidrólisis del coagulante y desestabilización de las partículas suspendidas, posteriormente se forman compuestos poliméricos que son adsorbidos por los metales en suspensión (coloides), seguidamente ocurre la

adsorción mutua de coloides y por último la acción de barrido (Quiroz et al., 2019; Ibarra, 2020).

Figura 1

Fases de la coagulación.



Fuente: Ibarra (2020).

Por su parte, en la etapa de floculación consiste en favorecer el fenómeno de agregación entre los flóculos previamente formados con la finalidad de aumentar su volumen y su peso para que sean más fáciles de decantar. Esta unión mecánica de las partículas neutralizadas da lugar a un entramado de sólidos más grande propiciando una sedimentación más rápida de los flóculos, por lo que la mezcla en esta etapa es lenta, originando cambios en la turbidez y el color de las soluciones. Generalmente, se utilizan como sustancias floculantes polímeros de alto peso molecular solubles en agua (Lugo, 2017; Ibarra, 2020).

Es necesario realizar pruebas de laboratorio para adaptar los parámetros y condiciones de reacción para la coagulación/floculación sea efectiva debido a que no existe una regla general sobre la utilización de coagulantes/floculantes. Para seleccionar adecuadamente el coagulante se debe considerar la compatibilidad química entre las partículas y el coagulante, así como también el pH, la naturaleza de

las aguas residuales, la finalidad del agua después de ser tratada, la pureza de los reactivos, entre otros factores. Por ejemplo, existen casos en que algunos contaminantes presentan mayor afinidad por las sales de hierro y otros mientras que otros serán más compatibles con las sales de aluminio, pero esta afinidad se puede afectada por otros iones como el calcio y el magnesio (Quiroz et al., 2019).

El mecanismo del proceso de coagulación-floculación se explica porque primeramente ocurre una desestabilización de las cargas del coloide, debido a que estos poseen una “doble capa”, una adherida y la otra difusa, que debido a la presencia de la gran cantidad de iones positivos y negativos aumentan los iones de la capa difusa y por predominio de las fuerzas de Van der Waals disminuyen su volumen para que la partícula pueda mantenerse eléctricamente neutra, a esto se le denomina compresión de la doble capa. Luego los coloides en suspensión cargados negativamente al adicionar el coagulante, el cual se solubiliza produciendo iones positivos que atraen a los iones negativos neutralizándolos. Una vez neutralizadas las cargas se forma el flóculo por la unión de las partículas coloidales con las moléculas de las sales metálicas utilizadas como coagulante (generalmente sulfato de aluminio o cloruro férrico), formando como un anillo alrededor de las sales y ocasionando su precipitación.

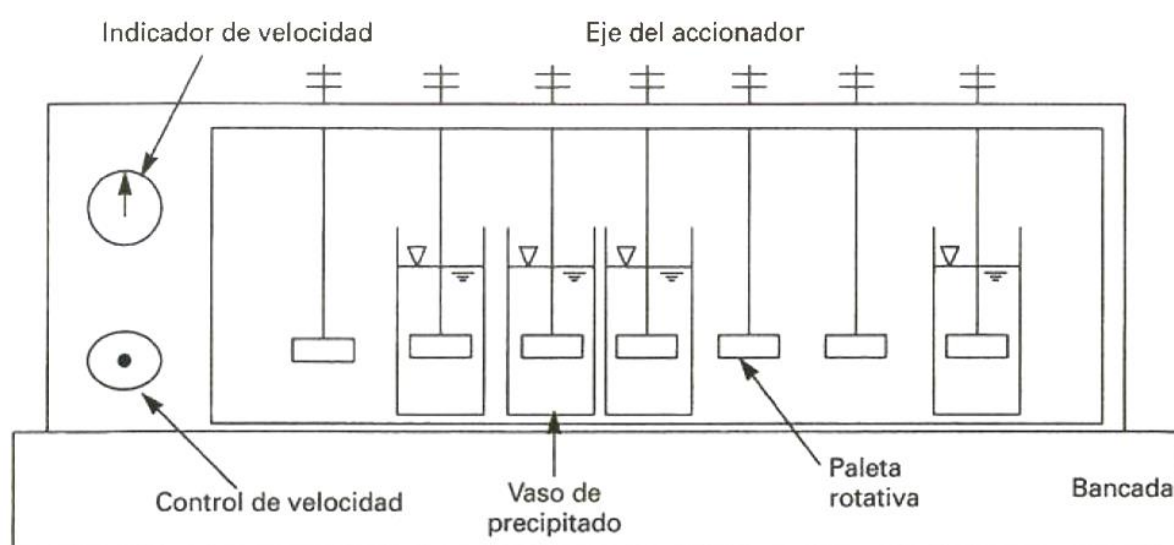
Por último, ocurre una adsorción y puente Inter particular, en las cuales el material coloidal interacciona con una parte del polímero adicionado, y el resto de la molécula polimérica que queda sin reaccionar se dispersa en la solución pudiendo reaccionar con una segunda molécula por mecanismo de adsorción y formando un puente entre el complejo formado por la reacción inicial con el polímero, el polímero y la partícula nueva; cuando no existe una segunda partícula entonces la fracción del polímero que no reaccionó es absorbida por otros fragmentos de la misma molécula, logrando que la partícula se estabilice nuevamente (Lugo, 2017).

La solubilidad de los coagulantes empleados está influenciada significativamente por el pH, al igual que la solubilidad de las moléculas que conforman los coloides, lo que genera que en ocasiones puedan sedimentarse de forma espontánea con un simple ajuste del pH. Por su parte, la floculación se ve afectada por diversos factores como la efectividad de la coagulación previa, la turbidez coloidal del agua no puede ser muy baja debido a que no existirán sólidos que sean el núcleo para el inicio de la formación

del flóculo, además la agitación debe ser lenta y homogénea para favorecer la unión entre los flóculos y evitar la ruptura de los que ya se produjeron, la temperatura también afecta la etapa de floculación no sólo en el tiempo requerido para la formación de los flóculos sino también en la cantidad de coagulante/floculante que se debe añadir, a menor temperatura los períodos de floculación serán más extensos y se requerirá una mayor dosis (Ibarra, 2020).

Figura 8.

Equipo para pruebas de jarra.

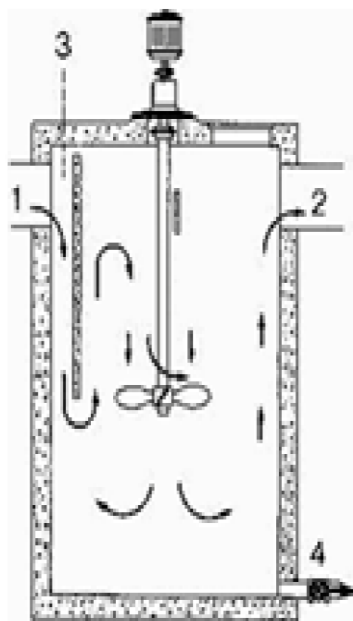


Fuente: Kiely, (1999).

Para poder determinar la dosis óptima y el pH para aplicar el método de coagulación-floculación, así como también la selección del tipo de coagulante y floculante adecuado para las aguas residuales que se desean tratar, se debe llevar a cabo una prueba de jarras a nivel de laboratorio, en la Figura 8 se muestra un diagrama de este equipo, el cual está formado por varios agitadores con velocidad de agitación variable. Una vez determinado el mejor valor de pH y estimada la mejor dosis de coagulante, se puede pasar a la escala industrial, en la cual se utilizan mezcladores que pueden ser estáticos o rápidos (Quiroz et al., 2019).

Figura 9

Cámara de mezcla con agitación rápida

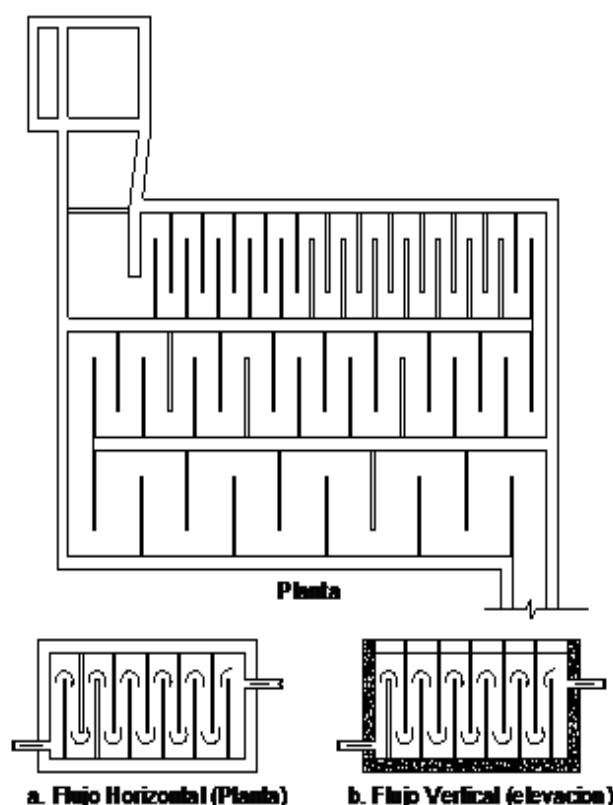


Fuente: Quiroz et al., (2019).

Los equipos mezcladores estáticos son los que se instalan en la parte interna de una tubería para originar una turbulencia que permita la difusión inmediata del coagulante mientras que los mezcladores rápidos consisten en un agitador de palas o de hélices instalado en una cámara de mezcla. Estos sistemas de agitación pueden estar diseñados o bien por un conjunto de palas fijadas sobre un eje giratorio o por hélices ya sea en posición vertical u horizontal. Por su parte, los equipos floculadores son diseñados para mantener una agitación lenta durante 15 minutos, por lo que puede estar tanto separado del decantador o en el interior del mismo, utilizando turbinas para recirculación y controlando la velocidad de paso a la siguiente etapa para no provocar la ruptura de los flóculos formados (Quiroz et al., 2019). (Ver Figura 9 y 10).

Figura 10.

Floculadores hidráulicos.



Fuente: <https://sistemajpii.blogspot.com>

El tratamiento por coagulación-floculación ha sido utilizado para remover metales como el estaño, el plomo y el hierro de aguas residuales provenientes de fábricas de semiconductores, así como también se puede usar para la remoción de cobre, níquel, cadmio y zinc en aguas residuales de la industria metalúrgica y de la industria de extracción de minerales (Ibarra, 2020).

3.4 Sedimentación/flotación.

La sedimentación es un tratamiento físico de aguas muy sencillo y que generalmente se utiliza previamente a la aplicación de otro tipo de tratamiento, en este proceso los sólidos suspendidos en la solución caen en el fondo del tanque o del recipiente que la contiene aprovechando la acción de la fuerza de la gravedad, resultando útil para la eliminación de partículas suspendidas no deseables y de algunos contaminantes, para esto es necesario que la densidad del sólido sea mayor a la del fluido. La cantidad de sólidos y de microorganismos patógenos que se depositan en el fondo del contenedor es directamente proporcional al tiempo en el que el agua permanezca almacenada sin sufrir ninguna alteración. El tiempo óptimo para la sedimentación va a depender de la

turbidez inicial del agua y de los requerimientos de calidad del agua que pueda pasar a las subsiguientes etapas de tratamiento (García-Astillero, 2018).

El proceso de sedimentación se puede realizar en una sola etapa o en varias, así como también en diferentes momentos del proceso de tratamiento de aguas residuales. Por lo que la sedimentación puede ser primaria si se utiliza para separar sólidos sedimentables en aguas residuales crudas, o también puede ser sedimentación secundaria si se aplica luego de un tratamiento secundario o biológico. La velocidad de sedimentación de los sólidos está directamente relacionada con la dimensión de las partículas, su resistencia al flujo que depende de la forma que tengan y por la diferencia entre la densidad del líquido y la densidad del sólido, ya que si las partículas que están suspendidas en el líquido son muy finas o no tienen una marcada diferencia de la densidad con el líquido la velocidad de sedimentación será muy baja, imposibilitando la separación por esta vía.

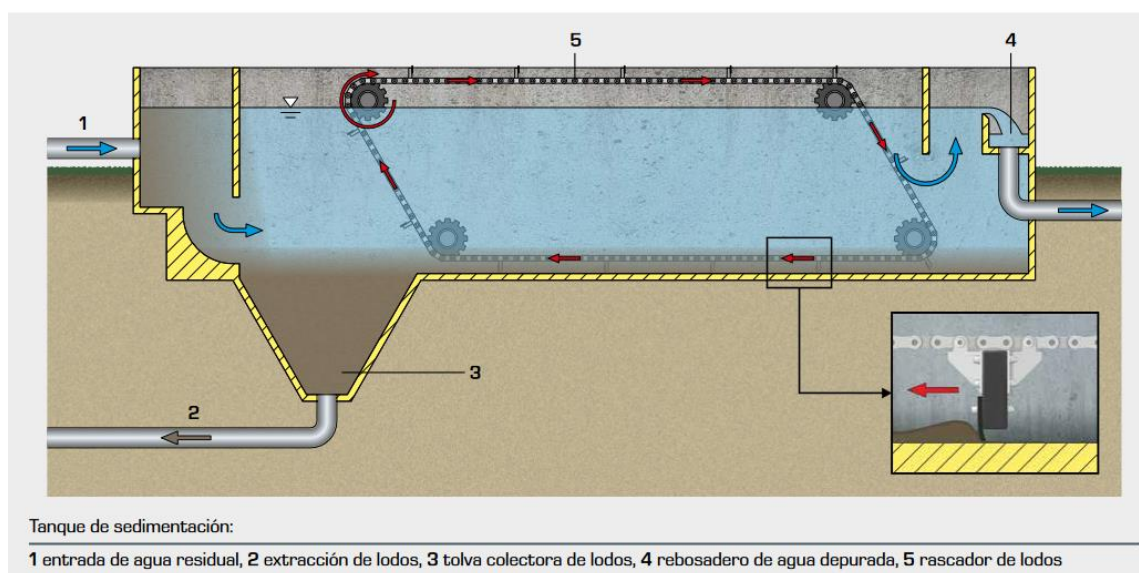
La finalidad de la sedimentación en el tratamiento de aguas residuales es remover los sólidos sedimentables y material flotante de aguas residuales crudas, también para la eliminación de material con desarrollo de microorganismos formados en reactores biológicos intermedios, remoción de biomasas y para remover sólidos suspendidos, floculados o precipitados químicamente. La sedimentación tiene lugar gracias a que la mayoría de los sólidos suspendidos están cargados negativamente y se repelen al estar cerca y no se agrupan, pero por efecto de la gravedad las partículas de mayor tamaño se depositan en el fondo del tanque y haciendo posible la separación del resto del agua, por esta razón la sedimentación dependerá también del origen de las partículas suspendidas, la composición, tamaño, carga y la densidad (Caviedes et al., 2015).

La ventaja de usar la sedimentación para eliminar sólidos de aguas residuales es su practicidad y la simplicidad de los materiales requerido, pero con la desventaja de que requiere mucho tiempo lo que conlleva a utilizar tanques de gran volumen, por lo que para diseñarlo se deben considerar criterios como la carga superficial o sobrenadante, la carga máxima a la salida, el tiempo de retención y la velocidad de flujo. Además, también se deben tomar en cuenta que la distribución del afluente sea uniforme de forma tal que se pueda minimizar la velocidad de entrada, proporcionar condiciones para que la recolección del lodo sedimentado y de la espuma sea adecuada y rápida,

minimizar las corrientes de salida, reducir los efectos del viento con la instalación de pantallas y vertederos.

Figura 10.

Esquema tanque de sedimentación



Fuente: <https://www.gunt.de> (2020)

Hay diferentes tipos de tanques de sedimentación, pueden ser de flujo horizontal (Figura 10), radial o ascendente. También se pueden clasificar de acuerdo a la forma de recolectar y remover los lodos, pudiendo ser con recolección manual, mecánica o mediante asentamiento en una tolva profunda, y con extracción mediante vaciado del tanque o mediante presión provista por una cabeza diferencial. Estos tanques pueden construirse de forma circular o rectangular, pero en general se pueden diferenciar cuatro zonas, la primera es la zona de entrada por la cual el agua se introduce al tanque con una velocidad controlada para evitar turbulencias (generalmente menos de 5cm/s), la segunda es la zona de sedimentación que debe tener un flujo uniforme lento que favorezca la deposición de las partículas, en la tercera zona denominada zona de lodos, en donde se debe instalar una trampa mediante la cual se puedan remover los lodos con baja velocidad para no producir una Re suspensión de sólidos, y una cuarta zona que es la de salida a través de la cual sale el agua del tanque y que debe estar provista de unas estructuras que retengan todo el material flotante del agua (Caviedes et al., 2015).

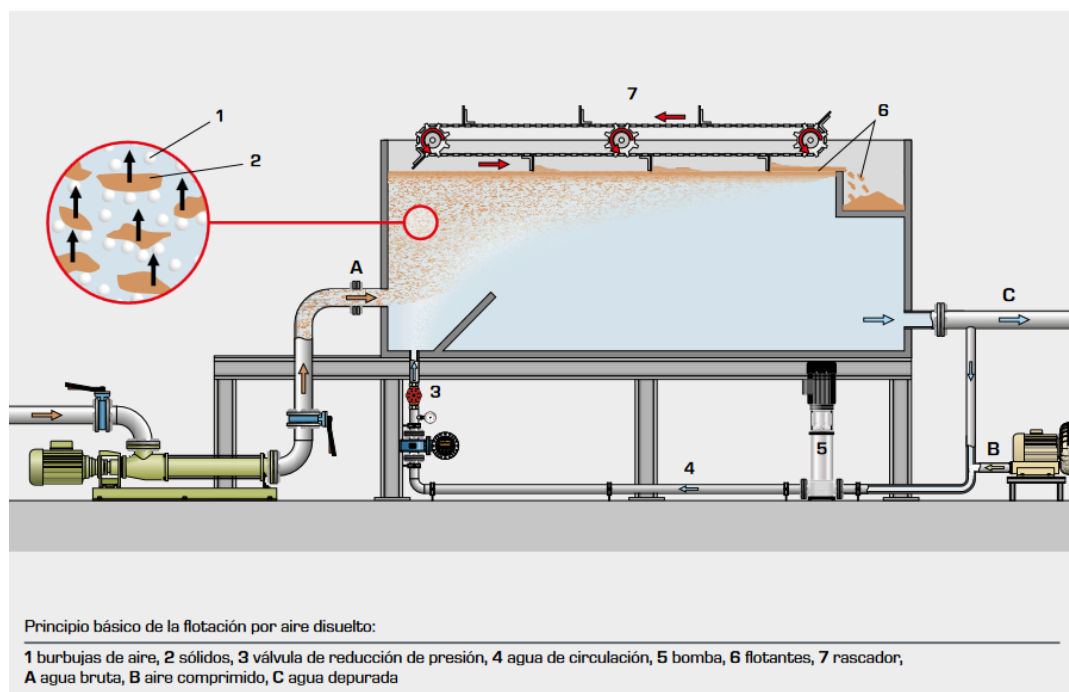
Los sedimentadores se diseñan con aditamentos tanto a la entrada como a la salida

que permitan garantizar la distribución uniforme del agua en toda la unidad y evitar la formación de corrientes o de espacios inertes, permitiendo que se logre una distribución pareja del flujo transversal. Entre estos aditamentos se pueden mencionar canales, pantallas con ranuras u orificios, vertederos, entre otros que se colocan tanto en la entrada como en la salida del tanque de sedimentación. El área superficial de la unidad es uno de los parámetros que se deben considerar para diseñar un tanque de sedimentación, así como también las velocidades de asentamiento de los sólidos, la profundidad del sedimentador, el tiempo de retención, la velocidad de flujo horizontal, los aditamentos y las cargas sobre el vertedero de salida (Farías, 2016).

Debido a que para el tratamiento de aguas residuales con la técnica de sedimentación no es posible separar aquellos sólidos suspendidos que tengan densidad menor o igual a la del agua, se complementa con la separación de estas partículas utilizando la técnica de flotación con el objetivo de aumentar el empuje ascensional de los sólidos, para esto se generan diminutas burbujas de gas que se adhieren a los sólidos y los arrastran hasta la superficie del agua para que se puedan remover, los sólidos separados se denominan flotantes. Por lo tanto, el proceso de flotación se emplea para separar las emulsiones y las partículas sólidas que se encuentran en una fase líquida a través de pequeñas burbujas de algún gas, casi siempre se usa aire. El éxito de la separación estará determinado por las propiedades superficiales que presentan las estructuras de las partículas para permitir su adherencia a las burbujas, y en menor proporción al tamaño y la densidad de las mismas.

Figura 11.

Esquema flotación por aire disuelto



Fuente: <https://www.gunt.de> (2020)

El método de flotación que se utiliza con mayor frecuencia es la flotación por aire disuelto, el cual se fundamenta en que la solubilidad del aire en agua es directamente proporcional a la presión. Para llevar a cabo el proceso de flotación el afluente debe presurizarse a presiones de entre 2 a 4 atm en presencia de aire, esto provoca que la saturación del agua con el aire, posteriormente se despresuriza hasta presión atmosférica en la unidad de flotación para que se libere el gas en exceso, lo que provoca que el aire disuelto forme pequeñas burbujas que se adhieren a las partículas sólidas; la espuma flotante que se forma es retirada de la superficie del agua por un rascador. Para que este proceso sea efectivo se debe generar una cantidad suficiente de burbujas por unidad de sólidos, y diseñar adecuadamente el tanque de acuerdo a la carga hidráulica superficial o a la carga superficial de sólidos (Romero, 2004). (Ver Figura 11).

Independientemente, del tipo de sistemas de flotación el principio es el mismo, el gas se introduce de forma directa en la fase líquida con el uso de difusores o de un rotor/dispersor. En el tratamiento de aguas residuales la flotación se puede incorporar como unidad de tratamiento primario, como unidad de pretratamiento antes de la unidad de sedimentación primaria, para espesamiento de lodos, o bien como unidad específica de flotación para eliminar partículas suspendidas que no pudieron ser

removidas con otras técnicas

La flotación por aire disuelto ha sido empleada para separar sólidos, aceites, grasas fibras y otras sustancias con densidad baja en el tratamiento de aguas residuales de la industria de alimentos, de plásticos, la industria papelera y petrolera, sin embargo, existen algunas investigaciones que hacen referencia al uso de la flotación para remover de metales como el plomo, níquel, zinc, cadmio, manganeso y cobre, en estos casos la flotación se fundamenta en distribuir las especies iónicas de metal en las aguas residuales hidrófobas mediante el uso de tensoactivos o agentes activos de superficie para luego remover estas especies hidrófobas con burbujas de aire, lo que hace posible que las partículas más densas que el líquido en el que se encuentran se puedan separar, debido a que el sistema partícula-burbuja tiene menor densidad que la partícula sola, permitiendo su ascenso y facilitando su separación (Polat & Erdogan, 2007; Caviedes et al., 2015).

