



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Bioadsorción de metales pesados por medio de
microorganismos en efluentes industriales contaminados:
revisión sistemática 2021**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniera Ambiental**

AUTORA:

Gala Palomino, Kleydi Danixa (orcid.org/0000-0002-8958-5388)

ASESORA:

Mg. Cabello Torres, Rita Jaqueline (orcid.org/0000-0002-9965-9678)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Tratamiento y Gestión de los Residuos

LIMA – PERÚ

2021

DEDICATORIA:

A mis padres y familiares que me apoyaron durante toda mi etapa profesional y fueron mi soporte para seguir adelante

A mi asesora, Mg. Rita Cabello, por sus grandes aportes profesionales para con mi persona.

AGRADECIMIENTO:

A todas las personas que me apoyaron durante la realización de mi investigación. Por su tiempo, espacio y conocimientos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA:.....	ii
AGRADECIMIENTO:.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO	4
III. METODOLOGÍA.....	17
3.1. Tipo de Investigación	17
3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización apriorística	17
3.3. Escenario de Estudio	19
3.4. Participantes	19
3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	19
3.6. Procedimiento	20
3.7. Rigor científico	20
3.8. Método de Análisis de Información.....	20
3.9. Aspectos Éticos.....	21
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
V. CONCLUSIONES	27
VI. RECOMENDACIONES	30
REFERENCIAS.....	31
ANEXOS.....	38
ANEXOS.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz de Categorización Apriorística	18
Tabla 2: Técnica e instrumento de investigación.....	19
Tabla 3: Tipos de microorganismos utilizados en el proceso de bioadsorción de metales en efluentes contaminados.....	15
Tabla 4: Tipos de metales adsorbidos en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes contaminados.....	21
Tabla 5: Condiciones de absorción en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes contaminados.....	25
Tabla 6: Descripción de las isotermas de absorción (Categoría 3: Condiciones de absorción).....	27
Tabla 7: Bacterias gran negativas y gran positivas	28
Tabla 8: Hongos y algas.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de un proceso de bioadsorción	11
Figura 2: Estructura de las bacterias Gram Positivas y Gram Negativas.....	13
Figura 3: Estructura de las bacterias Gram Positivas y Gram Negativas.....	13
Figura 4: Modelo de la constitución de la pared celular de bacterias Gram Negativas.....	14
Figura 5: Diagrama esquemático de estrategias biotecnológicas para la limpieza de metales pesados.	17
Figura 6: Esquema de bioadsorción de las bacterias y esporas de hongos	18
Figura 7: Morfología del <i>Aureobasidium pullulans</i>	18
Figura 8: Modelos de isotermas (Langmuir y Freundlich)	19
Figura 9: Gráfico comparativo de remoción del Cu^{2+} mediante microorganismos	19
Figura 10: Gráfico comparativo de remoción del Cr^{6+} mediante microorganismos	20
Figura 11: Bioadsorción del Pb según el modelo de Langmuir.	22
Figura 12: Reducción del crecimiento, eliminación de Cr^{6+} y pH final como potencialidad de <i>Pseudomonas sp. NEWG-2</i> hacia umbrales de cromo.....	22
Figura 13: Comparativo entre los datos experimentales y las isotermas ajustadas a pH 6.	23
Figura 14: Comparación de resultados según el tipo de metal absorbido	23
Figura 15: Cambios en la sorción y remoción de Cu en función de la temperatura.	27
Figura 16: Cambios en la sorción y remoción de Pb en función de la temperatura.	27
Figura 17: Cambios en la sorción y remoción de Cd en función de la temperatura.	28
Figura 18: Nivel de pH del proceso de fitorremediación de algas activas y pasivas.	29
Figura 19: Modelado de isotermas para la biosorción de cadmio.	30
Figura 20: Comparación de nivel de pH alcanzado en la absorción	31
Figura 21: Comparación de período de tiempo para la absorción	31

Figura 22: Comparación de condiciones de temperatura alcanzadas en la bioadsorción.....	32
Figura 23: Comparación de condiciones de agitación alcanzadas para la bioadsorción.....	32