3.5 Filtración por membranas

La filtración es una operación empleada frecuentemente en el tratamiento de aguas ya que permite remover partículas sólidas pequeñas que no pudieron ser eliminadas de forma eficiente con un proceso de coagulación/floculación o de sedimentación previo. La mayoría de los filtros más comunes utilizan un medio granular para efectuar la operación, pero existen otros tipos de filtros que emplean una membrana filtrante, pero independientemente del diseño los principios de funcionamiento son los mismos. Las membranas son barreras físicas semipermeables que separan dos fases, limitando el movimiento de las partículas a través de ella de forma selectiva. Cuando se emplean membranas para llevar a cabo la filtración es posible separar partículas de diferentes tamaños y características, gracias a la fuerza ejercida por el diferencial de presión entre ambos lados de la membrana. Esta tecnología a pesar de no ser selectiva es altamente eficiente, requiere poco espacio y es fácil de operar. El proceso de filtración por membrana se realiza haciendo pasar una única corriente de alimentación a través de un sistema de membranas que la divide en dos, una corriente permeada y otra retenida, se fundamenta en que la membrana empleada como barrera física posee características específicas que hace que sólo algunos sólidos de la corriente alimentada puedan atravesar, aquellos sólidos que no cumplen con las

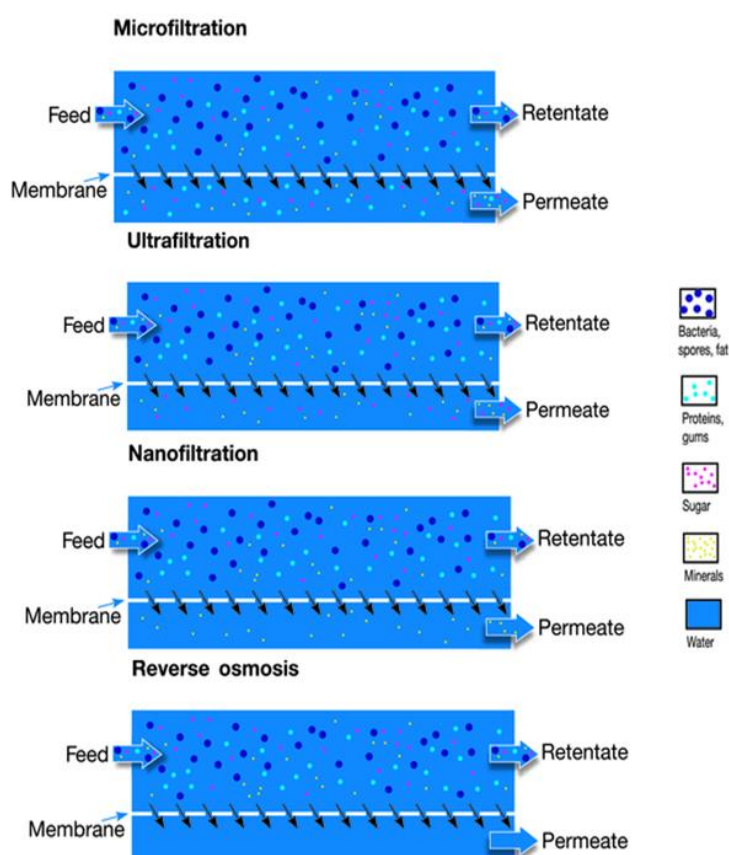
especificaciones para atravesarlas se quedarán retenidos (Romero, 2004; Caviedes et al., 2015).

De acuerdo al tamaño de las partículas que se desean separar del agua alimentada se debe seleccionar el tipo de membrana que se debe utilizar para la filtración, las cuales se clasifican de acuerdo al tamaño de sus poros en membranas de microfiltración (mayor tamaño), de ultrafiltración, de nanofiltración y de ósmosis inversas (menor tamaño). La microfiltración se utiliza para separar solamente sólidos en suspensión, bacterias y glóbulos grasos (0,1 – 10 micras), el resto de los componentes pasan a través de los poros de este tipo de membrana, opera con un diferencial de presión entre 1 y 5 bar. En el caso de la ultrafiltración como la membrana tiene poros un poco más pequeños que la utilizada en la microfiltración, se utiliza presiones que oscilan entre 1 y 10 bar, tiene una capacidad de separación de partículas entre 0,01 y 0,1 micras, las partículas retenidas son proteínas, grasas y polisacáridos, pero es permeable para ácidos orgánicos, péptidos pequeños, sales y azúcares (Alfalaval, 2016).

En el caso de la nanofiltración el tamaño de los poros de la membrana es muy pequeño, con capacidad para separar partículas entre 10 y 1nm con diferencias de presión entre 7-14bar, permitiendo sólo el paso de especies pequeñas como los minerales, reteniendo iones más grandes en los que se incluyen la mayoría de las sustancias orgánicas, es decir, impide el paso de azúcares, grasas, proteínas, bacterias y esporas. En cambio, en la filtración por ósmosis inversa la membrana empleada tiene los poros más diminutos posible, tanto que básicamente la única sustancia que puede atravesarla es el agua, por lo tanto, tiene la capacidad de seleccionar elementos menores de 1nm, como los minerales, iones, azúcares, grasas, proteínas, las bacterias y esporas serán retenidos por la membrana, con diferencias de presión entre 7 y 70 bar. En este caso la separación se realiza por difusión controlada o cribado (Caviedes et al., 2015; Alfalaval, 2016). (Ver Figura 12).

Figura 12.

Tipos de filtración por membrana



Fuente: <https://www.alfalaval.mx/>

Las membranas también se pueden clasificar según el peso molecular, su permeabilidad, superficie, espesor, carga, solubilidad del soluto y del solvente en la película, y también de acuerdo al material de la membrana en sintéticas o de polímeros naturales modificados, acoplados y estructurados. La filtración por membrana se utiliza frecuentemente para tratar de recuperar y remover sales metálicas de las aguas residuales generadas en las industrias con procesos galvanoplásticos, en el reciclaje de aceites, industria de alimentos y en la industria de explotación y producción de hidrocarburos (Caviedes et al., 2015).

Tabla 6.

Aplicación de ósmosis inversa para la remoción de metales pesados.

Especie	Condiciones				Método y complemento	% Eficiencia de remoción	Referencia
	pH	Concentración inicial	t_{Tr}	T (°C)			
B	9	7000-15000 mg/L	NA	25	Ósmosis inversa en aplicaciones de desalación de agua de mar. Membrana 20 micras	25	Tu, et al.; 2012.
Fe ²⁺	5,5-8,5	20 mg/L	4 h	12-29	Ósmosis inversa y oxidación del	30 – 40	Ioannou et al.; 2013.

					concentrado por energía solar foto-Fenton		
Ni, Co	7	240 mg/L	NA	25	Separación por membrana Dow Chemical	99,6	Guerrero et al.; 2006

t_r = tiempo de tratamiento.

Fuente: Caviedes et al., (2015).

Caviedes et al. (2015) hacen referencia a diferentes investigaciones reportan el uso de ultrafiltración para la remoción de metales pesados con una gran eficiencia, se ha utilizado para remover iones Cd^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} y Ni^{2+} (Schwarze, et al, 2015; Landaburu et al; 2011; Huang, et al 2014). Asimismo, varios estudios han empleado la técnica de nanofiltración para la remoción de cationes metálicos como Pb^{2+} , Cd^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+} , Mg^{2+} , Zn^{2+} y Li^+ (Gherasim, et al, 2013; González, et al, 2006; Liu, et al, 2012; Bi, et al, 2014). Por su parte, diversos autores han estudiado la eficiencia de la aplicación de la técnica de ósmosis inversa en diversas investigaciones para la remoción de metales como boro, hierro, níquel y cobalto (Tu, et al, 2012; Ioannou, et al, 2013; Guerrero, et al, 2006). Las tablas 1, 2 y 3 resumen las condiciones y la eficiencia que reportan como resultado de estas investigaciones, por lo tanto, estas técnicas podrían ser empleadas para remover estos metales pesados en aguas residuales de la industria de minería de materiales ferrosos, galvanoplástica, extracción de minerales, corrosión metálica, entre otras.

Tabla 7.

Estudios de aplicación de nanofiltración para la remoción de metales pesados.

Especie	Condiciones					% Eficiencia de remoción	Referencia
	pH	Concentración inicial	t_r	T (°C)	Método y complemento		
Pb^{2+} Cd^{2+}	5,8	150 mg/L, 40 mg/L	10 h	25	Nanofiltración, recubrimiento de poliamida aromática en sustrato de polisulfona con poros 0,262nm.	98,5 - 96	Gherasim, et al.; 2013.
Fe^{2+} Al^{3+} Mg^{2+}	6-7	4920 mg/L, 3050 mg/L, 3400 mg/L	36 h	25	Purificación de ácido fosfórico por nanofiltración. Membrana DS5 DL	98 - 96	González et al.; 2006.

					0,5 nm.		
Cd ²⁺ Zn ²⁺	2-11	80 mg/L	4 - 24h	20-22	Tartrato de sodio y potasio (PST) en un proceso de nanofiltración con membrana GE Osmosnic en poliamida aromática.	95,5 – 98,6	Liu et al.; 2012.
Mg ²⁺ Li ⁺	6-7	2000 mg/L, 8000 mg/L	NA	20	Recuperación de Li en alta relación de salmuera con membrana NF 90.	80,1 - 85	Bi et al.; 2014.

t_{Tr} = tiempo de tratamiento.

Fuente: Caviedes et al., (2015).

Tabla 3.

Estudios de aplicación de ultrafiltración para la remoción de metales pesados.

Especie	Condiciones					% Eficiencia de remoción	Referencia
	pH	Concentración inicial	t _{Tr}	T (°C)	Método y complemento		
Cd ²⁺ Fe ²⁺ Cu ²⁺ Zn ²⁺ Ni ²⁺	6,5	20 mM	2,5 h	Ambiente	Ultrafiltración micelar mejorad con nonaoxietileno oleiléter RO90 en contraste con dodecilsulfsto de sodio (SDS)	>95	Schwarze, et al.; 2015.
Cd ²⁺ Cu ²⁺	3,5- 4,5	0,4 – 0,7 mg/L, 0,4 – 0,6 mg/L.	NA	25	Separación de Cd y Cu de aguas ricas en fósforo por ultrafiltración micelar mejorada, membrana Amicon 8400 stirred cell, Millipore.	84,3 y 75	Landaburu et al.; 2011.
Cd ²⁺	2-13	50 mg/L	NA	5-45	Evaluación de micelar mejorada ultrafiltración con agentes tensoactivos mixtos.	98	Huang et al.; 2014.

t_{Tr} = tiempo de tratamiento.

Fuente: Caviedes et al., (2015).

3.6 Intercambio iónico

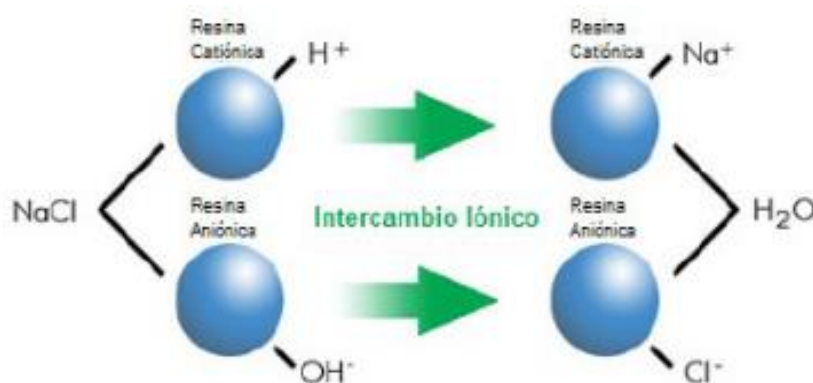
El proceso de intercambio iónico consiste en intercambiar componentes iónicos no deseados en el agua residual por otros iones más aceptados. Los iones eliminados se retienen en una resina de intercambio iónico para posteriormente ser liberados en un

líquido de regeneración. Las resinas son generalmente polímeros naturales o sintéticos en forma de esferas muy pequeñas que son capaces de absorber una clase de ion particular cediendo a cambio una cantidad equivalente de otro tipo de ion, en la solución que las atraviesa, este polímero se le conoce como resinas de intercambio iónico. Esta técnica comparada con otras técnicas comunes tiene la ventaja de que no requiere una tecnología muy sofisticada, presenta una alta selectividad, capacidad de tratamiento y eficiencia en la eliminación de contaminantes, permitiendo eliminar sustancias químicas nocivas de una gran variedad de aguas residuales industriales. Además, permite recuperar sólidos como por ejemplo metales que tienen un valor económico para el proceso y genera un menor volumen de lodos.

El intercambio iónico es un proceso unitario que sólo funciona entre iones que tengan la misma carga eléctrica, es decir, catión por catión y anión por anión, se fundamenta en la separación física solamente por lo que las especies iónicas intercambiadas no se alteran químicamente, la siguiente ecuación química es una representación de lo que ocurre en una resina de intercambio iónico: $nRB + A^{n+} \leftrightarrow R_nA + nB^+$. Se pueden encontrar dos tipos de resinas, las de intercambio catiónico utilizada para tratar iones positivos como calcio, magnesio, sodio, etc. y las resinas de intercambio aniónico que son para la remoción de especies iónicas con carga negativas como nitratos, sulfatos, cloruros, etc.

Figura 13.

Esquema del proceso de intercambio iónico



En ocasiones, en los sistemas de tratamientos se incorporan tanto resinas catiónicas como resinas aniónicas, dispuestas en una misma columna o lecho. Los equipos utilizados para el tratamiento por intercambio iónico son columnas o tanques provistos

con válvulas neumáticas automáticas o manuales, resinas aniónicas y/o catiónicas (fuertes o débiles), tuberías de distribución y algunos tienen instalado un tablero para el sistema de control automático para el cierre y la apertura de las válvulas.

El intercambio iónico con el empleo de resinas ha sido utilizado para la remoción de iones metálicos Cd^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} y Co^{2+} con una muy buena eficiencia en efluentes industriales y en soluciones acuosas. (Chahar y Singh, 2014; Zheng et al., 2015; Ceglowski y Schroeder, 2015). En estos estudios se utilizaron resinas poliméricas de diferentes tipos tanto para aguas residuales industriales como sintéticas.

Tabla 8.

Estudios de aplicación de uso de intercambio iónico a través de resinas en la remoción de metales pesados.

Especie	Condiciones					% Eficiencia de remoción	Referencia
	pH	Concentración inicial	t_{tr}	T (°C)	Método y complemento		
Fe^{2+} Cu^{2+} Zn^{2+} Cd^{2+} Pb^{2+}	4-5	24 – 58 mg/L	4h	25	Resina THQSA sintetizada por reacción de epoxi propil éter de tamarindo con ácido 8-hidroxiquinolina-5-sulfónico.	60-90	Chahar & Singh; 2014.
Cd^{2+}	3	30 mg/L	24h	26	Adsorción y desorción de Cd (II) con resina D001.	185,8 mg/g	Zhen et al.; 2015.
Cr^{2+} Ni^{2+} Cu^{2+} Cd^{2+} Co^{2+}	5-6	0,5 – 20 mM	24h	26	Resina sintetizada en la reacción de poli metil vinil éter <i>alt</i> anhídrido maleico (MVE-alt-MA) polímero con una base de Schiff.	En un rango de 29,95 – 157,25 mg/g	Ceglowski & Schroeder; 2015.

t_{tr} = tiempo de tratamiento.

Fuente: Caviedes et al., (2015).

3.7 Técnicas electrolíticas

En el tratamiento de aguas residuales se han obtenidos muy buenos resultados en la eliminación de metales pesados empleando la técnica de electrólisis, entre estas se tienen la electrodeposición, la electrocoagulación, electroflotación, electrooxidación y la electrodesinfección. Estos procesos aplican los principios básicos de las técnicas

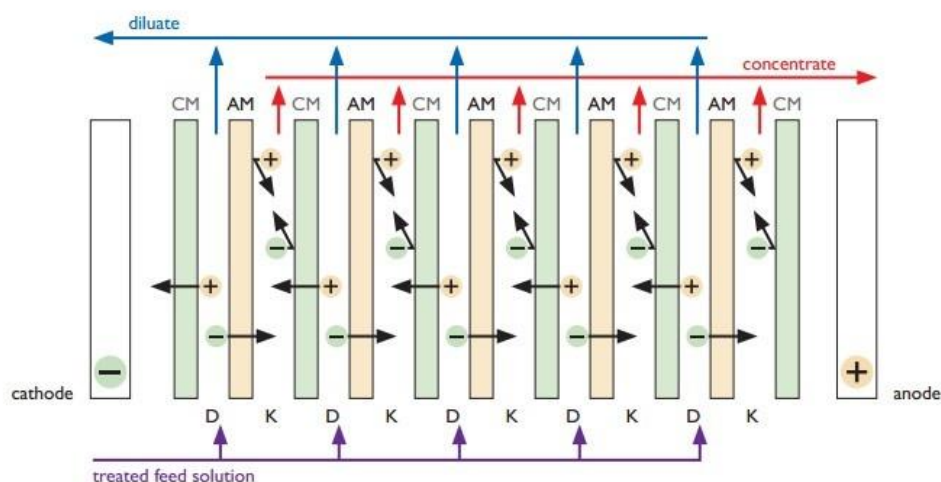
convencionales de tratamiento de aguas, pero en una celda o reactor electrolítico, que es un recipiente que posee una fuente de corriente y electrodos que aportan los iones que desestabilizan las partículas suspendidas y ejercen la función de los compuestos químicos que se añaden en las técnicas convencionales facilitando la remoción de los contaminantes. Además, también se han utilizado para la remoción de algunos compuestos orgánicos, eliminación de tinturas de aguas provenientes de la industria textil y hasta en la desalinización de las aguas del mar (Ticona, 2021).

Estas técnicas se fundamentan en la electrólisis, es decir, en la electroquímica de las reacciones redox, en las cuales ocurre la oxidación de una especie y la reducción de otra, de forma no espontánea, por lo que se requiere inducir con alguna fuente de energía eléctrica externa que se produzca una reacción química que transforme esta energía eléctrica a energía química (celda electrolítica) (Ticona, 2021; Remtavare, 2010). Entre estas técnicas se pueden mencionar:

- Electrodesinfección: utilizada para desinfectar aguas por transformación del ion hipoclorito (ClO^-) a cloro gaseoso (Cl_2) que actúa eliminando los microorganismos patógenos existentes.
- Electrodeposición: con esta técnica se logra atraer a los iones metálicos (Mn^{+}) a que se depositen en la superficie del cátodo, formando redes cristalinas debido a la oxidación del metal a su estado elemental o sólido (M^0), de forma que el metal contaminante pueda ser removido posteriormente del agua.
- Electrocoagulación: se basa en favorecer la coagulación de los sólidos suspendidos en el agua residual mediante el uso de electrodos de hierro y aluminio, que por electrólisis sufren una oxidación produciendo iones de hierro y aluminio que tienen la capacidad de absorber los sólidos y formar flóculos.
- Electroflotación: se lleva a cabo la electrólisis del agua para que se genere oxígeno e hidrógeno gaseosos en los electrodos y esas burbujas al ascender a la superficie arrastren consigo los sólidos suspendidos (flotación) para que puedan ser retirados con procesos posteriores.

Figura 14.

Electrodialisis



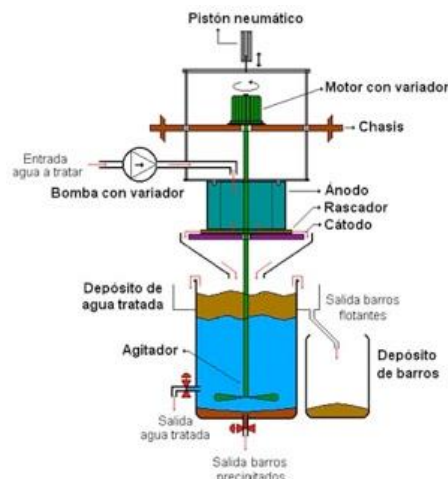
Fuente: Tapiero (2019).

- Electrooxidación: que se utiliza para provocar la oxidación de sustancias orgánicas que se encuentran disueltas en el agua residual, para que cristalicen o se oxiden formando compuestos de moléculas más simples que sean más fáciles de degradar.
- Electrodialisis: en esta técnica se emplea un conjunto de membranas aniónicas y catiónicas dispuestas alternadamente, estas membranas tienen incorporado especies cargadas eléctricamente para restringir de forma selectiva el paso de los iones que se encuentran en el agua que fluye a través de ellas, por diferencia de potencial se produce un flujo transversal de cationes y aniones al cátodo y al ánodo respectivamente (Figura 14).

Utilizando la electrocoagulación se pueden remover iones de metales pesados como cobre, níquel, plomo, cadmio, cromo y zinc con una eficiencia superior al 95% de eficiencia (Jack et al., 2013; Khosa et al., 2013; Al-Shannag et al., 2015). Por su parte, también se han reportado investigaciones para la remoción de estos mismos metales y de cobalto mediante electrofloculación, obteniéndose reportes de hasta un 100% de remoción para algunos de los iones (Chenar et al., 2013; Fan et al., 2012; Khaled et al., 2015).

Figura 15.

Esquema de equipo de Electrocoagulación



Fuente: <http://www.hidritec.com> (2016)

También es muy frecuente el uso de técnicas electrolíticas para la desalinización del agua de mar, del suero lácteo en la elaboración de quesos, recuperar componentes o materia prima valiosa en la industria de acabados metálicos y eliminación de metales pesados de las aguas de procesos de galvanoplastia (Caviedes et al., 2015; Ticona, 2021). (Ver Figura 15).

Tabla 9.

Estudios de aplicación de electrocoagulación para la remoción de metales pesados.

Especie	Condiciones					% Eficiencia de remoción	Referencia
	pH	Concentración inicial	t _{Tr}	T (°C)	Método y complemento		
Cu ²⁺	4-8	12 ppm	30 min	Ambiente	Floculación y sedimentación posterior a la electroquímica	95	Jack et al.; 2013.
Ni ²⁺ Pb ²⁺ Cd ²⁺	1-7	1 ppm	0-10 min	Ambiente	Adición de Potasio clorhídrico para aumentar la conductividad de la solución.	99 - 98,3 y 96,8 respectivamente con electrodos de hierro.	Khosa et al.; 2013.
Cu ²⁺ Cr ²⁺ Ni ²⁺ Zn ²⁺	9,5	93, 33, 57, 20 ppm, respectivamente	45 min	26	Electro-reactor con electrodos de acero de carbono de configuraciones monopares (6)	>97 en todos los metales	Al-Shannag et al.; 2015.

t_{Tr} = tiempo de tratamiento.

Fuente: Caviedes et al., (2015).

Tabla 10.

Estudios de aplicación de electrofloculación para la remoción de metales pesados.

Especie	Condiciones					% Eficiencia de remoción	Referencia
	pH	Concentración inicial	t _{Tr}	T (°C)	Método y complemento		
Pb, Ni, Cd, Co	-	Salinidad de 0,4 a 1,2%	-	Ambiente	Electrofloculación	94,4; 92,8; 64,4; 35,5 respectivamente	Chenar et al.; 2013.
Cd, Zn, Pb y Cu	11	1 %	30 min	Ambiente	Electrofloculación 2V	100; 99; 95,5; 98,6 para Cd, Zn, Pb y Cu respectivamente.	Fan et al.; 2012.
Cd	7,3	0,02 %	5 min	50	Electrofloculación monopolar	100	Khaled et al.; 2015.

t_{Tr} = tiempo de tratamiento.

Fuente: Caviedes et al., (2015).

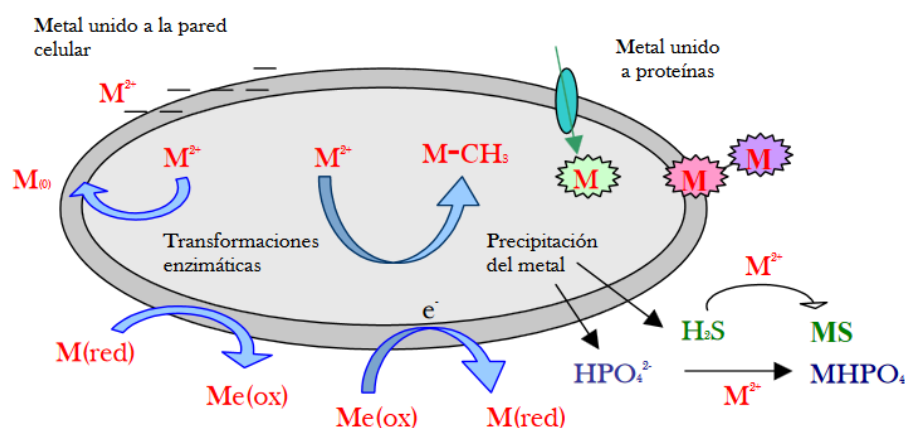
3.8 Biorremediación

Actualmente la contaminación del aire, suelo y el agua se ha transformado en un tema de interés mundial debido a que representa una potencial amenaza no sólo para la sostenibilidad ambiental y ecológica sino también para la salud humana, esto ha generado que los políticos y muchos organismos internacionales se esfuercen en pro de remediar y mitigar los daños en el medio ambiente y a proponer y desarrollar estrategias y nuevas tecnologías para promover el desarrollo sostenible.

Entre las nuevas tecnologías se encuentran las técnicas de biorremediación, que consiste en la aplicación de microorganismos, hongos, plantas o enzimas derivadas de los mismos con el propósito de llevar a cabo procesos de descontaminación que permitan mitigar o eliminar los efectos nocivos causados por sustancias contaminantes, debido a que su aplicabilidad es muy amplia puede considerarse para remediar cualquiera de los estados de la materia, es decir, sólidos como suelos, sedimentos, lodos, etc., líquidos como aguas residuales, superficiales o subterráneas, y también gases de las emisiones industriales. Esta técnica se basa en la utilización de agentes biológicos (microorganismos, plantas, hongos o enzimas) que tienen la capacidad de eliminar los contaminantes (Figura 16) transformándolos en productos inocuos (JM et al., 2017).

Figura 17.

Mecanismos de eliminación de metales pesados mediados por bacterias



Fuente: Vilchez, R. (2005)

Específicamente en el tratamiento de aguas residuales el uso de lodos activados es una de las tecnologías de biorremediación más aplicadas para el control de la contaminación acuática, en este caso se utilizan bacterias para degradar compuestos orgánicos biodegradables. El lodo activado es una mezcla de microorganismos y sólidos en suspensión. En el caso de biorremediación para aguas con metales pesados, la remoción del metal se produce por bioadsorción, este término se utiliza para describir los procesos en los que se forman enlaces entre el metal y los componentes celulares. Los microorganismos requieren de cantidad muy pequeñas de algunos metales y aprovechan sus propiedades químicas para realizar algunas reacciones catalíticas cuyas enzimas requieren de estas especies o también para el mantenimiento de la estructura tridimensional de las mismas, de forma tal que favorecen el normal funcionamiento metabólico de células. Sin embargo, existen algunos metales que no cumplen una función biológica y pueden resultar tóxicos, uniéndose por afinidad a los grupos sulfhidrilo (Tiol) presente en las cadenas proteicas e inactivando su función biológica (Vilchez, R., 2005; Garzón et al., 2017).

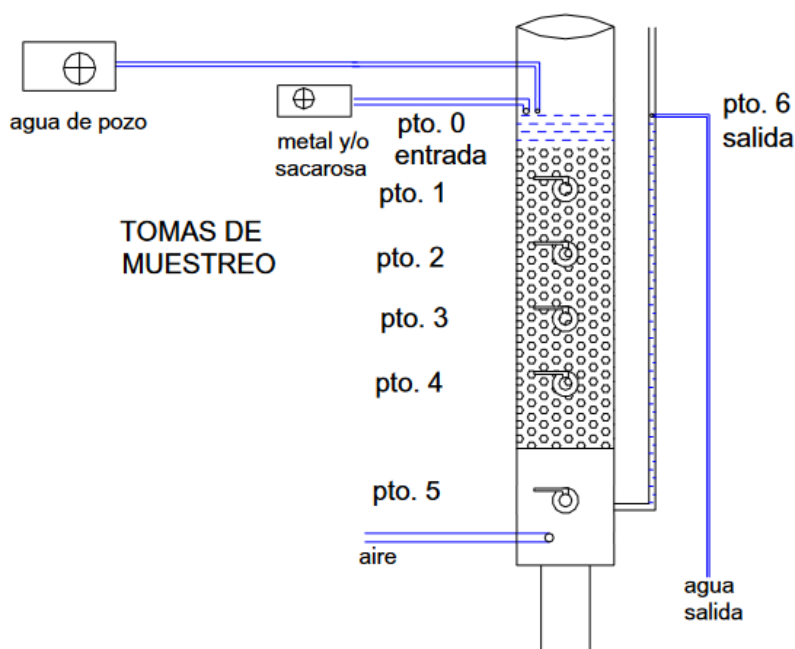
Estos microorganismos cuando se encuentran en medios contaminados con metales pesados actúan con diferentes mecanismos entre los cuales se encuentran: el transporte enzimático, precipitación y formación de proteínas como la metalotioneínas que les otorgan resistencia a altas concentraciones de metales pesados. Los cationes de los metales pesados, que se encuentran cargados positivamente interactúan electrostáticamente con aminoácidos o lípidos con carga negativa, lo que permite que los metales permanezcan unidos a la pared celular externa de los microorganismos.

Otro mecanismo consiste en que el metal reaccione con enzimas que se encuentran en el interior de la célula, las cuales implican reacciones redox que lo modifican químicamente en compuestos orgánicos que serán metabolizados y excretados al exterior (Vilchez, R., 2005).

Entre los equipos utilizados para la aplicación biorremediación se emplean tanque o reactores de lecho móvil conjuntamente con tanques decantadores, también se pueden utilizar filtros o columnas cuando el lecho es fijo y en el caso de la fitorremediación se utilizan humedales de flujo superficial y subsuperficial horizontal o vertical (Figura 18). A pesar de los métodos de biorremediación tienen una gran ventaja económica con respecto a las tecnologías convencionales y que existen una gran cantidad de pruebas de laboratorio que demuestran la capacidad de los microorganismos de biodegradar, biosorber, bioacumular o bioadsorber sustancias contaminantes, el éxito de las técnicas depende de mantener las condiciones físicas y químicas controladas y en la realidad de la industria esas condiciones son variables (Vargas Perdomo et al., 2019).

Figura 18.

Esquema de Biofiltro.



Fuente: Vilchez, R. (2005).

Diferentes estudios publicados reportan el uso de técnicas de biorremediación en la remoción de metales pesados como plomo y cadmio cuya adsorción sobre carbón activado mejora en presencia de la bacteria *Escherichia coli* en aguas residuales industriales y sintéticas; también se ha estudiado la adsorción del ion cúprico con el uso de un alga (*Ulothrix zonata*) reportando porcentajes de adsorción que varían entre un 20% y un 80% cuando la concentración del ion es de 50 ppm hasta 5 ppm respectivamente. Asimismo, se han aplicados métodos de biorremediación para la remoción de sustancias tóxicas en los efluentes de la industria dedicada a la minería del oro, la plata y el cobre (Vilchez, R., 2005). Por otra parte, se ha reportado la aplicación de fitorremediación con el uso de plantas con la capacidad de retener, metabolizar, acumular y absorber metales pesados, entre las cuales se encuentran *Thlaspi caerulescens* (cadmio y zinc), *Thlaspi rotundifolium* (Plomo), *Alyssum* (Níquel) y *Gnaphalium chartaceum* (Cobre, Manganeseo, Zinc y Plomo) (SA & JJ., 2017).

CAPITULO IV.

4 TECNICAS NO CONVENCIONALES PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS

4.1 Introducción

Los metales pesados son elementos químicos que tienen un elevado peso atómico, altas densidades y gran toxicidad. Además, son bioacumulables y no biodegradables, lo que podría ocasionar efectos negativos en la salud de las personas y a nivel ambiental (Pérez, 2023). Los metales pesados se clasifican en esenciales y no esenciales, los más pesados son el platino y el oro, los cuales no están considerados como esenciales y no existe evidencia acerca de sus efectos contaminantes. El Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Zirconio (Zr) y Vanadio (V), se encuentran abundantemente y son considerados esenciales y otros como el cadmio, mercurio y plomo, los cuales no son esenciales y se consideran zootóxicos (Martínez, 2018).

En su mayoría, las aguas contaminadas por metales pesados, son producto de los vertidos de aguas residuales derivadas de actividades humanas, en especial las industriales. Algunos metales pesados son liberados hacia las fuentes de agua y a los suelos, representando una importante amenaza para todos los seres vivos. De acuerdo al tipo de actividad desarrollada por el hombre, es que llegan estos metales a los ecosistemas. En el caso del Cromo, este es un elemento que se utiliza ampliamente para revestimientos plásticos, galvanoplastia, curtir pieles, colorantes y preservantes de madera (Pabón et al., 2020).

Elementos como el cadmio, se utilizan en la producción de baterías, anticorrosivos y colorantes. El mercurio proviene principalmente por deposiciones atmosféricas, erosión, vertidos humanos, materiales agrícolas, actividades mineras, descargas de la industrial y combustión, mientras que el Plomo se libera al ambiente por descargas de la industria minera y la quema de combustibles fósiles, se utiliza principalmente en la elaboración de baterías, municiones y dispositivos para la protección contra los rayos X (Pabón et al, 2020).

La toxicidad de estos metales depende de la cantidad en la que se ingieran y de la

dosis excretada, por ejemplo, la ingesta de Arsénico durante un largo tiempo puede ocasionar intoxicación crónica que afecta la piel y las vías respiratorias, ocasionando perforación del tabique nasal y cáncer de piel y pulmón. El Cadmio produce consecuencias adversas renales, respiratorias y en el sistema óseo, además, se considera que produce cáncer los seres humanos. El Mercurio es dañino para la salud de los humanos y representa una gran amenaza para el desarrollo del feto y en los primeros años de vida del bebé, la absorción de mercurio en el cuerpo afecta el sistema nervioso central y ocasiona daños renales (Martínez, 2018).

El Plomo es un material que afecta a varios sistemas del cuerpo humano, como el neurológico, el hematológico, el gastrointestinal y el renal. El cromo también se considera tóxico, debido a que es potencialmente carcinogénico, mutagénico y teratogénico. Con respecto al Cobre, sus vapores pueden ocasionar intoxicación, fiebre, irritar ojos, piel y mucosas. Su exposición crónica puede ocasionar náuseas, vómito, anorexia y otras afecciones. Al inhalar vapores de Níquel se generan síntomas similares a los de la gripe y puede llevar a largo plazo a sufrir edema pulmonar, causando la muerte de manera rápida en caso de no tratarse. Finalmente, el óxido de zinc se absorbe por medio de los pulmones y el tubo digestivo ocasionando la fiebre de zinc, sus síntomas también son parecidos a la gripe e incluyen sudoraciones, temblor, dolor, escalofrío, náuseas, vómito, fatiga, etc. (Martínez, 2018).

Además de todos los problemas de salud descritos, los metales pesados pueden contaminar la atmósfera, el suelo y el agua. A altas temperaturas, el Mercurio, el Arsénico y el Selenio, se convierten en gases que se liberan al aire, pudiéndose depositar en diferentes lugares contaminando otros sistemas o ser respirados. Por otro lado, las descargas de industrias como la minera, están cargadas de metales pesados, si estas aguas son liberadas, contaminan las aguas que se encuentran en su alrededor, ocasionando la muerte de animales como peces y crustáceos de río o el ganado que consume esas aguas, además de destruir los suelos y la vegetación. Debido a estos problemas que generan los metales pesados, se han explorado diversas técnicas para poder removerlos de las aguas residuales. Dentro de las técnicas convencionales están la precipitación química, la adsorción en carbón activado, la separación por membrana, el intercambio iónico, las evaporaciones y los tratamientos electroquímicos, sin embargo, estas técnicas presentan restricciones de

factibilidad técnica o económica, en especial cuando las concentraciones de metales son bajas. Además, presentan cierta dificultad para lograr disponer los desechos producidos en el tratamiento (Chuquilin, 2020). Algunos tratamientos convencionales requieren el uso de químicos que pueden generar productos halogenados nocivos para los seres vivos, mientras que otros tienen una vida útil corta o requieren de un gran conocimiento para su análisis e implementación.

Es por ello que se hace necesario explorar nuevas técnicas para la remoción de metales pesados de las aguas residuales con el fin de implementar procesos eficientes que ayuden a la remoción de estos contaminantes e incluso que puedan recuperarse para su reutilización en diversos procesos productivos. En este sentido, se explicarán en este capítulo, de manera detallada, las técnicas no convencionales que se emplean para la eliminación de metales pesados de aguas residuales.

4.2 Fundamentos de la absorción

La adsorción, es un proceso por el cual se extrae materia de una fase para ser concentrada sobre la superficie de otra, por lo general esta superficie es sólida, lo que hace que el fenómeno se considere como fenómeno de superficie. En este sentido, la sustancia que se absorbe o que se concentra se le conoce como adsorbato y la superficie sólida se conoce como adsorbente (González, 2016).

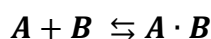
Por ende, el fenómeno de adsorción es el resultado de la interacción entre las moléculas que se encuentran en la solución y la superficie sólida del adsorbente, por lo general este proceso es utilizado en la potabilización del agua, ya que con él se pueden eliminar compuestos que generan color, sabor y olor en la misma, así como también la eliminación de subproductos de los procesos de desinfección y orgánicos sintéticos. Este proceso se puede llevar a cabo a través de métodos químicos, conocidos como quimiosorción o métodos físicos, llamados fisisorción (Andrade, 2007).

Cuando el proceso es llevado a través de métodos químicos, la energía de las interacciones son del mismo orden de magnitud que en una reacción química, este método es más específico, debido a que se involucra la transferencia de electrones entre el adsorbente y el adsorbato, además se pueden formar enlaces con la superficie, mientras que cuando el proceso se lleva a cabo mediante métodos físicos,

las interacciones que predominan son Van Der Waals, es decir, que la reacción entre las moléculas pueden ser atractivas o repulsivas, donde la molécula fisisorbida mantiene la identidad química, por otra parte, el proceso de adsorción por métodos físicos es reversible, es decir, que el adsorbato gracias a un cambio en el gradiente de concentración de la solución puede ser desorbido (González, A. 2016).

El proceso de adsorción se lleva a cabo gracias a las fuerzas intermoleculares sin balancear, entre las moléculas que se encuentran en el fluido y la superficie del sólido, hasta que se logra el equilibrio entre ambas (Crittenden, J. 2005).

Representado en una ecuación, el proceso se puede identificar de la siguiente manera:



Donde:

A = Adsorbato

B = Adsorbente

A·B = Compuesto absorbido

De acuerdo a la ley de velocidad que describe el proceso de adsorción, se tiene la siguiente ecuación.

$$v_{AD} = K(C_A C_B - \frac{C_{A \cdot B}}{K_e})$$

Donde:

v_{AD} = Velocidad de adsorción

C_A = Concentración del adsorbato

C_B = Concentración del adsorbente

C_{AB} = Concentración del compuesto adsorbido

K = Constante de adsorción

K_e = Constante de equilibrio de adsorción

4.2.1 Tratamiento de efluentes con materiales de adsorción

Una de las características principales de los materiales de adsorción, es que tienen la capacidad de retener sustancias tóxicas, estos materiales pueden ser sintéticos o naturales, independientemente de la naturaleza del material de adsorción, estos deben asegurar que las características mecánicas, físicas y químicas sean buenas (Andrade, G. 2007).

Por otro lado, dependiendo del tipo y concentración del adsorbato se selecciona un material adsorbente determinado, teniendo en cuenta que estos se clasifican en materiales microporosos, mesoporosos y macroporosos, con volumen de poro diferentes que varían entre 0,1 a 0,8 ml/g, área extensa específica entre los 400 a 1500 m²/g y sitios activos disponibles para la adsorción (Andrade, G. 2007).

La importancia de la calidad y característica de los materiales adsorbentes, radica en la capacidad de descontaminar fluidos, por ejemplo, en el tratamiento de agua, son utilizados por la gran capacidad de retener grandes concentraciones de contaminantes, haciendo del agua tratada apta para el consumo humano y las actividades cotidianas. Entre los contaminantes que pueden ser removidos del agua a través del proceso de adsorción se encuentran, microorganismos patógenos, plaguicidas, sustancias radioactivas, metales pesados, materia orgánica, entre otros (Ídem).

Entre los materiales adsorbentes comúnmente utilizados en la remoción de metales pesados, se tienen el carbón activado, el óxido de hierro, resinas de intercambio iónico, fibras de carbón activado, en sí, los materiales adsorbentes tienen que tener las siguientes características (Ídem):

- Capacidad de adsorción elevada.
- Tamaño de partícula y propiedades físicas adecuadas con el objetivo de garantizar la resistencia mecánica y facilidad de manejo.
- Costo de materia prima de fabricación y el costo del proceso accesible.
- En los casos de procesos continuos, el material adsorbente debe ser fácil de regenerar.

4.2.2 Relaciones de equilibrio. Isotermas de adsorción.

Para cuantificar la afinidad entre el adsorbato y el adsorbente, se utilizan las isotermas de adsorción, que son las ecuaciones matemáticas que permiten describir la relación entre la cantidad de adsorbato adsorbido por el adsorbente y la concentración que se tienen en la solución cuando se alcanza el equilibrio a temperatura constante (B. et al., 2012)

Para llevar a cabo este proceso, se coloca un volumen conocido con una cantidad

conocida de adsorbato junto con varias dosis de adsorbentes, esta mezcla se mantiene a temperatura y agitación constante hasta lograr que alcance el equilibrio, luego se mide la concentración en la fase acuosa y la capacidad de adsorción en el equilibrio, la fórmula para calcular el balance de masa en cada experimento es la siguiente:

$$q_e = \frac{V}{M} (C_0 - C_e)$$

Donde:

q_e = Masa de soluto adsorbido por el adsorbente (mg adsorbato/g de adsorbente)

C_0 = Concentración inicial del adsorbato (mg/L)

C_e = Concentración del adsorbato en el equilibrio (mg/L)

V = Volumen de la fase acuosa (L)

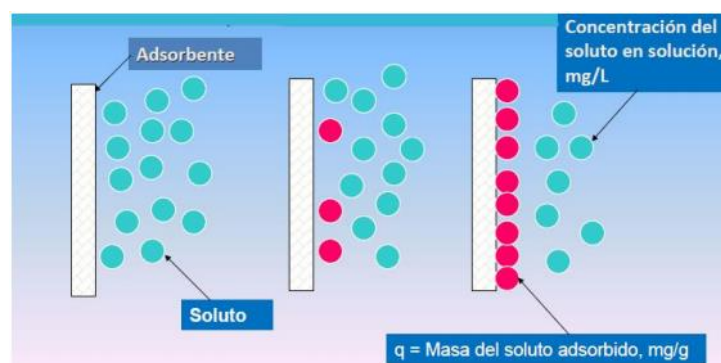
M = Masa del adsorbente (g)

Gráficamente la adsorción se puede describir de acuerdo a la representación que se muestra en la figura 19.

Con el objetivo de describir la capacidad de adsorción en el equilibrio de los adsorbentes se han desarrollado varios modelos matemáticos, entre los cuales se encuentran el modelo de Langmuir y el modelo de Freundlich. A continuación, se describen estos modelos.

Figura 19.

Representación gráfica de la adsorción



Fuente: González, (2016).

4.2.3 Modelo de Isoterma de Langmuir

Este modelo se utiliza con el objetivo de describir el equilibrio existente entre la superficie del adsorbente y la solución como un equilibrio químico reversible entre especies. La manera en que está constituida la superficie del adsorbente es mediante sitios activos, en las cuales, las moléculas del adsorbato pueden ser químicamente enlazadas (Koubaissy, B., et al. 2012).

En sí, el modelo indica que cada sitio de la superficie del adsorbente debe estar en la capacidad de enlazar al menos una molécula del adsorbato, esto debe formar una monocapa, de acuerdo con Koubaissy, B., et al. (2012), la ecuación que expresa en términos de acumulación de masa del adsorbato sobre el adsorbente es la siguiente:

$$q_A = \frac{Q_M b_A C_A}{1 + b_A C_A}$$

Donde:

q_A = Cantidad de adsorbato removida por el adsorbente, representado en mg adsorbato/g de adsorbente.

C_A = Concentración en el equilibrio del adsorbato, representado en mg/L.

Q_M = Cantidad máxima de adsorbato adsorbida por el adsorbente, representado en mg adsorbato/g de adsorbente.

b_A = Constante de adsorción de Langmuir, representado en L/mg.

4.2.4 Modelo de Isoterma de Freundlich

Koubaissy, B., et al. (2012) indican que cuando se desarrolló este modelo, fue presentado como una ecuación empírica y se utiliza para describir los datos obtenidos de adsorbentes heterogéneos como el carbón activado, el modelo es representado de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$q_A = K_A C_A^{1/n}$$

Donde:

q_A = Cantidad de adsorbato removida por el adsorbente, representado en mg adsorbato/g de adsorbente

C_A = Concentración en el equilibrio del adsorbato, representado en mg/L

K_A = Parámetro de Freundlich de la capacidad de adsorción, representado en $(\text{mg/g})(\text{L/mg})^{1/n}$

$1/n$ = Parámetro de Freundlich de la intensidad de adsorción, no tiene unidades.

En general este modelo de isoterma, se utiliza en la adsorción de sistemas líquido – sólido, se basa en la distribución de la energía de adsorción en los sitios es exponencial, lo que indica que existe una interacción entre las moléculas adsorbidas en las adyacencias, lo que ocasiona la formación de una multicapa (Koubaissy, B., et al. 2012).

4.2.5 Cinética de adsorción

Con la finalidad de analizar la variación de la concentración en función del tiempo, existen modelos en los que se pueden ajustar los datos experimentales, para lo cual es necesario realizar el análisis de los datos cinéticos mediante el cálculo de la cantidad adsorbida por gramo de adsorbente, representado como q ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$). Lagergren, presenta un modelo de pseudo – primer orden, donde la ley de velocidad se establece como aparece en la siguiente ecuación:

$$\gamma = K_1(q_e - q)$$

Donde:

q_e = Cantidad adsorbida en el equilibrio.

q = Concentración adsorbida en cualquier instante de tiempo (t).

K = Constante de velocidad específica.

Esta ecuación depende del área de superficie disponible, de la masa del adsorbente

y la cantidad adsorbida, en cuanto a la masa del adsorbente, esta permanece constante durante el experimento por lo cual no es una variable, en relación a sistemas cerrados, operado por lotes, se tiene que la variación de la concentración respecto al tiempo, queda definida por la siguiente ecuación:

$$\frac{dq}{dt} = \gamma$$

Al resolver la ecuación anterior con la condición inicial $q_{(t=0)} = 0$, se tiene lo siguiente:

$$\ln(q_e - q) = \ln(q_1^{cal}) - K_1 \cdot t$$

Donde:

q_1^{cal} = Capacidad de adsorción en equilibrio calculada de acuerdo al modelo de pseudo – primer orden.

Al observar la ecuación, esta sugiere que el gráfico de $\ln(q_e - q)$ en función del tiempo (t), se debe ajustar a una línea recta, cuya pendiente y la ordenada al origen se encuentran relacionadas con los valores de k_1 y q_1^{cal} respectivamente.

En cuanto al valor de q_e , este es el dato experimental que representa el equilibrio durante la cinética (Usly, H. y Demir, G. 2010).