RESUMEN

La bioadsorción de metales pesados como tratamiento de las aguas residuales resulta una alternativa amigable con el ambiente. La investigación tuvo como principal objetivo evaluar los aspectos más relevantes del desarrollo de bioadsorción de metales pesados a través de microorganismos en aguas residuales industriales contaminadas. La investigación fue de tipo cualitativa, aplicada y con un diseño narrativo de tópicos. Se revisó sistemáticamente una serie de investigaciones publicadas en revistas de prestigio, tales como, Scopus, Redalyc, SciELO y Google Académico, con el fin de analizar los procedimientos y resultados obtenidos. Los resultados identificaron la aplicación de bacterias, algas, hongos y vibriones, usados para remover Cr^{6+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} y Pb^{2+} , cuyas condiciones de absorción se produjo en rangos de pH entre 6 y 8.1; con temperaturas de 25 °C a 40 °C; y tiempos de retención entre 1 – 48 horas. Las condiciones de agitación entre 100 y 5000 rpm y el modelo que más se ajustaba para describir el equilibrio de la adsorción de un material en una superficie mediante el uso de microorganismo fue la isoterma de Langmuir, con un $Q_{\text{máx}}$ alcanzado igual a 635.79 mg/g para el caso de la remoción del Pb^{2+} mediante la especie de alga *Chlorella sp.* La máxima eficiencia de remoción alcanzada fue de 98.90% para el Cu^{2+} mediante la bacteria *Penicillium janthinillum*, de 98.51% para el Cd^{2+} mediante la bacteria *Pseudomonas azotoformans*, de 95.50% para el Pb^{2+} , mediante la bacteria *Penicillium janthinillum*, y 99.68% para el Cr^{6+} mediante la especie de alga *Sargassum dentifolium*. De todo esto se concluye haber analizado los aspectos más relevantes del proceso de bioadsorción de metales pesados por medio de microorganismos en efluentes contaminados, tanto aspectos propios de los microorganismos (morfología, taxonomía, propiedades), como de las características de los metales.

Palabras clave: Bioadsorción, metales pesados, microorganismos, efluentes contaminados.

ABSTRACT

The bioadsorption of heavy metals as a wastewater treatment is an environmentally friendly alternative. The main objective of the research was to evaluate the most relevant aspects of the development of bioabsorption of heavy metals through microorganisms in contaminated industrial wastewater. The research was qualitative, applied and with a narrative design of topics. A series of research published in prestigious journals, such as Scopus, Redalyc, SciELO and Google Academic, was systematically reviewed in order to analyze the procedures and results obtained. The results identified the application of bacteria, algae, fungi and vibrios, used to remove Cr^{6+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} and Pb^{2+} , whose absorption conditions occurred in pH ranges between 6 and 8.1; with temperatures from 25 ° C to 40 ° C; and retention times between 1 - 48 hours. The stirring conditions between 100 and 5000 rpm and the model that best fit to describe the equilibrium of the adsorption of a material on a surface through the use of microorganisms was the Langmuir isotherm, with a Q_{max} reached equal to 635.79 mg / g for the case of the removal of Pb^{2+} by the species of alga *Chlorella sp.* The maximum removal efficiency achieved was 98.90% for Cu^{2+} through the *Penicillium janthinillum* bacteria, 98.51% for Cd^{2+} through the *Pseudomonas azotoformans* bacteria, 95.50% for Pb^{2+} , through the *Penicillium janthinillum* bacteria, and 99.68% for Cr^{6+} by the seaweed species *Sargassum dentifolium*. From all this it is concluded to have analyzed the most relevant aspects of the bioadsorption process of heavy metals by means of microorganisms in contaminated effluents, both aspects of the microorganisms (morphology, taxonomy, properties), as well as the characteristics of the metals.