Un modelo de pseudo – segundo orden para el estudio de la cinética, es el presentado por Ho y Mckay, el cual matemáticamente se expresa con la siguiente ecuación:

$$r = K_2(q_e - q)^2$$

Resolviendo la ecuación con la condición inicial $q_{(t=0)} = 0$ se tiene:

$$\frac{1}{q_e - q} = -K_2 t + \frac{1}{q_e}$$

Reacomodando los términos e igualando $q_2^{cal} = q_e$, se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{K_2(q_2^{cal})^2} + \frac{1}{q_2^{cal}} t$$

Al realizar el gráfico t/q en función de t , se puede ajustar a una línea recta, por la ecuación esta tiene pendiente $1/q_2^{cal}$, donde q_2^{cal} , es la capacidad de adsorción en el equilibrio calculada por el modelo de pseudo – segundo orden. Luego del valor de la ordenada se obtiene el valor de k_2 que es la constante de velocidad específica (Molina, T. 2009).

Los valores obtenidos por el modelo pseudo – segundo orden se calcula la tasa de adsorción inicial, conocida como $h(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$ y el tiempo medio de adsorción, $t_{1/2}(\text{min})$ de acuerdo con las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$h = K_2 \cdot q_e^{cal^2}$$

$$t^{1/2} = \frac{1}{K_2 \cdot q_e^{cal}}$$

En relación a la energía de activación, E_a cuyas unidades son $\text{KJ} \cdot \text{mol}^{-1}$, del proceso de adsorción en diferentes temperaturas, se puede calcular utilizando la ecuación de Arrhenius con su forma lineal, así como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\ln(K_2) = \frac{-E_a}{RT} + \ln(K_0)$$

Donde:

K_0 = Constante obtenida de la gráfica $\ln(k_2)$ en función de $1/T$

E_a = Pendiente de la recta.

Existe otro modelo de cinética de adsorción, conocido como modelo de difusión intrapartícula, la cual se basa en el transporte del soluto mediante una estructura interna de los poros del adsorbente y la difusión propiamente dicha en el sólido, esto indica que el adsorbente debe estar constituido por una estructura porosa.

De acuerdo con Weber y Morris, la difusión intrapartícula es el paso limitante de la velocidad del proceso, la representación gráfica de la carga adsorbida en función de la raíz cuadrada del tiempo, resultará una recta que pasa por el origen cuando la difusión intrapartícula sea el único paso limitante de velocidad del proceso en la remoción del adsorbato, esto indica que la pendiente es la velocidad de difusión intrapartícula (Molina, T. 2009).

La ecuación que define lo anterior es la siguiente:

$$q_t = K_i \cdot t^{0.5}$$

Donde:

q_t = Carga adsorbida en el tiempo t .

K_i = Velocidad de difusión intrapartícula ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

t = Tiempo, expresado en min.

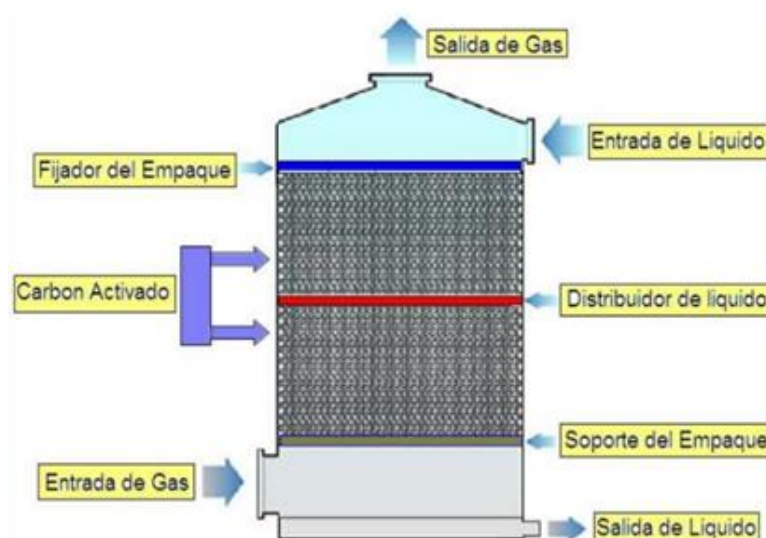
Al graficar y generar la recta, se pueden obtener dos regiones, la primera región se atribuye a la difusión en la superficie o seno del fluido, la segunda región se le atribuye a la difusión que ocurre dentro de los poros, en cuanto a la velocidad de adsorción esta podría ser limitada por el tamaño de la molécula del adsorbato, la relación M_p/V_s , la distribución porosa del material y la afinidad que exista entre el adsorbato y el adsorbente (Molina, T. 2009).

4.3 Adsorbentes de bajo costo y nuevos adsorbentes

En la adsorción, un compuesto líquido o gaseoso (adsorbato) entra en contacto con un material sólido denominado adsorbente al cual se adhiere por medio de la fuerza de dispersión de London. En este proceso físico no existe intercambio de electrones, por lo que es reversible y se emplea comúnmente para la depuración de gases y líquidos (Carbotecnia, 2023).

Figura 20.

Representación de una columna de adsorción con carbón activado



Fuente: Romero, (2015).

A nivel industrial, la adsorción se realiza por medio de columnas empacadas (Figura 20) a través de las cuales se hace circular el líquido o gas que se va a limpiar. El ejemplo más común de adsorción es la depuración del agua mediante el uso de carbón activado debido a que es capaz de adsorber diversas moléculas de origen orgánico y algunas inorgánicas tales como hidrocarburos, pesticidas, herbicidas, detergentes, entre otros (ChiemiVall, 2022).

La adsorción ha ido adquiriendo importancia por ser un método sencillo y de bajo costo para ser empleado en la remoción de contaminantes en la purificación de aguas, ya que es un proceso que permite ser flexible en el diseño, además de generar un efluente tratado de calidad, con la posibilidad de regeneración del material adsorbente utilizado y de revertir el proceso. Para que un material sea catalogado como buen

adsorbente, debe reunir las siguientes características:

- Gran capacidad de adsorción.
- Elevada porosidad.
- Amplia superficie de contacto.
- Tener zonas específicas de adsorción.

Además de las características anteriores, un adsorbente de bajo costo debe estar altamente disponible, no ocasionar daños al medio ambiente, debe estar disponible a nivel local y su proceso de obtención debe ser de bajo costo (Duany S. et al., 2022). Es así como en el proceso de adsorción se emplean gran cantidad de adsorbentes y entre los menos costosos y eficientes están la bentonita, el caolín y las zeolitas, debido a que su composición les proporciona gran capacidad para el intercambio catatónico, haciéndolos ideales para remover distintos contaminantes. Además de estas propiedades, las arcillas son muy abundantes en la tierra y por su capacidad de neutralizar contaminantes, se han utilizado en la protección del ambiente y en la disposición y almacenamiento de sustancias químicas peligrosas, por su capacidad de adsorción (Carbonel, 2018).

Debido a la gran capacidad de adsorción e intercambio de iones, a la baja permeabilidad, gran área superficial y estabilidad, las arcillas y zeolitas son ampliamente utilizadas como adsorbentes en la eliminación de metales pesados. La concentración de metales removidos, dependerá de la capacidad de intercambio catatónico de las arcillas y de ciertos parámetros como el pH de la solución, la temperatura, la presencia de otros elementos, la cantidad inicial de metales y la concentración del adsorbente.

Además del carbón activado y de las arcillas y zeolitas, existe una amplia gama de adsorbentes naturales que se han analizado con el fin de explorar opciones más económicas como el bagazo de caña, la paja y cáscara de arroz, las cenizas, la fibra de coco y la cáscara y la turba, los cuales han sido analizados y han arrojado buenos resultados en la remoción de color, contenido orgánico, metales pesados, fenoles, grasas y aceites. Estos distintos materiales adsorbentes se describirán en más detalle a lo largo de este capítulo. (Díaz et al., 2021).

1. Adsorción de metales pesados por materiales naturales agrícolas e

industriales

La bioadsorción es una técnica empleada para la remoción de contaminantes en soluciones líquidas utilizando biomasa viva o muerta, por lo que resulta un proceso económico que no requiere de nutrientes y que ha arrojado resultados efectivos en la adsorción de metales pesados en el agua (Duany et al, 2022). En la bioadsorción existe la posibilidad de regenerar el bioadsorbente y no forma contaminantes secundarios. Los bioadsorbentes se encuentran disponibles en forma de desechos agroindustriales, lo cual resulta ventajoso para su empleo en el tratamiento de aguas contaminadas, esto debido a que los residuos agrícolas están conformados por diversos grupos funcionales capaces de adsorber ciertos contaminantes (Díaz et al, 2021).

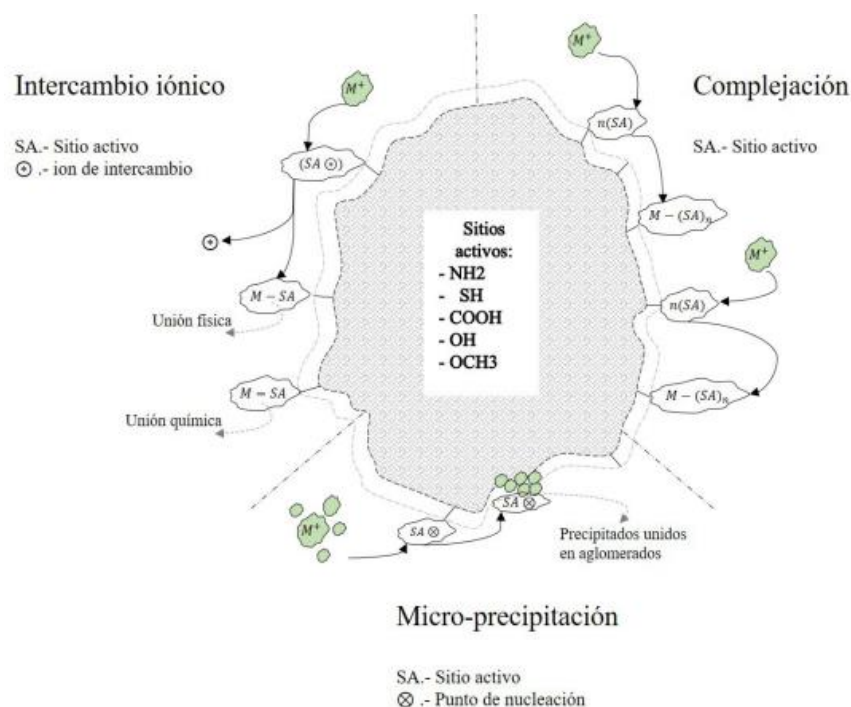
La interacción de los metales pesados con el bioadsorbente es un proceso donde posiblemente ocurran los siguientes mecanismos:

- Complejación: se refiere a la conformación de una macromolécula por medio de la combinación de dos o más especies, siendo una de estas un ion de metal.
- Microprecipitación: resulta de la reacción entre los iones de metales y los compuestos que se encuentran en la superficie.
- Intercambio iónico.

Estos mecanismos, como se mencionó antes, son posibles debido a la presencia de grupos funcionales que están en la superficie y poros del bioadsorbente (Figura 21). El uso de subproductos agroindustriales como material adsorbente, ha sido estudiado con el fin de explorar nuevas alternativas que compitan con los adsorbentes tradicionales, como el carbón activado. La agroindustria genera gran cantidad de subproductos y desechos que son de bajo costo y tienen gran disponibilidad como los tallos, semillas, bagazos, cáscaras, etc., los cuales básicamente contienen hemicelulosa, azúcares simples, lignina, almidón, lípidos y proteínas, que contienen los grupos funcionales que son capaces de realizar la adsorción de los metales (Sánchez et al., 2020).

Figura 11.

Mecanismos involucrados en la bioadsorción utilizando subproductos agroindustriales



Fuente: Sánchez et al, (2020).

La composición de estos subproductos va a depender del proceso al que sido sometida la materia prima para su transformación y pueden ser utilizados en procesos de bioadsorción en su forma natural o también pueden ser modificados. Cuando se emplean en su forma natural, simplemente se someten a un lavado para luego ser triturados y tamizados con el fin de obtener el tamaño de partícula ideal y cuando se emplean en su forma modificada es cuando se reposan en soluciones ácidas o básicas, con el fin de optimizar el potencial del grupo funcional y aumentar la cantidad de sitios activos donde se puedan adsorber los metales pesados (Sánchez et al, 2020).

Básicamente, los subproductos agroindustriales están compuestos por polisacáridos estructurales como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina, la cual es un componente clave en los procesos de bioadsorción, debido a que la lignina aporta resistencia mecánica y contiene amplia variedad de grupos funcionales capaces de combinarse a iones metálicos por medio de la donación del par de electrones del oxígeno y generar complejos estables. En la tabla 11, se muestra la capacidad de bioadsorción para distintos subproductos agroindustriales empleados de manera natural.

Tabla 11.

Capacidad máxima de bioadsorción para distintos subproductos

agroindustriales

Adsorbato	Subproducto	Capacidad máxima de adsorción (mg/g)
Cd(II)	Bagazo de agave	13.27
	Cáscara de kiwi	470
	Cáscara de mandarina	450
	Cáscara de plátano	195
	Vástago de trigo	11.6
	Cáscara de coco	37.78
	Hueso de olivo	7.73
	Paja de arroz	13.84
Pb(II)	Cáscara de plátano	2.18
	Bagazo de agave	35.60
	Césped de jardín	58.34
	Hueso de olivo	9.26
	Cáscara de mandarina	112.10
	Mazorca de maíz	16.22
	Aserrín	15.90
	Cáscara de melón	167.80
	Cáscara de ajo	51.73
	Cáscara de coco	54.62
Zn(II)	Bagazo de agave	7.84
	Cáscara de mango	28.21
	Cáscara de kiwi	280
	Cáscara de plátano	125
	Cáscara de mandarina	260
	Aserrín	0.96
	Cáscara de coco	17.08
Cu(II)	Cáscara de lenteja	9.59
	Cáscara de mango	46.09
	Paja de cebada	4.64
	Flores de sol	57.14
	Paja de avena	17.42
	Cáscara de papa	0.39
	Cáscara de arroz	2.95
	Hueso de olivo	2.03
	Cáscara de naranja	50.94
	Cáscara de coco	41.36
	Aserrín	6.88
	Cáscara de toronja	19.70
Ni(II)	Cáscara de nuez de la India	18.86
	Cáscara de mango	39.75
	Cáscara de granada	52
	Cáscara de coco	16.34
	Hueso de olivo	2.13
	Bagazo de caña de azúcar	2.0
	Aserrín	3.29
	Cáscara de toronja	46.13

Hg(II)	Cáscara de mandarina	19.01
	Bagazo de caña de azúcar	35.71
	Paja de arroz	22.06
Cr(VI)	Cáscara de kiwi	375
	Cáscara de mandarina	350
	Cáscara de lima	250
	Cáscara de plátano	240
	Cáscara de arroz	8.5
	Orujo de oliva	13.95

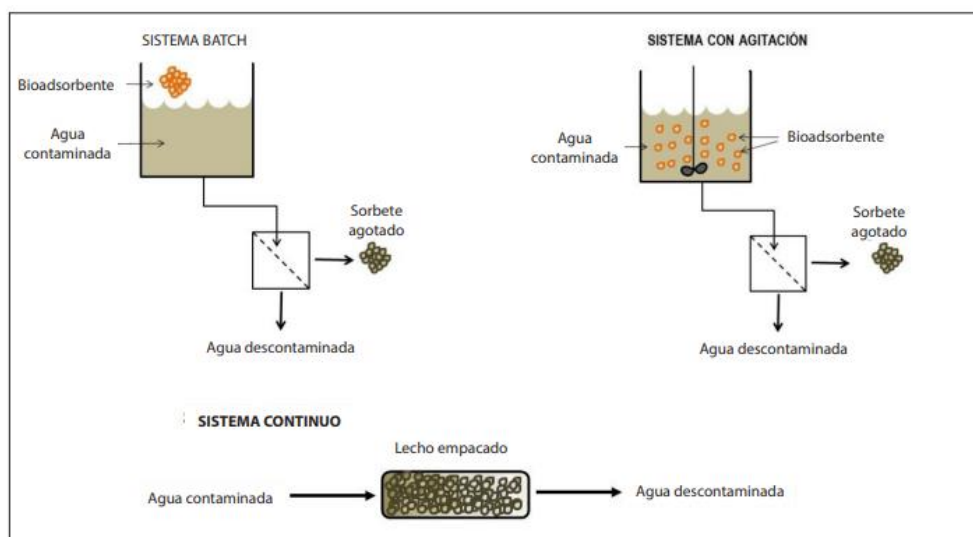
Fuente: Sánchez et al, (2020).

Además de todos los desechos o subproductos agroindustriales mencionados en la tabla anterior, existen otros residuos minerales e industriales que también han sido estudiados con el fin de utilizarlos como materiales adsorbentes, entre los que destacan los residuos industriales que provienen de la producción de papel como los lodos de cal y las cenizas de las calderas. En cuanto a residuos minerales, se ha estudiado el uso de vermiculitas contenidas en xerogeles orgánicos utilizados en la remoción de metales pesados (Valdez, 2023).

En la Figura 22 se aprecian tres ejemplos de aplicación de adsorbentes naturales para la depuración de aguas residuales.

Figura 22.

Representación esquemática de tres sistemas para la depuración de aguas residuales con bioadsorbente.



Fuente: Valladares et al, (2017).

2. Fitorremediación

La fitorremediación o remediación verde, es una técnica que se basa en el uso de

plantas con el fin de remediar la contaminación con metales pesados, por lo que se considera una tecnología amigable con el medio ambiente y de bajo consumo energético que ha demostrado resultados prometedores (Ghughe et al., 2023). Las plantas que se empleen en esta técnica deben ser de desarrollo rápido, presentar abundante biomasa, raíces extensas, de fácil cultivo y que sean muy resistentes a los metales pesados (Santos et al., 2023).

La absorción de los metales pesados ocurre por medio de las vías de apoplasto y simplasto empleando distintos canales iónicos y transportadores de metales en las raíces, seguido de una mayor translocación a las partes comestibles de la planta a través del xilema y el floema. Los metales entran en el xilema por medio del movimiento simplástico originado por el gradiente electroquímico (Santos et al, 2023). La funcionalidad de la fitorremediación va a depender del tipo de medio impactado, del tipo de contaminación o del tipo de proceso que se prefiere que suceda, bien sea estabilización, asimilación, degradación, etc., para ello se emplean Fito tecnologías basadas en los mecanismos fisiológicos que se dan de forma natural tales como la fotosíntesis, metabolismo y nutrición (Guio & Toscano, 2018).

Dentro de las Fito tecnologías están los humedales artificiales los cuales son terrenos donde se instala un material impermeable con el fin de evitar filtraciones en el subsuelo y sobre este material se coloca un sustrato compuesto de arena, grava, piedra y otros elementos, para luego colocar determinadas plantas acuáticas flotantes. Estos sistemas alojan un ecosistema donde se fusionan el medio acuático y el terrestre para refugiar gran variedad de especies, simulando los procesos naturales y se emplean para depurar las aguas de origen industrial o residencial (Ruiz, 2019). Los humedales artificiales forman parte de las técnicas no convencionales para la depuración del agua residual, depurando el agua mediante el filtrado de los desechos en un ambiente controlado.

Básicamente, los humedales artificiales están compuestos por tres partes fundamentales: sustrato, plantas y agua. La función del sustrato es servir de soporte a las plantas y posibilitar que las bacterias que intervienen en la eliminación de contaminantes orgánicos de las aguas residuales, se puedan fijar. Las plantas utilizadas generalmente son macrófitas emergentes que intervienen oxigenando el sustrato radical y eliminando los contaminantes por absorción y finalmente, el agua

residual altamente contaminada, es la que proporciona el alimento a estas plantas y tras pasar por el humedal regresa al cauce con mejor calidad que la que tenía al inicio del tratamiento (Nuevo, 2023)

Los humedales artificiales se pueden clasificar según tipo de plantas que se empleen en su diseño, las cuales pueden estar enraizadas o flotando libremente (Neira, 2020). De acuerdo a las características de estas plantas, los humedales artificiales se clasifican en:

- Sistemas de tratamiento que se basan en plantas macrófitas de hojas flotantes: en su mayoría angiospermas en suelos inundados. Los órganos reproductores de estas plantas son aéreos, como es el caso del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*), las cuales son las especies que más se utilizan en este tipo de sistemas.
- Sistemas de tratamiento que se basan en macrófitas sumergidas: estos sistemas pueden tener algunos helechos, gran variedad de musgos, carófitas y angiospermas, los cuales están en toda el área donde llega el sol y los órganos reproductores de estas plantas son flotantes o sumergidos.
- Sistemas de tratamiento que se basan en macrófitas con raíces emergentes: en suelos inundados; generalmente son plantas perennes que tienen órganos reproductores aéreos.

Entre las plantas más comúnmente utilizadas en el diseño de humedales artificiales están las siguientes: lechuga de agua (*Pistia stratiotes*), jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), redondita de agua (*Hydrocotyle ranunculoides*), helecho de agua (*Azolla*), lenteja de agua (*Lemna minor*) y totora (*Schoenoplectus californicus*). En el capítulo que se describe a continuación se desarrollara más profundamente este tema.

3. Biopolímeros

Los biopolímeros son elementos plásticos, pero que se consiguen de fuentes naturales y renovables, generalmente de residuos agrícolas que contienen almidón o celulosa. Se pueden obtener también de diversos carbohidratos como el azúcar, el almidón, la celulosa, la lignina, las biograsas o los aceites (Schwarz., 2022). Representan una alternativa factible para la obtención de hidrogeles, puesto que están

disponibles abundantemente en la naturaleza, facilitando su obtención y procesamiento, además de ser biodegradables y favorecer el desarrollo de microorganismos que contribuyen a la adsorción.

Los biopolímeros constituyentes de residuos agrícolas y de desechos derivados de la producción de alimentos, presentan importantes capacidades adsorbentes, sin embargo, requieren el empleo de estabilizadores que modifiquen sus propiedades de adsorción, esto debido a su baja estabilidad mecánica y rápida degradación (Burciaga et al, 2020). Entre los biopolímeros más frecuentemente utilizados están los siguientes:

- Quitosano: se consigue de manera abundante en la naturaleza y proviene de artrópodos y crustáceos. Es un desecho del procesamiento de alimentos, convirtiéndolo en un material sostenible para la fabricación de hidrogeles capaces de absorber iones metálicos.
- Celulosa: es un polímero que se consigue en casi todas las plantas, con capacidad demostrada para remover iones de metales debido al intercambio de iones y a la cantidad de grupos funcionales con propiedades adsorbentes que están presentes en su estructura.
- Alginato: es un polisacárido aniónico que se consigue ampliamente en las algas marinas y representa un biopolímero provechoso, que no es tóxico y en cuya estructura se encuentran grupos hidroxilo y carboxilato que le confieren gran capacidad de adsorción.
- Colágeno: es la principal proteína que se consigue en los tejidos de la piel y los conectivos de los mamíferos. Su estructura está determinada por aminoácidos, los cuales pueden ser zonas para la interacción con iones metálicos.

Estos son los biopolímeros más empleados, debido a que presentan propiedades fisicoquímicas que permiten la retención de contaminantes. En la figura 23 se representa la formación de hidrogeles compuestos, utilizados para la adsorción de iones metálicos.

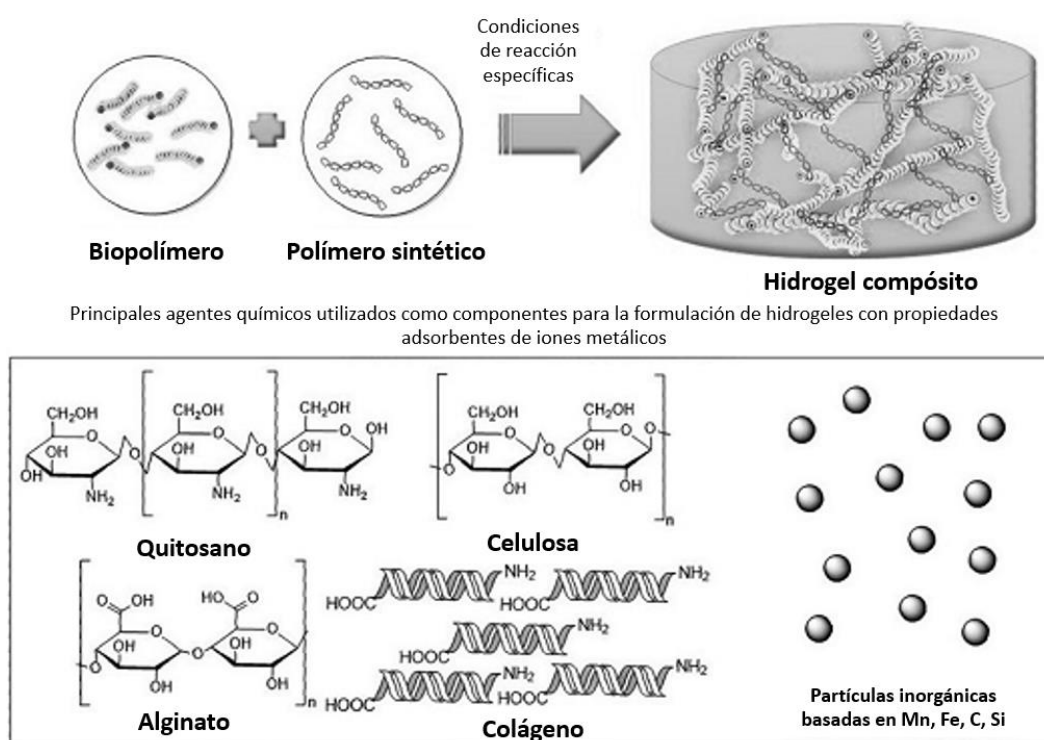
La pectina, es otro biopolímero relevante que se obtiene a partir de cáscaras de los cítricos y de ciertos vegetales. Se caracteriza por sus propiedades adsorbentes, que

dependen en gran parte de la concentración de carboxilos aniónicos presentes, puesto que favorece la interacción con elementos de carga positiva, como es el caso de los metales. Estudios realizados han demostrado que la pectina que se obtiene de la piel de la naranja, logró una remoción cercana al 95% de los niveles de cromo presente en las aguas residuales de una curtiduría (Basurto & Medina).

Las pectinas son polisacáridos de origen vegetal que tienen propiedades gelificantes y estabilizadoras de emulsiones. Estructuralmente, están conformadas por ácido galacturónico que desarrollan redes por medio de la interacción de puente de hidrógeno con los grupos hidroxilos no esterificados. Las propiedades de estos polisacáridos van a depender del nivel de esterificación y de los grupos funcionales que interrumpan los desechos de ácido galacturónico (Valladare et al., 2017). La Figura 24 representa el proceso de adsorción de metales pesados como cadmio y plomo por fragmentos de biopolímero.

Figura 23.

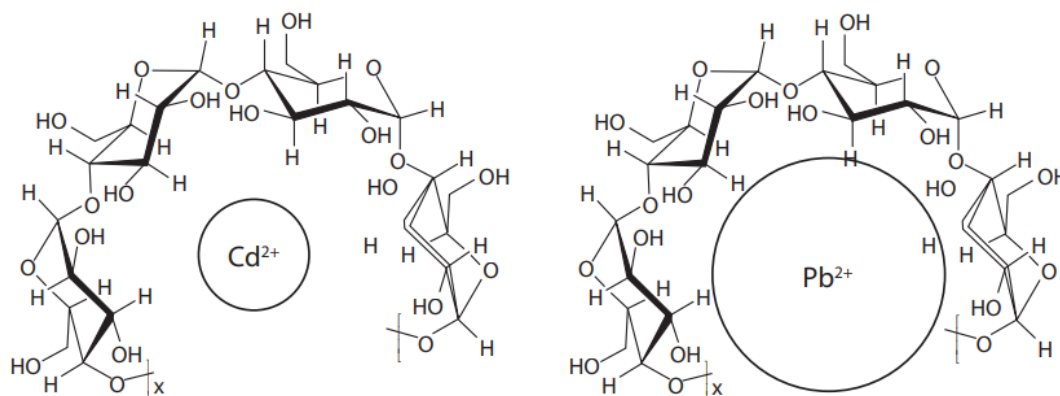
Formación de hidrogel compuesto para la adsorción de iones metálicos



Fuente: Burciaga et al, (2020).

Figura 24.

Adsorción de metales pesados por fragmentos de biopolímero



Fuente: Valladares et al, (2017).

4. Hidrogeles

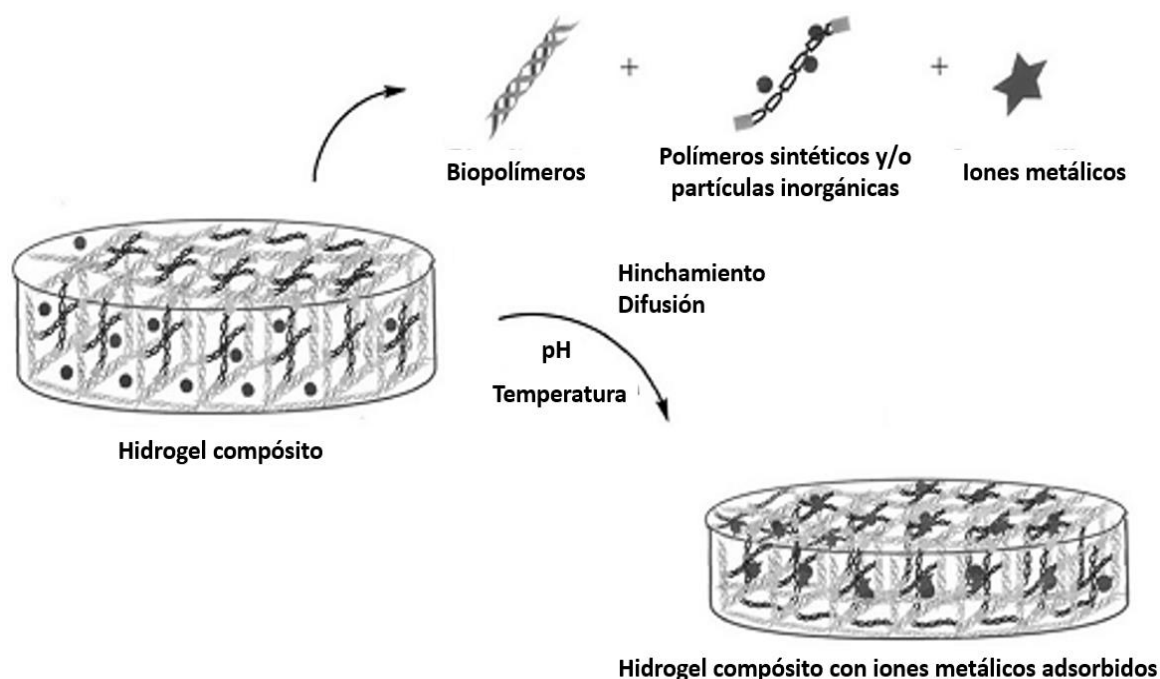
Los hidrogeles son redes tridimensionales de polímeros reticulados, cuya principal característica es su elevada dispersión en el agua, favoreciendo absorción de distintos materiales. No obstante, su limitada resistencia mecánica, la alta degradación hidrolítica y su poca capacidad de regeneración, limitan su aplicación.

Al mejorar su resistencia mecánica, se han desarrollado diversos tipos de hidrogeles (polianfóliticos, nanocompuestos y de doble red), lo que permite explorar su aplicación como materiales adsorbentes de metales, puesto que no contienen enlaces reticulares covalentes beneficiando el recobro o liberación de los elementos adsorbidos (Burciaga et al., 2020)

En la Figura 25 se presenta un esquema de cómo es el proceso de difusión y adsorción de iones de metales en hidrogeles.

Figura 25.

Difusión / adsorción de iones de metales en hidrogeles compósitos



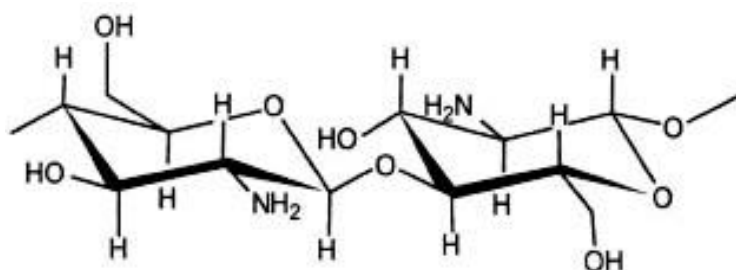
Fuente: Burciaga et al, (2020).

Con el fin de desarrollar hidrogeles a partir de biopolímeros, se han utilizado técnicas como la síntesis a partir de almidón y poliacrilato, con el fin de eliminar metales pesados presentes en líquidos. Otro método empleado en el desarrollo de hidrogeles, es acoplar quitosano con sólidos de arcilla, puesto que su estructura en capas les proporciona propiedades sobresalientes en cuanto a intercambio de iones, adsorción e hinchamiento (Burciaga et al, 2020).

A la hora de sintetizar hidrogeles, existen una serie de polímeros que se emplean constantemente debido a sus propiedades, eficiencia o disponibilidad y que han resultado aplicables como es el caso del colágeno, el quitosano, la celulosa, los alginatos y almidones, debido a que son económicos y abundantes en la naturaleza, además de sus propiedades adsorbentes. Destacan el quitosano y la celulosa, debido a la gran cantidad de grupos funcionales hidrofílicos que hay en su estructura, la cual se muestra en la Figura 26.

Figura 26.

Estructura del quitosano



Fuente: Rodríguez et al, (2010).

5. Ceniza volante

Es un subproducto de la quema de carbón en polvo en las plantas generadoras de energía eléctrica. Contienen gran cantidad de silicio y aluminio, aunque su composición química es muy variable según la composición del carbón. Generalmente, además del silicio y el aluminio, contienen óxidos de hierro, cal, carbón sin quemar, óxido de azufre, alcalinos, una pequeña proporción de magnesita y otros elementos en cantidades mucho menores, como compuestos de titanio, vanadio, manganeso, fósforo, germanio y galio (Pérez, 2023).

En la tabla 12 se presentan los promedios los compuestos químicos presentes en las cenizas volantes con alto y bajo contenido de calcio.

Tabla 12.

Compuestos en las cenizas con alto y bajo contenido de calcio

Compuesto	Cenizas con alto contenido de calcio (%)	Cenizas con bajo contenido de calcio (%)
SiO ₂	34.1	42.6 – 59.8
Al ₂ O ₃	14.2	21.8 – 34.5
Fe ₂ O ₃	7.2	6.3 – 18.1
CaO	38.0	2.8 – 7.0
SO ₃	4.2	0.19 – 1.9
MgO	1.5	1.2 – 2.6
K ₂ O	1.4	0.38 – 6.0
Na ₂ O	0.44	0.15 – 0.94
Sílice reactiva	30.9	0.94
Cal libre	17.1	Indetectable
Carbono total	0.34	0.27 – 3.9

Fuente: Pérez, (2023).

En la construcción, las cenizas volantes son empleadas en la fabricación ladrillos, bloques o pavimentos, ya que son ampliamente resistentes a las altas temperaturas y mejoran de manera eficiente problemas de grietas y permeabilidad. Sin embargo, desde hace algunos años se han modificado químicamente para usarlas como soporte

de estructuras de sílice, mejorando sus capacidades adsorbentes, pudiéndose emplear en la depuración de aguas residuales para remover metales pesados y otros contaminantes por su alta superficie y porosidad (Armijo, 2023).

La alcalinidad de las cenizas volantes ayuda a aumentar el pH de las aguas residuales ácidas y precipitar los metales pesados, facilitando su eliminación a través de la adsorción, coagulación y floculación. Las cenizas volantes también se emplean en humedales artificiales como sustrato para el desarrollo de plantas y la remoción de contaminantes, ya que proporcionan una gran superficie y porosidad para el crecimiento de las bacterias que eliminan nutrientes y otros contaminantes de las aguas residuales (Mortarplant, 2023). En la tabla 13 se presentan los porcentajes de remoción de mercurio, plomo y cromo, obtenidos en un estudio donde se emplearon cenizas volantes para este fin.

Tabla 13.

Condiciones experimentales de absorción de metales pesados con cenizas volantes

Especie	Condiciones					% de remoción
	pH	Concentración inicial	tTr(*)	Temperatura	Tipo de ceniza volante	
Hg ²⁺	5	602 mg/L	3 días	Ambiente	Sílico – aluminosa y sulfo cálcico.	53 – 81
Pb ²⁺ , Hg ²⁺	3	100 ppm	5h	Ambiente	de carbón	34 – 17
Cr ⁶⁺	2	50 ppm	1h	30°C	Wollastonita	Capacidad de absorción 2.92 mg/g

(*) Tiempo de tratamiento

Fuente: Caviedes et al, (2015).

6. Caso de estudio

En el siguiente caso de estudio se aplicó la técnica de fitorremediación para remover metales pesados de las aguas residuales.

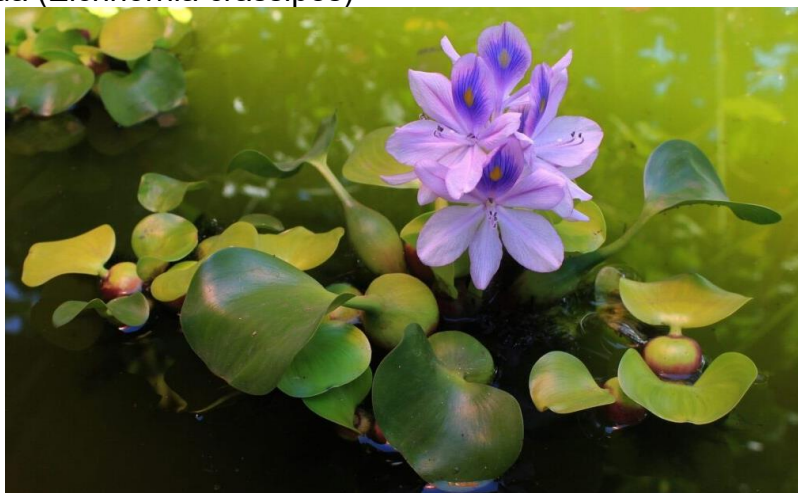
- Investigador: Oblitas, E.
- Año: 2023.
- Problemática a resolver: en una zona rural agrícola del distrito de San José del Alto en Perú, los pobladores utilizan pequeñas fuentes de agua para el riego

de los cultivos y lavar el café, pero estas fuentes de aguas fluyen por zonas donde anteriormente se desarrollaron actividades mineras, por lo que son suelos que contienen metales pesados que podrían ocasionar problemas en la salud de los habitantes de la zona y contaminar sus productos agrícolas.

- Objetivo: evaluar la eficiencia de fitorremediación del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) para disminuir la concentración de metales pesados en aguas residuales municipales.
- Descripción de la especie: el jacinto de agua es una planta acuática originaria del Amazonas y se le considera ornamental. Flota de manera libre en la superficie del agua debido a que sus hojas son capaces de hincharse. Es una planta vascular perenne de agua dulce, sus hojas son redondeadas, de color verde brillante y con flores de color violeta pálido (Figura 27). Las raíces se desarrollan en base de las hojas. Sus yemas axilares se desarrollan de forma periódica como estolones que crecen de manera horizontal. Puede alcanzar a medir más de 0.5 m de longitud (Vanegas, 2020).

Figura 27.

Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*)



Fuente: United World Project, (2022).

- Procedimiento: se tomó agua residual municipal del distrito San José del Alto, la cual se transportó y depositó en dos recipientes donde se hizo circular mediante una bomba. Se introdujeron las plantas de jacinto de agua previamente seleccionadas donde permanecieron por 21 días. Se determinó la concentración de metales pesados presentes en el agua residual antes y

después de someterse al tratamiento de fitorremediación.

- Resultados: la concentración de metales pesados antes y después de la fitorremediación se muestran en las tablas 14 y 15 respectivamente. En la figura 28 se presenta de manera gráfica el comportamiento de las concentraciones de metales pesados en ambas muestras.

Tabla 14.

Concentración de metales pesados antes de la fitorremediación

Metales pesados analizados	Unidad de medida	Muestra
		M1
Cadmio	mg/L	0.300
Cobre	mg/L	0.640
Cromo	mg/L	<0.005
Mercurio	mg/L	0.100
Plomo	mg/L	1.190
Zinc	mg/L	4.800

Fuente: Oblitas, (2023).

Tabla 15.

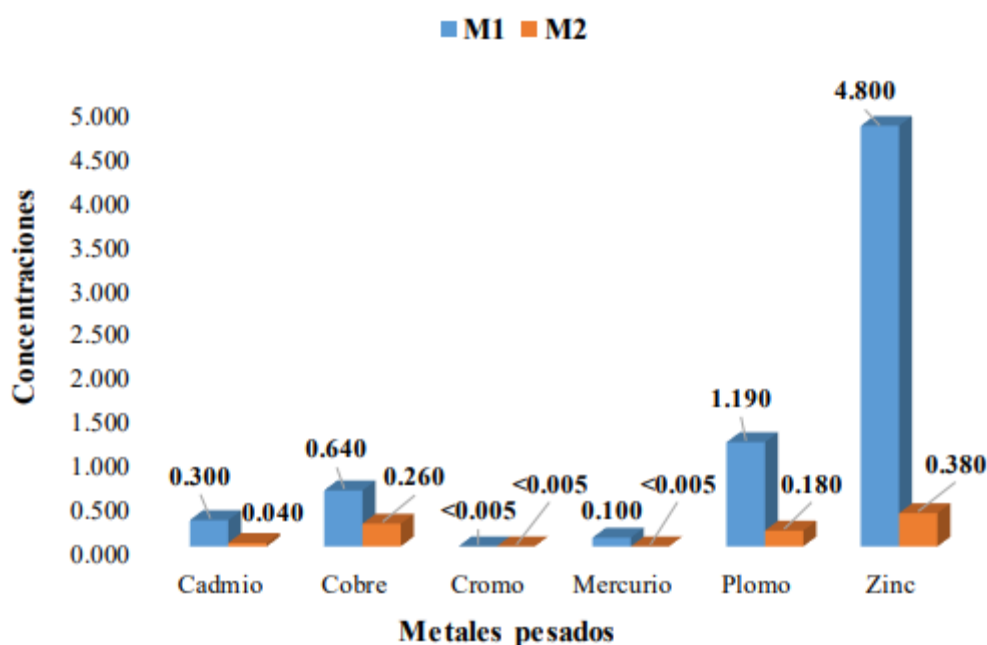
Concentración de metales pesados después de la fitorremediación

Metales pesados analizados	Unidad de medida	Muestra
		M2
Cadmio	mg/L	0.040
Cobre	mg/L	0.260
Cromo	mg/L	<0.005
Mercurio	mg/L	<0.005
Plomo	mg/L	0.180
Zinc	mg/L	0.380

Fuente: Oblitas, (2023).

Figura 28.

Comportamiento de las concentraciones de metales pesados de las muestras 1 y 2 (M1 y M2).



- Conclusiones: el jacinto de agua es eficiente como sistema de fitorremediación para disminuir las concentraciones de metales pesados en aguas residuales municipales, ya que removió cerca de un 90% de Cadmio, cerca de un 60% de Cobre, más del 90% de Mercurio, cerca del 85% de Plomo y más de 90% de Zinc, por lo que se considera una alternativa para el tratamiento de efluentes contaminados con metales pesados.

Como se pudo observar, la mayoría de la contaminación del agua por metales pesados, se debe a los vertidos de aguas residuales que provienen de la industria, por lo que cada día aumenta el nivel de contaminación en el agua debido a la utilización de estos metales en distintas actividades industriales, incrementando la cantidad de estos en el agua y aumentando el riesgo para todos los seres vivos al quedar expuestos a estos contaminantes.

Es por ello que explorar distintas técnicas para la eliminación de metales pesados de las fuentes de agua y poder minimizar la toxicidad en las aguas con el fin de preservar el medioambiente, es de vital importancia. Tradicionalmente, las técnicas empleadas para el control de los metales pesados han sido la precipitación, la óxido – reducción,

el intercambio de iones, la filtración, los tratamientos electroquímicos, las tecnologías de membrana, la recuperación de los metales por evaporación, la adsorción y la bioadsorción. Sin embargo, las técnicas no convencionales descritas en este capítulo, se erigen como alternativas eficaces, de bajo costo y con gran potencial de aplicación para la remoción de metales pesados presentes en las aguas residuales.

CAPITULO V.

5 HUMEDALES ARTIFICIALES EN LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS DE LAS AGUAS RESIDUALES

5.1 Introducción

Las aguas residuales representan un gran problema para muchos países en términos medioambientales, sin dejar de lado los elevados costos de instalación y de mantenimiento de los métodos convencionales para su tratamiento. Entre las principales causas que dañan los ecosistemas está la contaminación por metales pesados, ocasionada por las actividades humanas y principalmente por actividades industriales relacionadas con la minería y la fundición, entre otras.

Los metales pesados son elementos químicos de altas densidades, masa y peso atómico superior a 20, estos elementos son tóxicos en bajos niveles de concentración. Entre estos elementos se encuentran el aluminio, el berilio, el cobre, el hierro, el manganeso, el cadmio, el mercurio, el plomo, entre otros. En la actualidad, una de las mayores problemáticas ambientales es la contaminación de las aguas por metales pesados, producto de la toxicidad de estos, ocasionando un grave problema a las personas que se surten de estas fuentes de agua, además de incrementar los efectos que podrían resultar nocivos a los ecosistemas y el medioambiente.

Los metales pesados que terminan depositados en el suelo al ser transportados por los ríos, afectan el crecimiento de las plantas e impactan la salud humana, ocasionando diversas afecciones en la piel, malestares estomacales, úlceras, problemas respiratorios, debilitamiento del sistema inmune, daños renales y hepáticos, cáncer de pulmón, afecciones del corazón, problemas óseos, testiculares, afectación del sistema nervioso y en algunos casos, la muerte.

El hecho de que los metales pesados se consigan en los ecosistemas, genera gran inquietud, debido a que la mayoría de los seres vivos son dependientes del equilibrio de estos en su lugar de alimentación o de residencia. La manera en que llegan estos metales al medioambiente varía de acuerdo a la actividad desarrollada por el humano, como ejemplo, en el caso del cromo, este es muy utilizado en la industria de

revestimientos plásticos, galvanoplastia de metales, curtiembres y elaboración de pigmentos y conservantes para la madera. En el caso del cadmio, este es empleado a nivel industrial para la producción de baterías, productos para evitar la corrosión y pigmentos (Pabón et al, 2020).

En cuanto al mercurio, se han determinado diversas fuentes que causan contaminación como la deposición de los gases de la atmósfera, la erosión, las descargas humanas, desechos de la agricultura, la minería y los vertidos industriales y de combustión, por lo que, en las aguas, la concentración de mercurio puede estar en niveles inferiores a 0,5 µg/L, no obstante, en el agua residual proveniente de lugares contaminados, la cantidad de este metal es superior.