Keywords: Bioabsorption, heavy metals, microorganisms, contaminated effluents.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el crecimiento de residentes y el potencial aumento de las actividades industriales han provocado una degradación ambiental, como la contaminación del agua. Además de contener metales como cromo, plomo, mercurio, cadmio y selenio, las aguas residuales industriales también se encuentran mezcladas con contaminantes orgánicos e inorgánicos. A menudo se liberan en el suelo y el agua, a partir de diversas fuentes de contaminación, como fundiciones, actividad de curtiembre, industria textil, microelectrónica, fertilizantes, pesticidas, minería y otras actividades de índole industrial. (Vendruscolo et al. 2017, p.1)

Según Xu et al., (2020, p. 1) advierte que el agua debe ser tratada con materiales que no causen una contaminación evidente y ayuden a mejorar la calidad de las aguas residuales, siendo de gran importancia el tratamiento con microorganismos específicos. Se ha descubierto que varios tipos de hongos, bacterias, levaduras y algas tienen la capacidad de eliminar metales pesados, incluidos ciertos organismos como *Bacillus sp.* y levaduras que se han utilizado como biosorbentes comerciales en aplicaciones prácticas. (Xu et al. 2020, p.2)

Las aguas residuales vertidas en arroyos superficiales (lagos, ríos, océanos) con carencia de tratamiento pueden causar graves problemas de contaminación, afectando así a la flora y la fauna. Estas aguas depuradas deben ser tratadas adecuadamente antes de ser descargada al material receptor, lo que puede cambiar sus condiciones físicas, químicas y microbiológicas y causar los problemas antes mencionados. En cada caso, el grado de tratamiento de aguas residuales requerido debe estar relacionado con las condiciones del receptor donde ocurre la descarga de aguas negras. (Rodríguez, 2017).

De la revisión de la investigación realizada por SUNASS en el 2008, el 70% de las aguas contaminadas de Perú no parece haber sido sometido a ningún tratamiento. Asimismo, 143 plantas de tratamiento de aguas depuradas del Perú, solo el 14% de las plantas cumplen con la normativa vigente para asegurar su normal funcionamiento; según el Plan Nacional de Saneamiento 2006-2015, el

déficit fue de US \$ 948 millones. Para 2005, respecto al saneamiento, la inversión de la Proveedoradora de Servicios (EPS) alcanzó los 369 millones de dólares estadounidenses. (Larios, González y Morales, 2016, p.14)

Por otra parte, la aplicación de metales en procesos industriales ha provocado la descarga a la atmósfera y al medio acuático y terrestre de una gran cantidad de metales pesados potencialmente tóxicos. En el medio hidrosfera, la cantidad de metal se acerca a los 109 kg /año. Los vertidos, las aguas residuales domésticas, las centrales térmicas, las fundiciones y las acerías son las principales fuentes de emisiones. (Caviedes et al., 2015, p. 74).

Por esta razón, se utilizan varios métodos para tratar los metales pesados presentes en las aguas residuales industriales, y estos métodos se dividen en convencionales y no convencionales. En filtros tradicionales, por ejemplo, filtración por membranas, electrodiálisis, ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración, el uso de carbón activado, el uso de nanotubos de carbono, precipitación química, electrocoagulación, coagulación-floculación, etc.; entre los métodos, hemos utilizado materiales agrícolas e industriales naturales para adsorber metales pesados, fitorremediación, uso de biopolímeros, uso de hidrogeles y uso de cenizas volantes. (Caviedes et al., 2015, p. 75-83). Sin embargo, debido a que los métodos no convencionales son más sostenibles y ecoamigables es recomendable utilizarlos.

Ante esta situación se plantea como alternativa hacer una revisión sistemática documentada del tratamiento de aguas residuales con microorganismos a fin de poder establecer la necesidad y el análisis de conocimiento respecto a este proceso , se enfoca básicamente en la aplicación de diversas especies como bacterias, algas y hongos los cuales reducen la concentración de metales pesados tales como Cd^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{6+} , Cu^{3+} , etc.; los cuales se concentran en el agua debido a la incursión de un efluente de alguna industria.

En base a ello, en este estudio se planteó como problema general ¿Cuáles son los aspectos más relevantes del proceso de bioadsorción de Metales Pesados por medio de microorganismos en efluentes industriales contaminados?,

asimismo tiene como problemas específicos 1) ¿Cuáles son los tipos de microorganismos utilizados en el proceso de bioadsorción de metales en efluentes industriales contaminados?, 2) ¿Cuáles son los tipos de metales adsorbidos en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes industriales contaminados?, 3) ¿Cuáles son las condiciones de absorción identificadas en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes industriales contaminados?