La mayoría de la contaminación del agua por metales pesados, se debe a los vertidos de aguas residuales provenientes de actividades industriales, por lo que cada día aumenta el nivel de contaminación en el agua por la utilización de estos metales en la industria, incrementando la cantidad de estos en el agua y aumentando el riesgo para todos los seres vivos al quedar expuestos a estos metales, generando a su vez serios problemas económicos a estas personas, debido al incremento en los gastos médicos y una merma en la productividad de las personas que habitan en estas zonas.

Debido a esta problemática, es de vital importancia conseguir distintos mecanismos para la eliminación de metales pesados de las fuentes de agua y poder minimizar la toxicidad en las aguas con el fin de preservar el medioambiente. Entre las distintas técnicas que existen para el control de estos metales, se encuentra la precipitación, la óxido – reducción, el intercambio iónico, la filtración, los tratamientos electroquímicos, las tecnologías de membrana, la recuperación de los metales por evaporación, la adsorción y la bioadsorción (Sarria et al., 2020)

Por otro lado, existen los humedales artificiales, los cuales a partir de procesos naturales (descomposición, estabilización, absorción, sedimentación y degradación), permiten tratar las aguas residuales, constituyendo una alternativa para la remoción de metales pesados (Vásquez, 2023). Estos sistemas se han implementado con éxito en varios países para el tratamiento de aguas residuales, demostrando también su eficiencia en la eliminación de DBO₅, de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), del nitrógeno, de los Sólidos Totales en Suspensión y de coliformes fecales (Escajadillo, 2021).

La información plasmada en este capítulo, permitirá a los lectores conocer en detalle los humedales artificiales al describir los tipos que existen, las aplicaciones que tienen, su uso como técnica de depuración de aguas residuales y cómo es el mecanismo básico que tienen para lograr esta depuración. Además, se comenta sobre la situación actual de estos sistemas y finalmente, se presenta un caso práctico de la aplicación de humedales artificiales en la remoción de metales pesados de aguas residuales.

5.2 Definición de humedal artificial

Los humedales alojan un ecosistema donde se fusionan el medio acuático y el terrestre para refugiar gran variedad de especies. Con el fin de simular este hábitat, surge el concepto de humedal artificial para depurar las aguas de origen industrial o residencial, por lo que se consideran sistemas ingenieriles que sacan provecho de los recursos naturales para la depuración del agua. Esencialmente, un humedal artificial es en un terreno en el cual se instala un material impermeable con el fin de evitar filtraciones en el subsuelo (Ver Figura 29) y sobre este material se coloca un sustrato compuesto de arena, grava, piedra y otros elementos, para luego colocar determinadas plantas acuáticas flotantes (Ruiz, 2019).

Los humedales artificiales forman parte de las técnicas no convencionales para la depuración del agua residual, depurando el agua mediante el filtrado de los desechos en un ambiente controlado. Construir un humedal artificial requiere de experiencia técnica y de personal calificado, sin embargo, de manera sencilla se puede resumir que los humedales artificiales están compuestos por tres partes fundamentales: sustrato, plantas y agua.

La función del sustrato es servir de soporte a las plantas y posibilitar que las bacterias que intervienen en la remoción de contaminantes orgánicos de las aguas residuales se puedan fijar. Las plantas utilizadas generalmente son macrófitas emergentes que intervienen oxigenando el sustrato radical y eliminando los contaminantes por absorción y finalmente, el agua residual altamente contaminada, es la que proporciona el alimento a estas plantas y tras pasar por el humedal regresa al cauce con mejor calidad que la que tenía al inicio del tratamiento (Nuevo, 2023).

Figura 29

Construcción de un humedal artificial



Fuente: Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño de la Universidad del Bío-Bío, (2023).

Como todo tratamiento de depuración, los humedales artificiales también ofrecen beneficios y desventajas. Entre sus principales ventajas está el hecho del nulo consumo de energía, ya que la depuración es realizada por las plantas. Por otro lado, en los humedales de flujo subsuperficial, al no estar el agua en contacto con el ambiente, baja de manera drástica la generación de olores y plagas. También el riesgo de averías en estos sistemas es mínimo, puesto que carecen de equipos mecánicos, haciendo la operación más sencilla, segura y con un programa de mantenimiento más sencillo.

Con respecto a las desventajas o inconvenientes se tiene que los humedales artificiales tardan más tiempo en alcanzar un nivel óptimo de operatividad, ya que, al ser un sistema natural, requiere que las plantas tengan cierto nivel de desarrollo, además estas plantas pueden convertirse en alimento de ciertas especies, por lo que se debe controlar el acceso de animales al interior del sistema. Los humedales artificiales requieren para su funcionamiento una mayor superficie que los sistemas de tratamiento tradicionales, además de requerir gran experiencia en el diseño.

Finalmente, el mantenimiento deficiente de los humedales de flujo subsuperficial podría ocasionar la colmatación del sustrato (Nuevo, 2023), entendiéndose por colmatación de sustrato, a la acumulación de sedimentos en el fondo de los cuerpos de agua, transformándose en barrizales, impidiendo el desarrollo normal del ecosistema, puesto que los lechos pierdan la capacidad para recibir agua, la cual se vuelve turbia y con poco oxígeno, afectando muchas especies (Ecosistema Global,

2023).

El funcionamiento y mantenimiento de los humedales artificiales son factores clave para su buen funcionamiento. Para la operación de estos sistemas se deben realizar una serie de acciones o maniobras que ponen en funcionamiento parte o todo el humedal, es por ello que el operario es pieza fundamental para el funcionamiento y mantenimiento de este, ya que es la persona que controla cada fase del sistema, minimizando o eliminando las causas que puedan afectar al funcionamiento (Segura et al., 2018).

Los operarios deben estar conscientes de que los humedales construidos son sistemas de tratamiento que contienen especies vegetales, elementos hidráulicos y procesos que necesitan de una continua operación y monitoreo, para poder obtener una calidad en el agua tratada y a la vez evitar reparaciones que pueden resultar costosas. Debido a esto, los operarios deben reunir las siguientes características:

- Tener aptitud para su formación en la operación y mantenimiento de estos sistemas.
- Que sepan interpretar los manuales de operación.
- Ser analíticos.
- Tener la capacidad de llevar registros.

Por otro lado, es muy importante que los operadores conozcan y apliquen medidas de seguridad para evitar riesgos a su salud, entre las que destacan las siguientes:

- Utilizar guantes y botas de goma en todas las tareas que requieran estar en contacto con el agua y con los desechos sólidos como lodos, arenas o basura, etc.
- Usar ropa exclusiva de trabajo (Ver Figura 30), ya que existe el riesgo de que las bacterias puedan ser transportadas en la ropa.
- Usar protección contra los rayos del sol.
- Consumir con frecuencia agua potable para evitar la deshidratación.
- Lavarse al finalizar la jornada para evitar transportar microorganismos.
- Toda persona que visite el humedal debe evitar tener contacto con el agua residual.

Figura 30.

Operario de humedal artificial



Fuente: Segura et al, (2018).

1. Tipos de humedales artificiales

Los humedales artificiales se pueden clasificar según la circulación del agua en: Humedales Artificiales de Flujo Superficial (HAFS) y en Humedales Artificiales de Flujo subsuperficial (HAFSs), en ambos casos, se clasifican a su vez en horizontales o verticales según la circulación del flujo del agua residual.

- Humedales Artificiales de Flujo Superficial (HAFS): en estos sistemas el agua fluye de manera libre por la superficie entre los tallos, raíces y hojas, donde crecen las bacterias que se encargarán de la remoción de contaminantes. Por lo general, son sistemas de gran superficie, conformadas por canales de plantas emergentes y donde el agua tiene poca profundidad. En estos sistemas el ingreso de agua residual puede ser continua o discontinuo y se utilizan especialmente como tratamiento de afino al recibir efluentes de tratamientos secundarios (Nuevo, 2023).

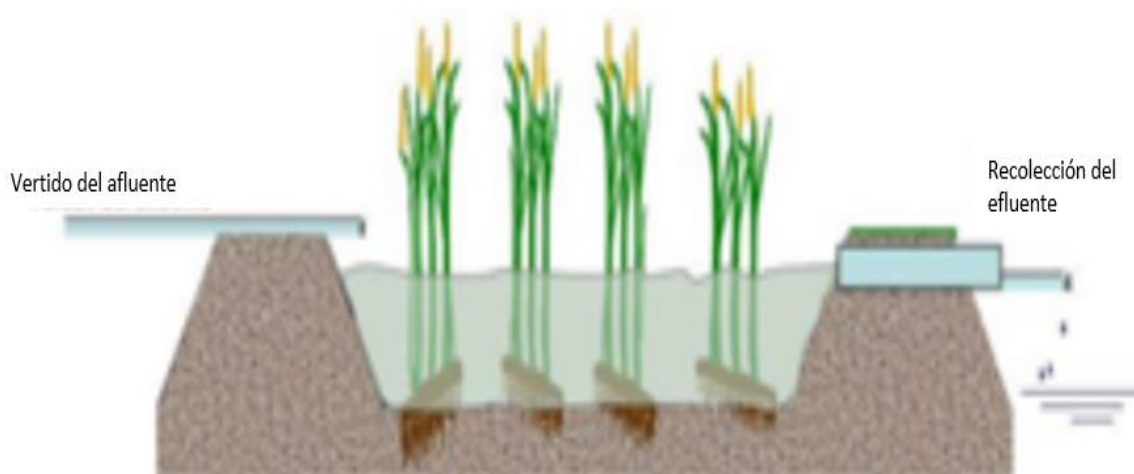
En el humedal artificial de flujo superficial, el agua está expuesta directamente al aire y al sol. Al circular el agua de forma lenta por medio del humedal, algunos procesos físicos, químicos y biológicos van filtrando sólidos, degradando materia orgánica y removiendo nutrientes de las aguas residuales que han sido sometidas a un tratamiento previo. Ya en la laguna, las partículas de mayor

peso se sedimentan, favoreciendo la eliminación de los nutrientes adheridos a ellas.

En estos sistemas las plantas y microorganismos remueven nutrientes y las reacciones químicas favorecen la precipitación de algunos elementos y los patógenos son eliminados del agua por los siguientes mecanismos: descomposición natural, depredación de organismos superiores, irradiación de luz ultravioleta y sedimentación (Tilley, 2018). En la figura que se muestra a continuación se esquematiza un humedal artificial de flujo superficial.

Figura 21.

Humedal artificial de flujo superficial



Fuente: Castañeda, (2022).

- Humedales Artificiales de flujo subsuperficial (HAFSSs): en estos sistemas el agua circula de manera subterránea entre el lecho filtrante y entra en contacto con las raíces de las plantas del humedal. Este tipo de humedal está diseñado de forma que el nivel de agua se mantenga debajo de la superficie del sustrato y los sistemas de flujo horizontal son los más empleados debido a su mayor efectividad, además de que requieren menor espacio que los humedales de flujo superficial para alcanzar la misma eficacia en cuanto a la reducción de contaminantes (Quevedo, 2021)

Como se mencionó anteriormente, estos sistemas pueden ser de flujo horizontal o vertical. Los de flujo horizontal se caracterizan por operar inundados y con altas cargas orgánicas contenidas en el afluyente y que es

degradada por las bacterias presentes en el medio de soporte y en las raíces de las plantas, por lo que los procesos para tratar el contenido orgánico que hay en los humedales artificiales de este tipo, pueden ser divididos en tres zonas: aerobia, facultativa y anóxica (Asprilla et al., 2020).

Entre los principales elementos que componen los humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal se registra los siguientes: (Quevedo, 2021)

- Influyente: es el agua residual que proviene mayormente de actividades humanas y que ingresa al sistema.
- Sustrato: se refiere al material o al medio filtrante que se coloca en el lecho del sistema para soportar a las plantas. Este sustrato puede estar conformado por varias capas de arena o grava.
- Vegetación: son las plantas que se encargan de depurar el agua residual y de ellas depende la eficiencia del sistema, por lo que deben cumplir ciertas características como, por ejemplo: tolerar altas concentraciones de metales y poder acumularlos, deben ser de crecimiento rápido, que sean especies locales y de fácil cultivo.
- Microorganismos: son los que intervienen en los procesos biológicos del tratamiento, pueden ser bacterias, hongos, levaduras, entre otros.

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical, se desarrollaron como opción a los de flujo horizontal con el fin de producir efluentes nitrificados. En estos humedales, el agua fluye de manera vertical y se realiza de manera discontinua o por pulsos, evitando que el medio granular no este inundado de forma permanente.

Las aguas que ingresan al sistema se infiltran de manera vertical por medio de un sustrato inerte parecido al utilizado como soporte en los humedales subsuperficiales horizontales, por lo que el contenido orgánico es degradado por los microorganismos presentes en todo el lecho y en las raíces. Finalmente, el agua tratada se recolecta a través de tuberías perforadas ubicadas en el fondo del sistema (Asprilla, 2020).

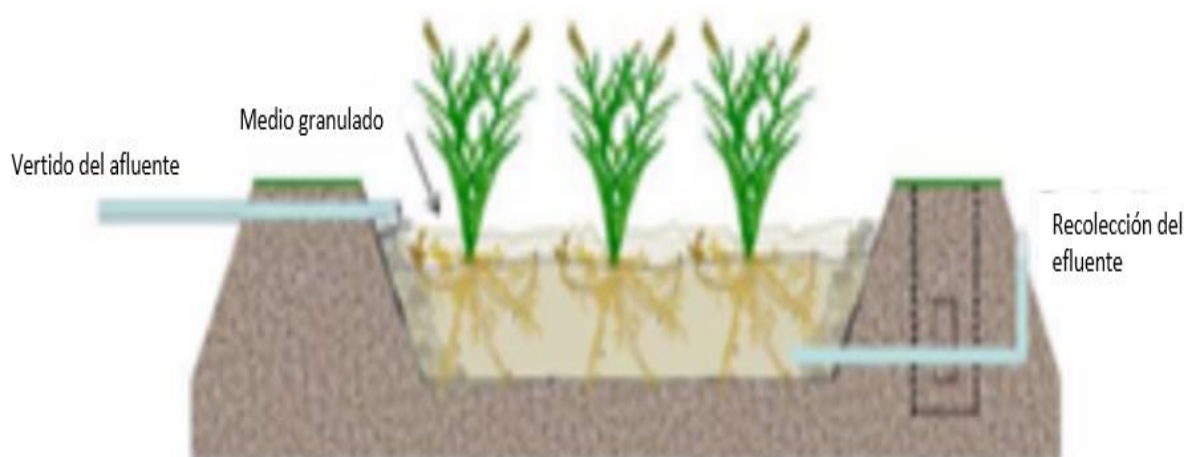
En estos sistemas, la carga intermitente del agua a tratar incrementa la transmisión de oxígeno y favorece la actividad de los microorganismos para llevar a cabo la degradación aerobia, lo que los distingue de los sistemas de

flujo horizontal, los cuales tienen menor transferencia de oxígeno con el lecho, por lo que requieren mayor superficie para compensar la cantidad de oxígeno y favorecer la actividad de las bacterias.

En la figura mostrada a continuación se esquematiza un humedal artificial de flujo subsuperficial.

Figura 32.

Humedal artificial de flujo subsuperficial



Fuente: Castañeda, (2022).

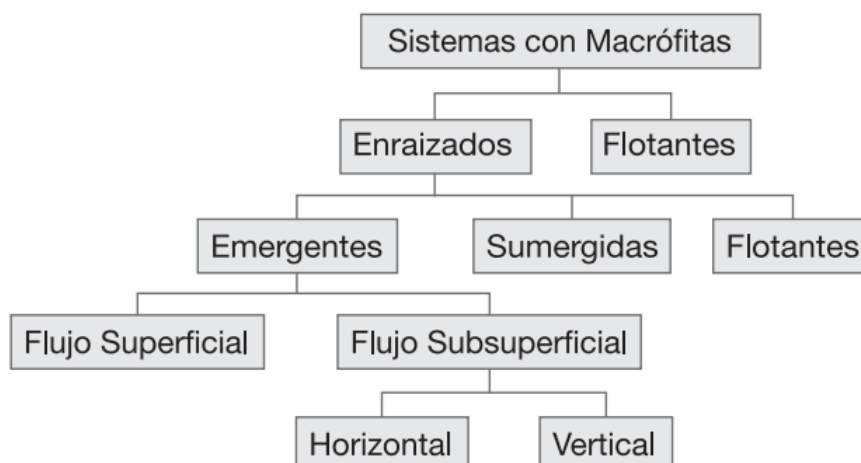
Los humedales artificiales también se clasifican de acuerdo al tipo de plantas que se utilicen en su diseño, las cuales pueden estar enraizadas o flotando libremente (Neira, 2020). De acuerdo a las características de estas plantas, los humedales artificiales se clasifican en:

- Sistemas de tratamiento que se basan en plantas macrófitas de hojas flotantes: en su mayoría angiospermas en suelos inundados. Los órganos reproductores de estas plantas son flotantes o aéreos, como es el caso del jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*), las cuales son las especies que más se utilizan en este tipo de sistemas.
- Sistemas de tratamiento que se basan en macrófitas sumergidas: estos sistemas pueden tener algunos helechos, gran variedad de musgos, carófitas y angiospermas, los cuales están en toda la zona donde llega el sol y los órganos reproductores de estas plantas son aéreos, flotantes o sumergidos.

- Sistemas de tratamiento que se basan en macrófitas enraizadas emergentes: en suelos inundados; generalmente son plantas perennes que tienen órganos reproductores aéreos.

Figura 33.

Tipos de humedales artificiales



Fuente: Neira, (2020).

A su vez, los humedales que se basan en macrófitas enraizadas emergentes se pueden dividir en dos tipos, según la circulación del agua en flujo superficial y subsuperficial. En la figura 33 se sintetizan los tipos de humedales artificiales.

En la tabla 16 se listan las plantas más comúnmente utilizadas en el diseño de humedales artificiales.

Tabla 26.

Tipos de plantas utilizadas en el diseño de humedales artificiales

Nombre común	Nombre científico
Lechuga de agua	<i>Pistia stratiotes</i>
Jacinto de agua	<i>Eichhornia crassipes</i>
Redondita de agua	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>
Helecho de agua	<i>Azolla</i>
Lenteja de agua	<i>Lemna minor</i>
Totora	<i>Schoenoplectus californicus</i>

En la figura 34 se presentan imágenes de los principales tipos de plantas utilizados en el diseño de humedales artificiales.

Figura 34.

Tipos de plantas utilizadas en el diseño de humedales artificiales



En la tabla 17 se comparan los humedales artificiales de flujo superficial y los de flujo subsuperficial.

Tabla 17.

Comparación entre humedales artificiales según el tipo de flujo

Parámetro	Flujo superficial	Flujo subsuperficial
Tipo de aguas a tratar	Flujos secundarios provenientes de lagunas, biodiscos, lodos activados y otros tratamientos.	Flujos primarios provenientes de aguas pretratados en tanques IMHOFF, pozos sépticos, etc.
Carga orgánica a tratar	Baja.	Alta.
Olores	Se puede controlar.	No emite.
Rangos de temperatura	Las bajas temperaturas afectan el proceso de remoción.	El agua mantiene una temperatura prácticamente constante.
Insectos	El control es costoso.	No se generan.
Superficie	Requieren mayores áreas.	Requieren menores áreas.
Costos	Bajo costo.	Costo mayor.
Valor ambiental	Gran valor debido a que el cuerpo de agua puede albergar fauna.	Menor valor debido a que el cuerpo de agua es inaccesible para la fauna.
Operación	Tratamiento adicional a los sistemas tradicionales.	Puede emplearse como tratamiento secundario.
Usos	Restauración y creación de nuevos	Tratamiento de agua residual.

ecosistemas.

5.3 Aplicación de los humedales artificiales

Hernández & Martín (2023), dividen las aplicaciones de los humedales artificiales en convencionales y específicas. Dentro de las aplicaciones convencionales están:

- Tratamiento de agua residual urbana en pequeñas poblaciones.
- Tratamiento de agua gris urbana.
- Deshidratación de lodos.
- Gestión de descargas de sistemas de saneamiento unitarios.

Además, estos investigadores dividen las aplicaciones específicas en consolidadas, no consolidadas e innovadoras, dentro de las cuales se encuentran las siguientes aplicaciones:

- Consolidadas: drenajes agrícolas, desinfección de aguas, mejora de la biodiversidad y tecnología METland, la cual surge de la combinación de los humedales artificiales y las tecnologías electroquímicas microbianas MET, por sus siglas en inglés (Aguas Residuales, 2021).
- No consolidadas: tratamiento de purines, lixiviados de vertederos, aguas residuales industriales, drenajes de minas y reducción de eutrofización.
- Innovadoras: electrohumedales y eliminación de microplásticos.

Una aplicación más específica es el uso de humedales artificiales para la eliminación de fósforo presente en el agua residual de origen urbano, la cual puede darse de dos maneras, siendo la más empleada la incorporación de materiales adsorbentes en el medio filtrante del sistema y la otra opción es dosificar coagulantes como el cloruro férrico, el sulfato de aluminio o coagulantes naturales parecidos a los que se emplean en grandes plantas de tratamiento (Hernández & Martín, 2023).

Otra aplicación de los humedales artificiales es la desinfección y la mejora de la biodiversidad, ya que la instalación de un humedal de flujo superficial como etapa final del tratamiento de aguas, genera ecosistemas de gran valor, que aumentan la biodiversidad acuática, además de poder ser utilizados por el público en general para paseos, observación de aves y otra fauna, así como usos con fines de investigación.

Adicionalmente, este tipo de humedales son muy importantes en la desinfección de las aguas, gracias a los diversos procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en ellos.

Los humedales también son empleados para tratar aguas grises urbanas, que son las que provienen de lavabos, duchas, entre otros y suponen prácticamente el 50% de las aguas residuales domésticas. Esto hace que los sistemas de humedales artificiales sean atractivos para tratar y reusar este tipo de aguas a pequeña escala. En caso de querer lograr una mejor integración urbanística (jardines), son más adecuados los humedales de flujo vertical, puesto que su diseño no está condicionado al flujo, como sí sucede con los humedales de flujo horizontal (Hernández & Martín, 2023).

Los humedales suelen emplearse para el tratamiento de fangos generados en Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales de distintos tamaños, en los que se pueden tratar fangos activados, fangos de digestión anaerobia o fangos de fosas sépticas o tanques Imhoff. En este tipo de tratamiento, el principal fin es remover la humedad de los fangos y estabilizarlos. Estos sistemas representan una alternativa donde el consumo de energía es menor que en las tecnologías convencionales utilizadas para deshidratar fangos (centrífuga, secado térmico, etc.), haciéndola más sostenible (Hernández & Martín, 2023).

5.4 Humedales artificiales como técnica en la depuración de las aguas residuales

Los humedales artificiales han sido utilizados en el tratamiento de diversos tipos de aguas residuales tales como:

- Aguas de origen doméstico y urbano.
- Aguas producto de la fabricación de papel, productos químicos, farmacéuticos, cosméticos, alimentos, refinación, mataderos, entre otros.
- Aguas de drenaje minero.
- Aguas de escorrentías.
- Tratamiento de lodos de plantas depuradoras tradicionales, a través de la deposición superficial en humedales de flujo subsuperficial donde ocurre su deshidratación y mineralización.