Este estudio pretende ser un aporte teórico sobre el tema, debido a que no existe suficientes informaciones de índole nacional que aporten a la investigación en relación al tema bioadsorción por microorganismos; el tratamiento de aguas residuales con microorganismos es una alternativa ambiental sostenible que debe darse consideración por su relevancia en la depuración de aguas residuales.

En esta investigación se propuso el siguiente objetivo general: Evaluar los aspectos más relevantes del desarrollo de bioadsorción de metales pesados a través de microorganismos en aguas residuales industriales contaminadas, teniendo por consiguiente los objetivos específicos: 1) Identificar los tipos de microorganismos utilizados en el proceso de bioadsorción de metales en efluentes industriales contaminados, 2) Analizar los tipos de metales adsorbidos en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes industriales contaminados, 3) Analizar las condiciones de absorción en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes industriales contaminados.

II. MARCO TEÓRICO

En el presente trabajo se analizará antecedentes internacionales tales como:

Afzal et al. (2017), postularon que la polución por metales pesados hoy en día es una de las principales preocupaciones ambientales mundiales. Efluentes textiles de Faisalabad Pakistán está muy contaminado con metales pesados y exige explorar microorganismos nativos como herramienta de biorremediación eficaz. De tal manera el estudio está dirigido a aislar bacterias tolerantes a metales pesados de efluentes textiles de Faisalabad Pakistán y para evaluar su potencial de bioadsorción. De las 30 muestras recolectadas, 13 aislamientos tienen tolerancia a los metales se descartó el potencial contra Ni y Co. La concentración máxima tolerable y la resistencia a múltiples metales fue determinado. Una cepa bacteriana nativa que muestra máxima tolerancia al Ni y Co y resistencia a múltiples metales, se seleccionó Ni, Co y Cr a diferentes niveles y se denominó Abuzar Microbiology 1 (AMIC1). La caracterización molecular lo confirmó como *Klebsiella variicola*, que se presentó en el Primer banco de cultivos de hongos de Pakistán (FCBP-WB-0688). ICP-OES reveló que redujo Ni (50, 49%) y Co (71, 68,6%) después de 24 y 48 h, respectivamente. Se concluyó que *K.variicola*, una nueva cepa nativa, poseía una tolerancia significativa a los metales pesados y biorremediación potencial contra Ni y Co. Puede usarse en el futuro para el desarrollo de agentes de biorremediación para desintoxicar textiles efluentes en entornos industriales.

De la misma manera, Chen et al. (2019) analizaron genes de resistencia a metales pesados (MRG) y genes de resistencia a antibióticos (ARG) en bacterias estos pueden responder a la inducción de metales pesados. Sin embargo, la co-ocurrencia de MRG y los ARG en el área contaminada por metales pesados a largo plazo aún no se conocen bien. Se pretendió investigar la relación entre la abundancia de bacterias del suelo MRG, ARG y está relacionado con la contaminación por metales pesados en el área de la presa de relaves de cobre en el norte de China. Se evidencio que los genes *arsC* y *ereA* que codifican los mecanismos de resistencia al arsénico y los macrólidos, respectivamente, son los MRG y ARG más abundantes en el área de estudio. Y su relación con la

contaminación por metales pesados en un área de represas de relaves de cobre en el norte de China. Existe evidencia de que los genes *arsC* y *ereA*, que codifican mecanismos de resistencia al arsénico y macrólidos, respectivamente, son los MRG y ARG más abundantes en el área de estudio. La abundancia de MRG se correlaciona positivamente con la concentración de cadmio (Cd), y esto indica la importancia del Cd en la selección de MRG. Los resultados del análisis realizado muestran que MRG co-ocurren y *copB* ocurren con ARG, lo que sugiere que los MRG y ARG pueden co-seleccionarse en el suelo contaminado por metales pesados. El análisis de red también revela la co-ocurrencia de Cd y MRG, y por lo tanto, una gran cantidad de un metal con un factor de "respuesta tóxica" alto se puede utilizar como indicador de MRG. El estudio mejora la comprensión de la relación entre la resistencia bacteriana y contaminación por múltiples metales, y subyace a la exploración del mecanismo adaptativo de microorganismos en el ambiente contaminado con múltiples metales.

Asimismo, Migahed, Abdelrazak y Fawzy (2017) pretendieron realizar la Bioeliminación de metales pesados, utilizando biomasa microbiana, atrae cada vez más la atención científica debido a su importante papel en la purificación de diferentes tipos de aguas residuales haciéndolo reutilizable. Los metales pesados se conocen que tiene un efecto nocivo significativo en la salud de las personas, y mientras que los métodos convencionales de eliminación resultaron insuficientes; La biosorción microbiana resulta ser la alternativa más adecuada. En este trabajo, un consorcio microbiano inmovilizado se generó utilizando Diseño estadístico de experimentos (DOE) como método robusto para seleccionar la eficiencia de los aislados microbianos en pesados procesos de remoción de metales. Este es el primer informe de aplicación DOE estadístico para evaluar la eficacia de los aislados microbianos para eliminar metales pesados en lugar de filtrar las variables normales. Una mezcla de biomasa bacteriana y esporas de hongos. se utilizó tanto en modo discontinuo como continuo para eliminar Iones de cromo y hierro de efluentes industriales. Se aplicó levadura como control positivo, los cuales mostraron una eficiencia más significativa en eliminación de metales pesados. se inmovilizado la biomasa por lotes confinándola en una bolsa de té de celulosa para facilitar la separación del biosorbente de las soluciones tratadas, que es uno de los principales desafíos

en la aplicación de la biosorción microbiana a gran escala. La eliminación de flujo continuo se realizó usando un mini reactor de lecho fijo, y el proceso se optimizó en términos de pH (6) y tasas de flujo (1ml / min) usando Response Surface Metodología. Los microbios biosorbentes más eficaces fueron identificados y caracterizados. El microorganismo generado se consorcia y lograron la eliminación total de Los iones de cromo y más de la mitad de los iones de hierro, ambos de soluciones estándar y en efluentes industriales.

De la misma manera, Choińska-Pulit et al. (2018), utilizó el método Box-Behnken, que tiene como objetivo mejorar el proceso de biosorción, el método tiene tres factores: pH, concentración inicial de metal y concentración de biosorbente. Para la cepa JAW1 de *Pseudomonas azotos*, las condiciones óptimas son pH = 6.0, 25mg / L y 2g / L de cada metal, para lograr los siguientes niveles de remoción: Cd 44.67%; Cadmio 44.67%. Cobre 63,32%; plomo en 78,23%. Esto permite evaluar las posibles interacciones de los iones metálicos de la batería a través del análisis FT-IR. Los estudios han demostrado que existen grupos, que pueden ser la razón de la unión de los iones metálicos.

Respecto a la **contaminación de aguas por metales pesados** se sabe:

Que los más tóxicos son: cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc. La relevancia de esta toxina es que será acumulada y concentrada por diferentes especies. El valor de esta toxina radica en su tendencia a acumularse y concentrarse por diferentes especies. A medida que los humanos ascienden en la cadena evolutiva, esta toxina se vuelve más peligrosa. (Xu et al. 2020).

En el medio acuático, los metales pesados son uno de los contaminantes más preocupantes porque pueden causar daños a los organismos más sensibles, como inhibir la fotosíntesis del fitoplancton, inhibir el crecimiento y desarrollo del zooplancton y la primera etapa de desarrollo. Bajo la influencia de la contaminación por metales pesados, solo los organismos particularmente resistentes pueden sobrevivir. (Wu et al. 2017).

Asimismo, **Reyes et al. (2016, p.66)** menciona que la contaminación de metales pesados y metaloides en los recursos hídricos, el suelo y el aire es uno de los problemas más graves que ponen en peligro la seguridad alimentaria y la salud pública a nivel mundial y local. En cambio, Londoño, Londoño y Muñoz (2016, p. 145) menciona que no cabe duda de que las operaciones mineras, la industrialización del suelo, el agua, la contaminación vegetal y animal, los fertilizantes químicos, los plaguicidas químicos y otras actividades típicas del desarrollo social actual han provocado un aumento excesivo de los metales pesados: mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), cromo (Cr), etc. y las consecuencias directas de la contaminación.