Estos tratamientos son posibles gracias a que los humedales pueden eliminar contaminantes por medio de diversos procesos como la sedimentación, la degradación por partes de los microorganismos, el efecto de las plantas, la absorción, los procesos químicos y la volatilización, por lo que pueden sustituir el tratamiento secundario e incluso el terciario y primario de las aguas residuales bajo ciertas condiciones. La operación de los humedales artificiales se basa en los siguientes principios: la actividad bacteriana, la aportación de oxígeno por medio de las plantas y el soporte de un lecho inerte que actúa como soporte para el enraizamiento de las plantas, además de servir de filtro.

El creciente problema de la contaminación del agua, ha impulsado la búsqueda de este tipo de soluciones innovadoras y sostenibles, lo que ha originado una revolución ecológica que fusiona conocimientos tradicionales con tecnología moderna. Los humedales artificiales imitan el comportamiento de los humedales naturales y son conocidos por su efectividad para purificar el agua de una forma ecológica. En un humedal artificial, las aguas residuales fluyen por medio de un sistema donde las plantas, microorganismos y los sedimentos trabajan en conjunto para eliminar contaminantes.

Los humedales artificiales proporcionan un ambiente ideal para los procesos biológicos que descomponen y transforman los contaminantes que están en las aguas residuales. Además, son sistemas generalmente más económicos y requieren menos mantenimiento que otras técnicas de tratamiento de agua tradicionales. Los humedales artificiales también aportan un valor añadido al ecosistema al crear hábitats para la vida silvestre, aumentando la biodiversidad y generando un atractivo desde el punto de vista paisajístico.

Diversos estudios han demostrado la efectividad de los humedales contruidos como técnica para limpiar el agua residual, Escajadillo (2021), destaca que, en muchos países, los humedales artificiales son el mejor método para reducir contaminantes, ya que son sistemas económicos, de fácil operación y con cero costos de energía.

En México, Castañeda (2022), comenta sus experiencias en el uso de humedales contruidos para tratar aguas residuales domésticas en poblaciones rurales, en su análisis concluye que tomando en cuenta los costos de instalación y los requerimientos operativos de los sistemas, estos humedales representan una opción

económica, viable y sustentable, especialmente para poblaciones rurales que tengan disponibilidad de terrenos y donde las condiciones climatológicas sean favorables.

Los humedales artificiales también han demostrado su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales industriales. Por ejemplo, en una industria láctea cuyos vertidos contienen alta carga orgánica, el uso de humedales artificiales permitió hasta un 99% de remoción de los contaminantes, debido a que la planta utilizada (totora, *Schoenoplectus*) filtra y adsorbe los componentes de las aguas residuales que provienen del tanque de almacenamiento (Gallardo, 2020). En este estudio, queda demostrado también que los porcentajes de reducción de los contaminantes, dependen de la etapa de maduración de la planta utilizada (Tabla 18).

Tabla 18.

Porcentaje de eliminación de contaminantes en función del tiempo de maduración de la planta

Tiempo de maduración	Sólidos Suspendidos	Nitrógeno Total	DQO	DBO5	Aceites y grasas	Sólidos Totales	Fosfatos
15 días	89.30	13.38	51.06	55.16	70.79	10.90	41.50
30 días	93.69	77.71	65.25	67.20	89.47	43.64	75.62
45 días	98.80	78.47	96.79	97.92	99.47	86.20	87.32
60 días	99.67	94.33	98.39	98.30	99.89	88.99	92.20

Fuente: Gallardo, (2020).

Los humedales artificiales, cuando combinan diversos medios filtrantes y especies vegetales, permiten alcanzar elevados porcentajes de remoción de DBO, Sólidos Suspendidos Totales (SST), nitrógeno total, fósforo, hidrocarburos, metales pesados, entre otros (Heredia et al, 2020). En la tabla 19 se muestran los porcentajes de remoción de diversos contaminantes en el agua residual, empleando distintos tipos de gramíneas a incluir en los humedales artificiales.

Tabla 19.

Porcentaje de remoción de contaminantes según el tipo de gramínea

Parámetro	% de remoción de cada gramínea			
	Pasto Alemán	Pasto Elefante	Pasto Chileno	Arvense

DQO	70,04	77,61	84,19	58,59
DBO	70,24	98,77	64,00	5,00
Níquel	0,00	0,00	0,00	0,00
Hierro total	67,57	77,06	90,95	90,52
TPH	50,00	0,00	28,57	50,00
Turbidez	60,00	68,89	54,15	19,00
C. Totales	28,57	18,75	33,33	12,50
C. Fecales	27,27	36,36	50,00	33,33

Fuente: Heredia et al, (2020).

En la limpieza de aguas residuales, el empleo de humedales artificiales ha demostrado mejorar las características organolépticas de estas aguas, llevar el pH a valores más neutrales y alcanzar porcentajes de eliminación de DBO₅ y DQO mayores al 90% (Malca, 2019).

5.5 Mecanismos básicos de depuración de un humedal artificial

Los humedales artificiales depuran el agua por medio de dos maneras. En primer lugar, el sustrato ejerce como filtro, reteniendo la materia orgánica y los sólidos y luego, el agua es tratada biológicamente donde los microorganismos consumen los nutrientes, removiendo los contaminantes, depurando el agua la cual queda lista para ser reutilizada en alguna actividad o devolverla a un cuerpo de agua (Ruiz, 2019).

El mecanismo de depuración de aguas residuales en un humedal artificial, se basa en los procesos que ocurren de manera natural en el ambiente (Figura 35), donde destacan los siguientes procesos:

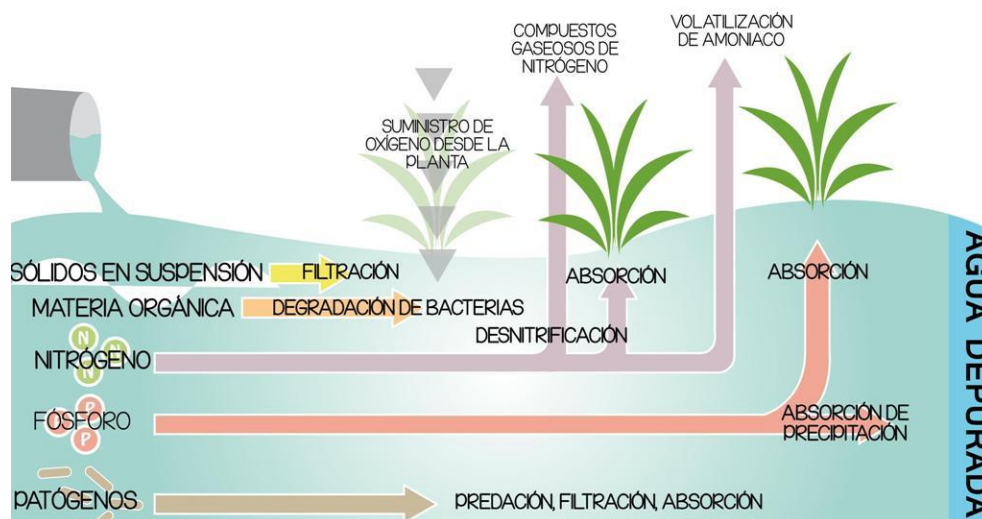
- Remoción de materia orgánica: ocurre por biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una fracción es eliminada debido a la acción de procesos físicos como la sedimentación y la filtración, cuando la materia orgánica se fija a los sólidos suspendidos. Esta biodegradación se realiza por los microorganismos de la planta, sobre todo en las raíces y en la superficie de los sedimentos. Las bacterias que intervienen en este tratamiento, necesitan carbono y energía para sintetizar células nuevas, además de otros nutrientes y según la fuente de nutrientes, se clasifican en heterótrofos o autótrofos. Los primeros necesitan

contenido orgánico como fuente de carbono para sintetizar nuevos microorganismos, mientras que los segundos no emplean materia orgánica, sino CO₂ como fuente de carbono.

- Eliminación de sólidos en suspensión: ocurre debido a procesos de filtración entre el sustrato y las raíces. Aunque la mayoría de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos previamente, los humedales se encargan de filtrar y sedimentar los remanentes, completando la eliminación. Las raíces de las plantas y el sustrato disminuyen la velocidad del agua, lo que favorece ambos procesos. El tratamiento previo es esencial, ya que evita obstrucciones y colmatación del humedal.
- Eliminación de organismos patógenos: ocurre a través de la adsorción sobre las partículas del sustrato. La eliminación de los patógenos se fundamenta en la fusión de elementos físicos, químicos y biológicos, como la filtración, sedimentación y por radiación UV. Dentro de los procesos biológicos está la depredación por organismos superiores y también la muerte.
- Eliminación de nitrógeno: los principales mecanismos de eliminación del nitrógeno en humedales artificiales son la nitrificación y la denitrificación, las cuales suceden en diferentes zonas del sustrato. Este proceso se puede dividir en varias etapas, comenzando con la amonificación, luego la nitrificación y finalmente, la denitrificación, la cual ocurre bajo condiciones anóxicas, pero donde el oxígeno está disponible en forma de nitratos, nitritos o sulfatos.
- Eliminación de fósforo: la eliminación de ortofosfato ocurre por adsorción. El consumo de fósforo por la planta es muy bajo en comparación con los efectos de adsorción. Según el valor de pH en el sustrato, el fósforo podrá estar presente como sales solubles o minerales insolubles, lo que implica que pueda ser transferido dentro de un humedal artificial.
- Eliminación de metales pesados: los metales pesados tienen alta afinidad para la adsorción y se almacenan en la matriz de un humedal artificial. Estos pueden conseguirse de manera soluble o como partículas asociadas. Los procesos fisicoquímicos como la adsorción, precipitación, complejación, sedimentación, erosión y difusión, son los que establecen la distribución de las partículas.

Figura 35.

Funcionamiento de la depuración de aguas residuales con plantas



Fuente: Projar Group, (2023).

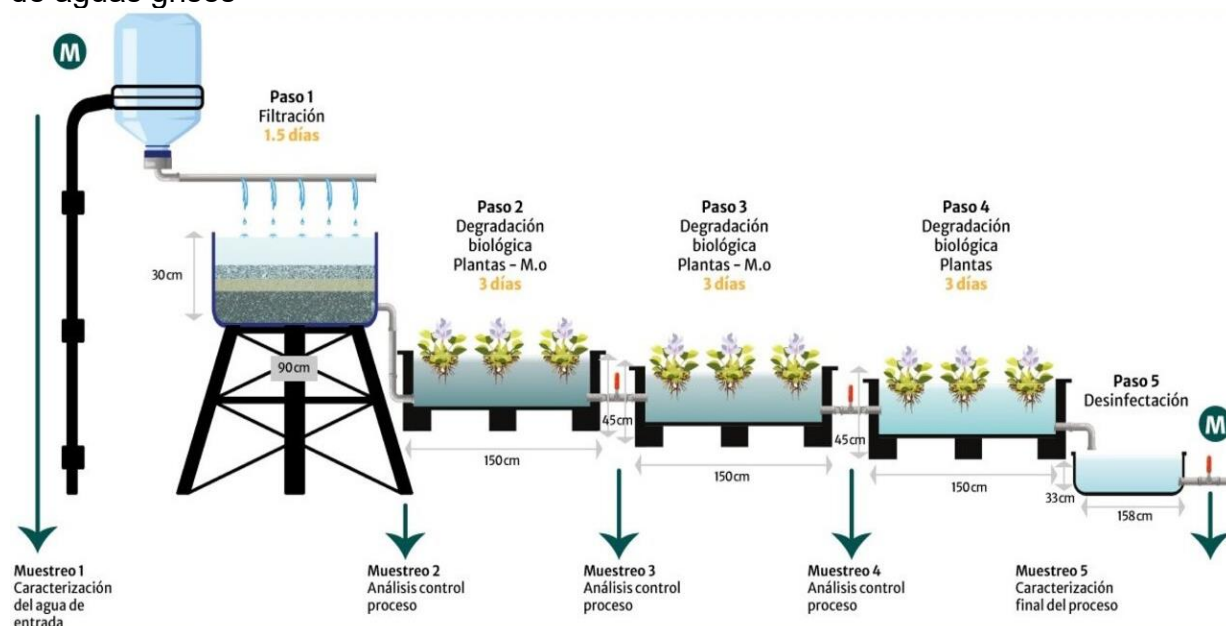
5.6 Situación actual de los humedales artificiales

Actualmente, en diversos países se están desarrollando proyectos relacionados con la implantación de humedales artificiales para tratar aguas residuales. En Colombia, se pondrá en funcionamiento un prototipo biológico en dos viviendas de una zona rural. El proyecto denominado: “Humedales artificiales: Una técnica verde para el tratamiento de aguas grises”, está planteado con el fin de depurar las aguas grises que se producen en viviendas que no tienen una conexión a la red de alcantarillado y por ende, las aguas se descargan en fosas sépticas (Rodríguez, 2023).

El prototipo (Figura 36), consta de un primer tanque donde se realiza una filtración de un tercio del contenido orgánico, seguidamente se cuenta con dos tanques donde se potencia la interacción de plantas y microorganismos y donde se alcanza un 60 % de remoción del contenido orgánico. En un cuarto tanque ocurre la remoción de la materia inorgánica por medio de plantas macrófitas. Finalmente, en el último tanque se realiza una desinfección y cloración que permite que el agua que llega a esta etapa pueda ser utilizada para otras actividades como el riego.

Figura 35.

Prototipo del proyecto “Humedales artificiales: Una técnica verde para el tratamiento de aguas grises”



Fuente: Rodríguez, (2023).

En Argentina, un equipo del Centro de Investigaciones y Transferencia del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, trabaja en la construcción de humedales artificiales con el objetivo de tratar las aguas residuales en la localidad bonaerense de Morse, se trata de un ensayo piloto que permitirá recopilar información que servirá para diseñar un humedal lo suficientemente grande que pueda responder a la demanda de toda la población.

El proyecto emplea la tecnología de “Lecho de Secado con Plantas”, la cual consiste en piletones impermeabilizados, contruidos con ladrillos y cemento. El tamaño de estos piletones dependerá de la cantidad de desechos cloacales a ser tratados. En la parte de arriba, el humedal artificial tiene una capa de arena donde se colocan las plantas y por debajo lleva una capa porosa filtrante compuesta por piedras de distintos tamaños. Debajo de las capas, los piletones tienen tuberías perforadas que reciben los líquidos que se infiltran de los lodos que están en la parte de arriba.

El objetivo es reducir los sólidos que provienen de las descargas de cloacas al separar el agua de los lodos, reducir las concentraciones de los químicos y otros microorganismos patógenos presentes en el agua y estudiar las características físicas y microbiológicas de los sólidos acumulados al final del estudio. En caso de que este ensayo arroje buenos resultados, esta experiencia podría servir de antecedente para

otras zonas rurales o con difícil acceso a la red cloacal (Mazzini, 2023).

En Vietnam, investigadores construyeron un humedal en laboratorio, con el fin de comprobar la eficacia del sistema en reducir el impacto de la industria del camarón en el delta del Mekong, utilizando plantas de carrizos (*Phragmites australis* y *Phragmites vallatoria*) y los estanques de sedimentación existentes (Lujan, 2024)

La estrategia empleada por los investigadores fue la siguiente:

- Evaluar las prácticas de vertido y calidad del agua residual en diversas granjas camaroneras.
- Construir un prototipo de humedal a escala de laboratorio empleando agua de real del estanque con una distribución de 25 plantas/m².
- Explorar la viabilidad del tratamiento con el humedal artificial a corto plazo, para la provisión continua de agua en la acuicultura.
- Estimar la rentabilidad de utilizar los humedales construidos.

Los investigadores en solo 4 semanas obtuvieron resultados prometedores, ya que se obtuvo una remoción de hasta 80% de la materia orgánica, más del 80% de los nutrientes, más del 90% de los metales pesados y 41% de bacterias coliformes, dando cumplimiento a todos los estándares ambientales y demostrando la eficiencia del humedal artificial. Posteriormente, al probar el humedal a escala real, los porcentajes de remoción se incrementaron en algunas categorías y el tiempo de tratamiento disminuyó de manera significativa, lo que abre la posibilidad de transformar la industria del camarón en Vietnam y en el mundo, puesto que los humedales construidos proporcionan una solución accesible y ecológica que preserva el medio ambiente e incrementa las utilidades de los camaroneros al permitir prácticas intensivas y superintensivas.

En Cuautitlán Izcalli, México, se están desarrollando humedales artificiales con el uso de biotecnología, por medio de un sistema de nano-burbujas, el cual realizará el proceso de retener, almacenar y filtrar agua y los humedales artificiales se encargarán para el tratamiento y el mejoramiento de la calidad del agua (Gobierno de Cuautitlán Izcalli, 2023).

En España, representantes de la Universidad de Alcalá y METfilter S.L., han detallado el potencial de la implementación de la tecnología METland, como sistema de gran eficiencia para el tratamiento de aguas, el cual combina tecnologías electroquímicas

microbianas en humedales artificiales. Con esta tecnología se ha logrado disminuir ampliamente el área requerida de humedal de tratamiento por habitante equivalente, lo que permite ampliar el rango de poblaciones en las que se puede aplicar (LIFE RENATURWAT, 2023).

En Europa, el proyecto “LIFE Renaturwat”, intenta demostrar que es viable la fusión de la economía circular con la biodiversidad. La solución que propone este proyecto es la combinación de dos tipos de humedales artificiales: uno de flujo vertical (HAFV) con el sustrato activo como filtro reactivo, para remover el fósforo y otros contaminantes y otro de flujo superficial libre (HAFS) para eliminar más contaminantes y mejorar la biodiversidad. Este sistema permitirá la obtención de un efluente de agua residual con una mínima concentración de fósforo, que no requiere la adición de reactivos ni consume energía (Añó et al, 2023).

Los primeros resultados de este proyecto, indican una importante reducción de las concentraciones de fósforo y una disminución en los valores microbiológicos. También se ha alcanzado una alta tasa de eliminación de bacterias fecales, lo que resulta interesante, ya que impacta de manera positiva en la posibilidad de reutilización posterior de estas aguas. Estos resultados han permitido dar paso al desarrollo de un estudio de viabilidad y plan de implementación en Portugal, de esta manera el proyecto busca la transferencia entre países de los resultados y la adaptación del diseño y operación del sistema a otras condiciones climáticas.

2. Caso de estudio

En el siguiente caso de estudio se empleó la técnica de humedales artificiales para la remoción de metales pesados en aguas residuales.

- Año: 2021.
- Ubicación: Distrito de Huachocolpa, Perú.
- Investigadores: Álvarez, R. & Espinoza, M.
- Problemática detectada: contaminación ambiental ocasionada por el derrame de relaves en una mina.
- Definición de términos:
 - Drenaje Ácido de Minas (DAM): es el agua contaminada producto de la explotación minera y se caracteriza por su gran acidez, grandes concentraciones de sulfato y con altos niveles de metales pesados, entre

los que destacan el hierro, el manganeso y el aluminio.

- Toxicidad de metales pesados:
 - Cobre: el cobre se encuentra en la naturaleza como metal y como mineral sulfurado. En altas concentraciones es tóxico, teniendo un gran impacto en plantas y peces.
 - Plomo: el plomo es un metal escaso, anfótero, que forma sales de plomo. Es un elemento venenoso que tiene consecuencias tóxicas para las plantas y organismos acuáticos.
 - Zinc: es utilizado ampliamente como anticorrosivo y en aleaciones. Presenta menor toxicidad que otros metales como el Cromo o el Níquel y en ambientes acuáticos se encuentra como Zn (II), también se encuentra en los suelos, debido a que es un nutriente que necesitan las plantas para su crecimiento.
- Objetivo general: establecer qué tan eficiente es la remoción de metales pesados de un drenaje ácido de minas, utilizando humedales artificiales en los cuales se emplea como planta depuradora la especie *Schoenoplectus californicus* comúnmente conocida como Totorá.
- Objetivos específicos:
 - Establecer qué tan eficiente es la remoción de cobre de un drenaje ácido de minas, utilizando humedales artificiales en los cuales se emplea como planta depuradora la especie *Schoenoplectus californicus* comúnmente conocida como Totorá.
 - Establecer qué tan eficiente es la remoción de plomo de un drenaje ácido de minas, utilizando humedales artificiales en los cuales se emplea como planta depuradora la especie *Schoenoplectus californicus* comúnmente conocida como Totorá.
 - Establecer qué tan eficiente es la remoción de zinc de un drenaje ácido de minas, utilizando humedales artificiales en los cuales se emplea como planta depuradora la especie *Schoenoplectus californicus* comúnmente conocida como Totorá.
 - Evaluar la calidad del efluente del sistema de humedales artificiales de flujo superficial, en el cual se utilizó la especie *Schoenoplectus*

californicus comúnmente conocida como Totora y compararla con la normativa nacional para la descarga de efluentes líquidos producto de actividades minero – metalúrgicas.

- Tipo de humedal: sistema de humedales artificiales de flujo superficial con *Schoenoplectus californicus* (TOTORA). (Ver Figuras 36, 37 y 38).

Figura 36.

Acondicionamiento del material filtrante



Fuente: Álvarez & Espinoza, (2022).

Figura 37.

Adaptación de la especie *Schoenoplectus californicus* (totora) en los humedales artificiales



Fuente: Álvarez & Espinoza, (2022).

Figura 38.

Prueba de flujo



Fuente: Álvarez & Espinoza, (2022).

- Descripción de la planta fitodepuradora: la Totorá (*Schoenoplectus californicus*) es una de las macrófitas más comunes y difundidas en Perú. Esta especie fue traída del Lago Titicaca, donde forma parte de la flora presente y también se consigue de manera abundante en las zonas de inundación de la planta de tratamiento de Alba Rancho. Es una planta acuática perenne, de fácil manejo, que puede llegar a medir 4 m de altura. La mitad de la planta está sumergida bajo el agua y la otra mitad está por encima del área (Céspedes, 2021)
Las helófitas son plantas que se han adaptado a condiciones de saturación de

humedad e inundación, mientras el agua no las cubra del todo y su rol en los humedales artificiales es el siguiente:

- Actúan como filtro, optimizando los procesos de separación de partículas.
 - Asimilan directamente nutrientes como Nitrógeno y Fósforo, además de metales.
 - Funcionan como soporte para desarrollar películas de bacterias, que limpian el agua por medio de procesos de degradación aeróbicos.
 - Trasladan grandes concentraciones de oxígeno a las raíces desde los tallos, donde es empleado por las bacterias.
- **Ámbito temporal:** el proyecto se llevó a cabo dentro de la estación húmeda, durante el periodo noviembre 2021 – mayo 2022, la ejecución del proyecto estuvo cerca del punto de vertimiento del drenaje ácido de la mina.
 - **Ámbito espacial:** el estudio se ejecutó en la parte baja de la mina ubicada en el distrito de Huachocolpa, departamento de Huancavelica.
 - **Muestra:** la muestra empleada fue del tipo no probabilístico, con un caudal de ingreso de 0,035 L/s al humedal artificial, extraído del efluente de la bocamina.
 - **Muestreo:** se recolectaron 20 muestras de afluente del humedal para realizar el análisis de los metales: cobre, plomo y zinc y 20 muestras del efluente para el análisis de dichos metales.
 - **Técnicas e instrumentos de recolección de datos:** en la tabla 20 se presentan las técnicas y los instrumentos empleados para la medición de cada uno de los parámetros tanto de campo como de laboratorio del proyecto: caudal, temperatura, pH, Cobre, Zinc y Plomo.

Tabla 20.

Técnicas e instrumento para la medición de los parámetros del proyecto

Parámetros/Metodología	Técnica	Instrumento
Caudal	Volumetría/Aforo	Caudalímetro
Temperatura	Estándar	Multiparámetro
PH	Potenciométrica	Multiparámetro

Cu	Analítica	Espectrofotómetro de absorción atómica
Pb	Analítica	Espectrofotómetro de absorción atómica
Zn	Analítica	Espectrofotómetro de absorción atómica

Fuente: Álvarez & Espinoza, (2022).