Por otro lado, **Pérez y Azcona (2012, p. 199)** mencionaron que, debido al trabajo frecuente y la exposición ambiental, los metales pesados representan un riesgo considerable para la salud. Los más peligrosos son el plomo, el mercurio, el arsénico y el cadmio.

Calao y Marrugo (2015, p. 140) cabe indicar que la presencia de metales pesados y compuestos orgánicos complejos en los recursos hídricos y el medio ambiente ha tenido numerosos efectos en la salud pública.

Según una investigación de **Arada, Garrido y Acebal (2018, p. 75)**, la central toma de agua de la población de investigación contiene altas concentraciones de metales pesados, por lo que recomiendan no utilizar esta agua como agua de mesa ni para alimentar a los animales. consumo humano.

Los genes bacterianos pueden transportar metales como nutrientes necesarios para el crecimiento bacteriano y mantener el equilibrio intracelular. (Mal.J et al, 2016).

Debido a las subsistencias de epidemias originadas por metales pesados, es necesario que las autoridades competentes redacten leyes que aseguren que se evite la contaminación de los suministros de agua públicos y privados. (Abioye et al, 2018).

Respecto a los **metales pesados** existen dos grupos:

1. Oligoelementos o micronutrientes, los micronutrientes que necesitan las plantas y los animales son necesarios para que los organismos completen sus ciclos de vida. Después de alcanzar cierto umbral, se vuelven venenosas. Este grupo incluye: As, B, Co, Cr, Cu, Mo, Mn, Ni, Se y Zn. Las concentraciones de estos elementos en el suelo y el agua son muy bajas y, a medida que los organismos vivos han evolucionado para adaptarse a esta disponibilidad, las concentraciones más altas de estos elementos les resultan tóxicos. Algunos son parte del sistema enzimático, como el cobalto, el zinc, el molibdeno o la hemoglobina similar al hierro. Su ausencia puede provocar enfermedades y un envenenamiento excesivo. (Cai, et al. 2020; p.8)

2. Metales pesados sin función biológica conocida, su presencia en cierto número de organismos puede provocar disfunción del organismo. Son altamente tóxicos y tienen la característica de acumularse en los organismos vivos. Principalmente son: Cd, Hg, Pb, Cu, Ni, Sb, Bi. La concentración de estos metales tóxicos en el medio ambiente puede dañar la salud de las personas. La toxicidad de estos metales se debe a su capacidad para unirse a una variedad de moléculas orgánicas, pero la reactividad de cada metal es diferente, por lo que sus efectos tóxicos también son diferentes. Las moléculas generalmente tienen grupos sulfidrilos en su estructura, y estos grupos se combinan fácilmente con metales pesados, inhibiendo así la actividad enzimática del cuerpo humano. Las actividades industriales hacen que el medio ambiente se contamine con metales tóxicos y radionucleidos, aunque la agricultura y la eliminación de desechos también causan contaminación. (Prieto, et al., 2009, p. 30).

Respecto a los **microorganismos y los metales pesados**, es bien sabido que muchos microorganismos utilizan metales vitales para su metabolismo, como calcio, cobalto, cromo, cobre, hierro, potasio, magnesio, manganeso, sodio, níquel y zinc. Y utilizado en el proceso de oxidación-reducción. También se utilizan para estabilizar moléculas (como componentes enzimáticos) y regular la presión osmótica a través de interacciones electrostáticas. El metabolismo bacteriano no requiere de otros metales, como plata, aluminio, cadmio, oro, mercurio y plomo. (Ezziat et al. 2019)

La toxicidad de estos metales no esenciales se basa en la sustitución de metales esenciales en sus sitios de unión activos. Por ejemplo, Hg^{2+} , Cd^{2+} y Ag^{2+} tienden a unirse a grupos SH, inhibiendo así la actividad de enzimas sensibles y causando daño irreversible a las proteínas. Por otro lado, los niveles altos de metales esenciales y no esenciales pueden causar daño a la membrana celular, cambios específicos de las enzimas, cambios en la función celular y daño estructural a las moléculas de ADN. (Cai et al. 2019)