- Técnicas de procesamiento y análisis de datos
 - Trabajo in situ: se controló el caudal, pH y temperatura y se evaluó el buen funcionamiento de los humedales construidos, además se realizaron monitoreos en el afluente y en el efluente para ser analizados en el laboratorio.
 - Trabajo de laboratorio: con la ayuda de un espectrofotómetro de absorción atómica, se determinaron los metales pesados en estudio con el fin de comprobar la eficiencia de eliminación de estos tras el paso del agua por los humedales artificiales.
- Resultados y conclusiones: se determinó que el sistema de humedales construidos y en los cuales se utilizó la especie *Schoenoplectus californicus* (Totorá), demostró ser eficiente con respecto a la remoción de metales pesados presentes en el drenaje ácido de minas. Dicha eficiencia se comprobó con los siguientes porcentajes de remoción: cobre 57,12%, plomo 53,93% y zinc 57,73%.

En el tratamiento de aguas residuales, la utilización de humedales artificiales proporciona un rendimiento parecido al que ofrecen los tratamientos convencionales. Los sistemas artificiales aprovechan y mejoran los mecanismos depurativos que se producen en la naturaleza para tratar el agua residual, removiendo materia orgánica, patógenos y metales pesados, aportando beneficios al ambiente, a la sociedad y a la economía, ya que el consumo de energía eléctrica es nulo y no se necesitan reactivos químicos para su operación.

En este sentido, los humedales artificiales son una herramienta para hacer frente a la creciente crisis de contaminación del agua, además de contribuir a la preservación de la biodiversidad y a la mejora de la calidad del paisaje, por lo que no cabe duda de

que los humedales artificiales resultan una interesante alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En conclusión, los humedales artificiales están emergiendo como una solución eficaz, económica y ecológica para el tratamiento de aguas residuales. Como resultado, cada vez son más considerados en planes de desarrollo urbano y rural, representando un paso adelante en el camino hacia un futuro más sostenible.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfalaval. (2016). ¿Qué es la filtración por membrana?
- Andrade, G. (2007). Activación y caracterización de materiales nanoestructurados (CNx y CST): remoción de cadmio.
- Arciniega Galaviz, M. A. (2023). Remoción de cobre en agua sintética utilizando pectina de cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) . *Revista Chapingo. Serie Agricultura Tropical* , 45-54 .
- Arias Patiño, L. C. (2019). *Evaluación de la capacidad de remoción de Cr (VI) en solución con una mezcla de cáscara de naranja y cáscara de banano como bioadsorbente*. Bogotá, Colombia. Disponible en: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1112. Consulta: 2 de noviembre de 2023: Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería.
- Ariza, M., & Pinzón, L. (2022). *Tratamiento de suelos impactados por elementos traza de zinc, cobre y níquel mediante aplicación de zeolitas como agente inmovilizador* . Bogotá : Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería.
- Armijo, P. (2023). Tecnología USACH patentada: Investigación impulsa uso de cenizas volantes como adsorbentes de metales pesados en aguas industriales. . *Dirección de Gestión Tecnológica USACH*.
- Asprilla, W., Ramírez, J., & Rodríguez, D. (2020). “Humedales artificiales de flujo subsuperficial: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de materia orgánica”. *Ingenierías USBMed* , 11(2), 65-73.
- B., K., J., T., T., J. D., H., H., & T., H. (2012). Adsorption kinetics and equilibrium of phenol drifts on three zeolites.
- Barrón, H. (2016). *Contaminación por metales pesados en suelo y agua de la zona chinampera de San Nicolás Tetelco, Tláhuac, Distrito Federal*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco.

- Basurto, N., & Medina, N. (n.d.). Evaluación técnico-económica del uso de biopolímeros para el tratamiento de aguas residuales de curtiembres. *Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci)*, 57(2), 1-25.
- Bernaola, J., & Gutierrez, J. (2023). *Eficiencia de reducción del zinc con Quitosano de Platyxanthus orbigny y Diatomita en aguas del río Pisco, anexo Pallasca – Ica*. Lima, Perú: Universidad César Vallejo. Facultad de Ingeniería y Arquitectura.
- Bilandzic, N., Dovic, M., & Sedak, M. (2012). Niveles de elementos traza en la leche cruda de las regiones del norte y sur de Croacia. *Química de alimentos*, 4(2), 63-66.
- Burciaga, N., Claudio, J., Cano, L., Martínez, A., & Vega, P. (2020). Compósitos en estado hidrogel con aplicación en la adsorción de metales pesados presentes en aguas residuales. *Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 23.
- Carbonel, D. (2018). Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética. *Ingeniería*, 23(3), 252-273.
- Carbotecnia. (7 de febrero de 2023). *Cobre*. <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/quimica-del-agua/cobre-en-el-agua/>
- Castiblanco, Y., & Perilla, A. (2019). *Remoción de cromo hexavalente en aguas residuales proveniente de procesos de cromado de plásticos en empresas de Bogotá*. Bogotá: Universidad Cooperativa de Colombia.
- Caviedes Rubio, D. I., Muñoz Calderón, R. A., Perdomo Gualtero, A., Rodríguez Acosta, D., & Sandoval Rojas, I. J. (2015). Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una revision. *Ingeniería Y Región*, 13(1), 73–90, 13(1), 73-90.
- Céspedes, R. (2021). Análisis del uso de humedales artificiales empleando plantas macrófitas para el tratamiento de aguas residuales en el ámbito rural, Apurímac 2021. *[Tesis de Grado]*. Universidad. Perú.
- Chango Panchi, C. W. (2022). *Propuesta de un sistema de tratamiento avanzado de*

- aguas residuales para la industria de servicio de comida rápida*. Quito: Facultad de Ingeniería Química, Universidad Central del Ecuador.
- ChiemiVall. (2022). ¿Qué puede adsorber el carbón activado? .
- Chuquilin, C. (2020). Técnicas de tratamiento para la remoción de metales pesados en aguas residuales. . *Universidad Científica. Perú. [Trabajo de Investigación]*. .
- Collins, F., Rozhkovskaya, A., Outram, J., & Millar, G. (2020). A critical review of waste resources, synthesis, and applications for Zeolite LTA. . *Microporous and Mesoporous Materials*, 291.
- Del Olmo, A. (24 de noviembre de 2015). *Efectos ambientales de la contaminación por cobre* . <https://toxamb.wordpress.com/2015/11/24/efectos-de-la-contaminacion-por-cobre/>
- Díaz, Y., Mendiola, L., González, A., Rivas, L., & Romero, R. (2021). Capacidad de adsorción de materiales naturales para el tratamiento de aguas de proceso de la actividad petrolera. . *Centro Azúcar*, 48(3).
- Duany, S., Arias, T., Bessy, T., & Rodríguez, D. (2022). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión. *Tecnología Química*, 1-20.
- Duany, S., Arias, T., Bessy, T., & Rodríguez, D. (2022). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión. . *Tecnología Química* , 42(1), 94-113.
- Escajadillo, F. (2021). Revisión Sistemática: . *Tipos de Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Grises*.
- Farías, B. (2016). Conocimientos básicos sobre Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales . *(Módulo II)*. .
- Fernández C., A. (. (2012). El agua: un recurso esencial. . *Revista QuímicaViva* (3).
- Fundación Aquae. (12 de 12 de 2021). *La importancia del agua en los seres vivos*. Fundación Aquae: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/importancia-del-agua/>

- Gallardo, L. (2020). Depuración de aguas residuales de una industria láctea por medio de humedales artificiales de totora. *[Trabajo de Fin de Máster]. Universidad de Alcalá. España.* .
- García-Astillero, A. (2018). Qué es la sedimentación del agua potable.
- Ghuge, S., Chandrakant, G., Sopanrao, U., Suprasanna, P., & Chan, J. (2023). Comprehensive mechanisms of heavy metal toxicity in plants, detoxification, and remediation. . *Journal of Hazardous Materials*, 450.
- González, A. (2016). Determinación del equilibrio de adsorción de fenol y sus derivados en polímeros altamente reticulados a base de EGDMA.
- González, A. (2021). Precipitación química.
- Guevara, E., & Gayoso, Y. (2022). *Caudal de aguas residuales y su relación con el diseño de la planta de tratamiento en la ciudad de Jaen, 2022*. Huacho, Perú: Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Facultad de Ingeniería Civil .
- Guio, D., & Toscano, J. (2018). Fitorremediación en humedal artificial con Eichhornia Crassipes para remoción de materia orgánica en muestras de agua del canal albina en Bogotá. .
- Hernández, C., & Martín, M. (2023). Guía didáctica sobre diseño de humedales artificiales. . *Valencia: edUPV*.
- Hernández, C., & Martín, M. (2023). Guía didáctica sobre diseño de humedales artificiales. . *Valencia: edUPV*.
- Hincapié, A., & Puerto, N. (2019). *Evaluación de la reducción del cromo total en muestras de suelos aledaños al Río Cauca por medio de un proceso químico y biológico*. Bogotá: Universidad El Bosque. Facultad de Ingeniería. Programa Ingeniería Ambiental.
- Huang, J., Peng, L., Zeng, G., Li, X., Zhao, Y., Liu, L., . . . Chai, Q. (2014). Evaluation of micellar enhanced ultrafiltration for removing methylene blue and cadmium ion simultaneously with mixed surfactants. *Separation and Purification*

Technology.

- Ibarra, D. (2020). Análisis integral y optimización de un proceso de floculación-coagulación empleando pectina de nopal para el tratamiento de aguas contaminadas con metales de la industria de la galvanoplastia. *Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica. Universidad Autónoma de Baja California (UABC)*.
- JM, G., JP, R.-M., & C., H.-G. (2017). Revisión del aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Rev Univ. Salud*, 19(2), 309-318.
- Kılıç, Z. (2020). The importance of water and conscious use of water. *International Journal of Hydrology*, 4, 239-241.
- Lenntech. (2022). Cadmio-Cd. Cobre-Cu. Zinc-Zn. .
- Lugo, D. (2017). Remoción de metales pesados en el proceso de coagulación-floculación de aguas residuales industriales mediante el uso del tanino modificado de Acacia. *Pontificia Universidad Javeriana*.
- Lujan, M. (2024). ¿Pueden los humedales artificiales reducir el impacto de la industria camaronera? . *AQUAHYO*.
- Malca, D. (2019). Determinar el efecto de tecnologías de humedales artificiales como tratamiento de aguas residuales. *[Trabajo de Investigación]. Universidad Privada del Norte. Perú*.
- Martínez, E. (2018). Metales pesados y la importancia de su análisis rutinario. Microlab Industrial.
- Mazzini, L. (2023). Científicas construyen humedales artificiales para tratar desechos cloacales. . *Fundación Bunge y Born*.
- Mero, M., Pernía, B., Ramírez, N., Bravo, K., Ramírez, L., & Larreta, E. (2019). Concentración de Cadmio en agua, sedimentos, *Eichhornia crassipes* y *Pomacea canaliculata* en el río Guayas (Ecuador) y sus afluentes. . *Contaminación Ambiental*, 623-640.

- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023). *Metales Pesados*. Madrid: Vicepresidencia Tercera del Gobierno. Disponible en: [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales_pesados.html#:~:text=No%20obstante%20hay%20una%20serie,%20y%20cromo%20\(Cr\).](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales_pesados.html#:~:text=No%20obstante%20hay%20una%20serie,%20y%20cromo%20(Cr).)
- Molina Salgado, R. (2021). Importancia del agua y las problemáticas socio-ambientales. *Educación Ambiental*, 1-6.
- Mora, C., Alfaro, C., Pérez, J., & Vega, I. (2022). Aporte ambiental de la planta de tratamiento de aguas residuales Los Tajos en la remoción de contaminantes fisicoquímicos y microbiológicos. . *Uniciencia*, 36(1), 1-17.
- Moreira, L., Pilligua, J., García, S., Burgos, G., García, O., Briones, G., & Prado, J. (2022). Disminución de cromo y cobre en aguas residuales utilizando cáscaras de naranja y banano (*Citrus sinensis* y *Musa paradisiaca*) como bioadsorbente. . *InfoAnalítica*.
- Neira, Y. (2020). Humedales artificiales en el tratamiento de aguas residuales. . *[Trabajo de Investigación]. Universidad Católica Sedes Sapientiae. Perú*.
- Nuevo, D. (2023). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales.
- ONU. (2021). *Resumen actualizado de 2021 sobre los progresos en el ODS 6: agua y saneamiento para todos*. Ginebra, Suiza.: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- OPS. (2020). *Descriptores en ciencias de la salud: Bioacumulación*. Disponible en: <https://id.nlm.nih.gov/mesh/D000081482>. Consulta 02 de noviembre de 2023: Biblioteca virtual de salud.
- Ortega, A., & Sánchez, N. (2021). Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 31(2), 121-134.
- Pabón, S., Benítez, R. R., S.-V., & Gallo, J. (2020). Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción. Una revisión. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 9-18.

- Pérez, L. (2023). Condiciones de operación favorables para la modificación del área superficial de las cenizas volantes de la industria del cocido de ladrillos para su aplicación en la remoción de iones cadmio (II). . *Tesis de grado*.
- Pesca, S. (2015). Seguimiento del comportamiento físico y químico de los agroquímicos más utilizados en el cultivo de cebolla larga en el entorno cercano del lago de Tota y aplicación del modelo CEPIS para evaluar su impacto,. *Trabajo de Grado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia*.
- Pochteca. (2022). Precipitado de metales como método de reducción de emisiones al MA.
- Quevedo, A. (2021). Diseño y construcción de humedal artificial para la recuperación de aguas residuales en la población de Alcalá. . *Revista Ciencia, Tecnología e Innovación* , 19(24), 133-148.
- Quiroz, S., Menéndez, C., & Izquierdo, E. (2019). Tratamiento de aguas y aguas residuales. . *Ecuador: Ediciones UTM - Universidad Técnica de Manabí*.
- Rodríguez Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. . *Medisan* , 21(12), 3372-3385.
- Rodríguez, O., Pérez, R., Aguilera, I., Pérez, R., & Abalos, A. (2020). Remoción de cobre de aguas contaminadas empleando ramnolípidos. *Revista Cubana de Química*, 511-526.
- Rosero Arteaga, J. P. (2021). *Revisión bibliográfica de la ocurrencia y los métodos de remoción de cromo hexavalente en agua de efluentes industriales en los últimos 5 años* . Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca. Facultad de Ciencias Químicas.
- Ruiz, F. (2019). Humedal artificial: una propuesta para el manejo de aguas residuales. . *Universidad de Costa Rica*.
- SA, C., & JJ., P. C. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. . *Rev Int Contam Ambien.*, 33, 7-21.

- Sánchez Barrón, G. (2016). *Ecotoxicología del cadmio. Riesgo para la salud de la utilización de suelos ricos en cadmio*. . Madrid: Universidad Complutense. Facultad de Farmacia .
- Sánchez, J., González, R., Blancas, F., & Fonseca, A. (2020). Utilización de subproductos agroindustriales para la bioadsorción de metales pesados. . *TIP Rev.Esp.Cienc.Quím.Biol.* , 23, 1-18.
- Santos, D., Delgado, R., Romero, A., & Castro, A. (2023). Fitorremediación de metales pesados en ambientes contaminados: una revisión. *Frontera Biotecnológica*, 26(4), 18-24.
- Sarria, R., Gallo, J., & Benítez, R. (2020). Tecnologías para remover metales pesados presentes en aguas. . *Caso Cromo y Mercurio. Jou. Cie. Ing*, 12(1), 94-109.
- Sarria-Villa, R. A., Gallo-Corredor, J. A., & Benítez-Benítez, R. (2020). Tecnologías para remover metales pesados presentes en aguas. Caso Cromo y Mercurio. . *Journal de Ciencia e Ingeniería*, 12(1).
- Schwarz., Z. &. (2022). ¿Qué son los biopolímeros y para qué se utilizan en la industria?
- Segura, I., Cervantes, E., Vázquez, S., & García, J. (2018). Operación y mantenimiento básico de un humedal: el caso de San Francisco Uricho en el municipio de Erongarícuaro, Michoacán. . *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*.
- Singh, A. e. (2010). Risk assessment of heavy metal toxicity through contaminated vegetables from waste water irrigated area of Varanasi, India. . *Tropical Ecology*, 375-387.
- Terrel, P. (2019). *Tecnologías para la recuperación de agua contaminada con metales pesados: plomo, cadmio, mercurio y arsénico*. Lima, Perú: instituto nacional de salud. Oficina general de investigación y transferencia tecnológica.
- Ticona, J. (2021). Tratamiento electroquímico de aguas residuales procedentes del. *Camal Municipal de Anta, Cusco - 2021* .

- Torres López, M. A. (2018). La creciente importancia de la reutilización de las aguas residuales urbanas en un entorno de escasez hídrica . En F. D. Local, *Medio ambiente* (págs. 188-210). Madrid: QLD46.
- UNESCO. (2021). El valor del agua. Perugia, Italia: División de Ciencias del Agua de la UNESCO.
- Valdez, G. (2023). Equilibrio y cinética de adsorción de metales pesados en solución acuosa sobre nanomateriales de carbono. . *Universidad Autónoma de San Luis Potosí*.
- Valladare, M., Cárdenaa, C., de la Cruz, P., & Melgoza, R. (2017). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. . *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(31), 55-73.
- Vallés, M., Fuentes, E., & Pons, J. (2018). El plomo: un problema medioambiental y para la salud. *UABDivulga. Barcelona, España*.
- Vanegas, E. (2020). Eficiencia del Jacinto de Agua (*Eichhornia Crassipes*) en la Fitodepuración de Aguas Residuales Domésticas (ARD) y Aguas Residuales no Domésticas (ARnD). *[Trabajo de Grado]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Colombia* .
- Vargas Perdomo, C. M., Oviedo Salazar, A., Montañez Velasquez, M. N., & Polania Patiño, A. (2019). Estado del arte; del uso de la eichhornia crassipes en la fitorremediación de aguas residuales industriales. . *Ingenio Magno*, 9(2), 105-130.
- Zúñiga, S., Ibáñez, O., Salas, J., Flores, E., & Velázquez, A. (2022). Métodos de remoción de metales en aguas para consumo humano: Una revisión. *CULCYT. Cultura Científica y Tecnológica*, 12-27.

AUTORES

PATRICIO VLADIMIR MÉNDEZ ZAMBRANO



Nacionalidad: ecuatoriana

Títulos académicos:

- Máster en gestión ambiental
- Ingeniero en biotecnología ambiental

Filiación:

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago, EC140101, Macas, Morona Santiago, Ecuador.

Es Ingeniero en Biotecnología Ambiental, graduado de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Riobamba, Ecuador). Posee una Maestría en Gestión Ambiental de la Universidad Internacional SEK (Quito, Ecuador) y actualmente está cursando un Doctorado en Ingeniería del Agua y Medioambiente en la Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, España). En 2014, trabajó como técnico de monitoreo de campo en el laboratorio ambiental CESTTA, entidad acreditada por el SAE. Entre 2016 y 2018, se desempeñó como Monitor Ambiental de campo en operaciones petroleras en el BLOQUE 57, Shushufindi. Desde 2018 hasta la fecha, ejerce como docente en la sede Morona Santiago de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

ANGEL PATRICIO FLORES OROZCO



Nacionalidad: Ecuatoriano

Títulos Académicos:

- Magister en Informática Educativa
- Master Universitario en Evaluación de la Calidad y Procesos de Certificación en Educación Superior
- Maestro en Gestión de Tecnologías de la Información
- Ingeniero en Sistemas Informáticos

Filiación:

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago, EC140101, Macas, Morona Santiago, Ecuador.

Resumen Hoja de vida:

En ingeniero en Sistemas Informáticos y Magister en Informática Educativa por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (Riobamba Ecuador). Es Máster Universitario en Evaluación de la Calidad y Procesos de Certificación en Educación Superior por la Universidad Internacional de la Rioja (Rioja España). Es Maestro en Gestión de Tecnologías de la Información por la Escuela de Posgrado Newman (Tacna Perú).

Desde el 2011 docente de la carrera de Ingeniería en Sistemas de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo sede Morona Santiago, desde 2016 hasta 2024 coordinador académico de la misma institución. Amante de la tecnología y apasionado en la enseñanza.

EDISON MARCELO MELENDRES MEDINA



Nacionalidad: ecuatoriana

Títulos Académicos

- Economista
- Master Universitario en Analisis del Entorno Económico

Filiación:

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago, EC 140101, Macas, Morona Santiago, Ecuador

Resumen Hoja de Vida:

Es economista graduado hace 12 años, tiene su título de Master Universitario en Analisis del Entorno Económico, otorgado por la Universidad Oberta de Cataluña.

Su experiencia profesional nace en el sector financiero nacional, iniciando en el fenecido Filanbanco en cual laboro por 8 años y finalizando su trayectoria en el sistema financiero en el 2011 como Jefe de Operaciones a nivel nacional en Banco Solidario, paso su trayectoria como gerente comercial de la empresa TOMOMEDICAL por 5 años, y luego como servidor publico en el departamento financiero de la Gobernación de Chimborazo, al momento se desempeña como docente de la ESPOCH sede Morona Santiago en la carrera de Contabilidad y Auditoría.

LUIS PATRICIO TIERRA PÉREZ



Nacionalidad: Ecuatoriana

Títulos académicos:

- Ingeniero Industrial
- Magister en gestión industrial y sistemas productivos.
- Magister en seguridad industrial mención prevención de riesgos y salud ocupacional

Filiación:

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago, EC140101, macas Morona Santiago, Ecuador

Resumen:

Soy un profesional altamente motivado y con experiencia en el campo como supervisor en obras civiles . Poseo habilidades sólidas en manejo de paquetes computacionales como AutoCad, Rstudio, MatLab, capacidad de liderazgo y resolución de problemas. Mi enfoque se basa en lograr resultados sobresalientes a través de la eficiencia y la colaboración en equipos multidisciplinarios. Mi objetivo es contribuir al crecimiento y éxito de una organización en un entorno dinámico y desafiante.

Experiencia Laboral:

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Sede Morona Santiago (2017 - Presente)

Miembro de la comisión Académica, como también de la de evaluación de la calidad, participante en proyectos de investigación y vinculación.

Instituto Tecnológico Superior Carlos Cisneros. - Riobamba. – Docente Tiempo Completo. Docente de Materias de Seguridad y Salud Ocupacional, Gestión de la Calidad, sistemas integrados. - octubre 2015 – septiembre 2017

Servicio de Contratación de Obras. - Tena. - Analista de Seguridad y salud Ocupacional (SSO), Proyectos bajo la Administración y Fiscalización del SECOB Zonal 2.- febrero 2014 mayo 2015.
ARB ECUADOR Cía Ltda. Bloque 31.- Supervisor de Seguridad, Salud y Ambiente (SSA), Proyecto Ingeniería, Procura y Construcción de Línea de Flujo de Tubería de 24 Pulgadas, Tendido de Cable de Potencia de 69 kv, Fibra óptica y Sistemas Auxiliares en el Bloque 31.- febrero 2013 – diciembre 2013.

Ripconci Construcciones Civiles. - Azogues. - Supervisor de Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente (SSOMA), Proyecto Sistema Hidroeléctrico Mazar – Dudas. - marzo 2011 – febrero 2013.



PUERTO MADERO
EDITORIAL

ISBN 978-631-6557-38-4



9 786316 557384