Los efectos venenosos en el cuerpo y su captura por organismos dependerán de la biodisponibilidad de los metales, que a su vez depende de las condiciones físicas y químicas del medio, que determinarán su forma y la concentración de metales libres. (Diep et al., 2018). En general los organismos expuestos a metales pesados, las concentraciones por encima del umbral pueden ser altamente tóxicas. Las sustancias toxicológicas y ecotoxicológicas más importantes del medio acuático son: Hg, As, Cr, Pb, Cd, Ni y Zn.

Dada la complejidad del entorno natural en el que se encuentran los oligoelementos y su importancia en su comportamiento, el término "especiación" aparece en el contexto de la química.

La forma química se define como la distribución de diferentes formas (tipos) de elementos químicos específicos que pueden existir en un entorno determinado. Incluye elementos libres (forma neutra o ionizada) y varios complejos que se pueden formar con diferentes ligandos. La forma química del agua superficial refleja la complejidad química del medio.

(Mal.J et al,2016)

Respecto a la **resistencia y tolerancia de los microorganismos a los metales pesados:**

La toxicidad de un metal depende de su biodisponibilidad, definida como su capacidad de transferirse de un compartimento ambiental a un organismo vivo, proceso que depende de la concentración total del metal y de factores fisicoquímicos como el pH, la materia orgánica o el contenido de arcilla. Factores biológicos, como biosorción, bioacumulación y solubilización. Entre la amplia

variedad de microorganismos, se encuentran los resistentes y tolerantes a metales, las características de los microorganismos resistentes son código genético, tipo constitutivo o mecanismo de desintoxicación inducido por metales, que no tiene nada que ver con la presencia o ausencia de elementos. (Sayadi et al, 2019, p. 16).

Las principales estrategias para que los microorganismos se protejan de los metales pesados incluyen restringir la entrada de metales en las células, reducir su absorción o salida activa, o expresarse a través de transportadores ubicados en la membrana y expulsar formas nocivas del citoplasma. La mayoría de los metales son resistentes. El sistema se basa en la extracción activa de iones tóxicos, como iones pluma cadmio, cobalto y cobre. (Lin et al, 2020, p. 17).

En cuanto a la **bioadsorción de metales pesados**, el término biosorción se puede definir como la absorción pasiva de iones metálicos presentes en el medio líquido mediante el uso de biomasa no viva, mediante mecanismos físicos y químicos, como adsorción, complejación o intercambio iónico.

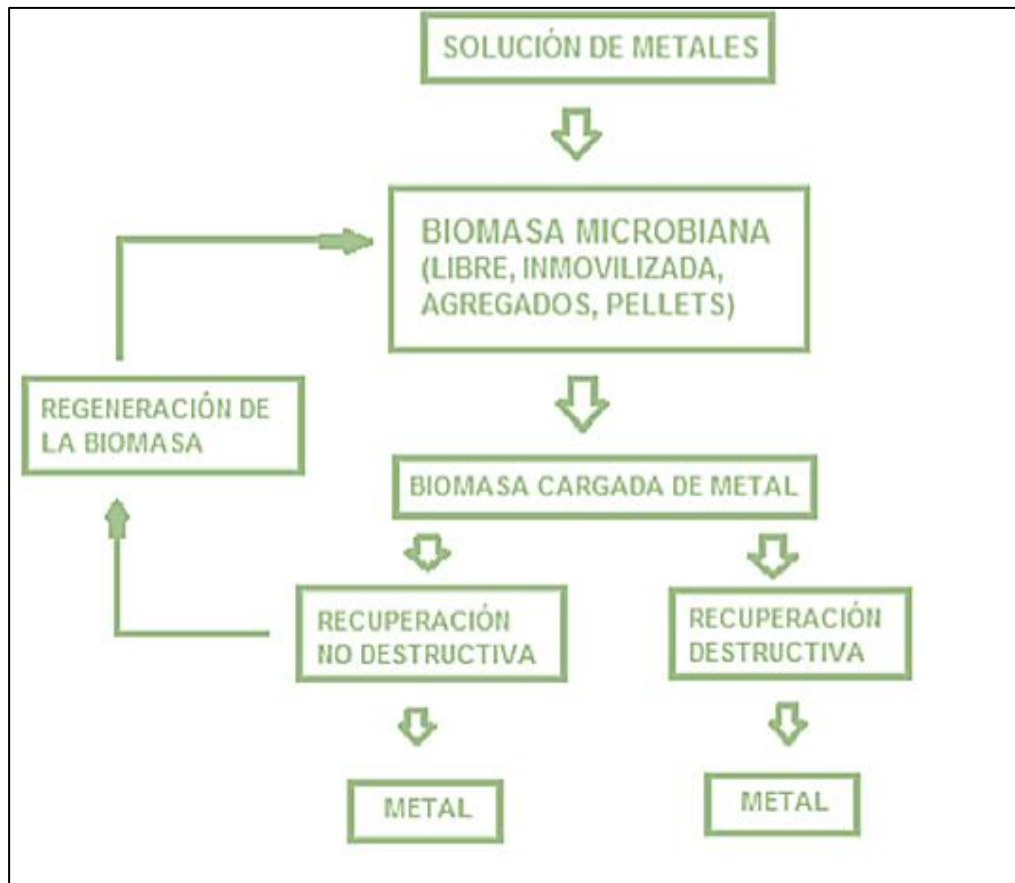


Figura 1: Esquema de un proceso de bioadsorción

Fuente: Citado de Diep et al. (2018).

Respecto a los **mecanismos de bioadsorción**:

El mecanismo de combinación de metales y biomasa puede ser de naturaleza física y química. La pared celular de un bioadsorbente puede capturar metales de diferentes formas, pero esto dependerá de la complejidad de la presencia y del tipo de metal involucrado.

Es difícil explicar uno o más mecanismos durante la biosorción de metales pesados en muchos casos porque puede ocurrir más de uno al mismo tiempo. Entre estos mecanismos destacan:

- a) **Microprecipitación:** Ocurre cuando la solubilidad del metal alcanza su límite. Esto puede suceder en condiciones locales, como en la superficie o dentro del bioadsorbente. Estas condiciones pueden deberse a desviaciones locales de las condiciones fisicoquímicas, como un aumento del pH. La microprecipitación también puede producirse por la interacción entre el metal y la superficie celular mediante la formación de un complejo, seguida de su

hidrólisis y la precipitación del metal como sustancia hidrolizada en la pared celular. Los microprecipitados metálicos se depositarán en la superficie de la biomasa

- b) Complejación: Una vez que se produce la interacción entre el metal y el centro activo, el metal puede eliminarse de la solución mediante el mecanismo de formación del complejo en la pared celular. Los metales se pueden unir a estos centros mediante una simple ligadura o quelación.
- c) Adsorción física: La adsorción es un término amplio que considera la unión de iones a la superficie de la biomasa. Esta unión puede ser a través de fenómenos físicos (no específicos), como la atracción electrostática, o químicos (específicos), como las reacciones de complejación o quelación. Asimismo, esta categoría incluye fenómenos relacionados con la existencia de fuerzas de Van der Waals, por lo que la atracción de estos metales hacia superficies sólidas es relativamente débil.
- d) Intercambio iónico: La pared celular de la biomasa generalmente está compuesta por polisacáridos. Se han estudiado en detalle las características de intercambio iónico de los polisacáridos naturales y se han establecido fielmente las características del intercambio de iones metálicos divalentes con ciertos iones (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) de los polisacáridos. El intercambio de iones es una reacción química reversible en la que un ión en una solución se intercambia con otro ión del mismo signo y este último se adhiere a la superficie de la biomasa. Es el principal mecanismo de bioadsorción de metales por las algas.

Respecto a los tipos de microorganismos podemos mencionar a las **bacterias**:

Las bacterias han desarrollado varios mecanismos de resistencia para permitir los efectos nocivos de los metales tóxicos. Además, las bacterias se clasifican en Gram Positivas y Gram Negativas.

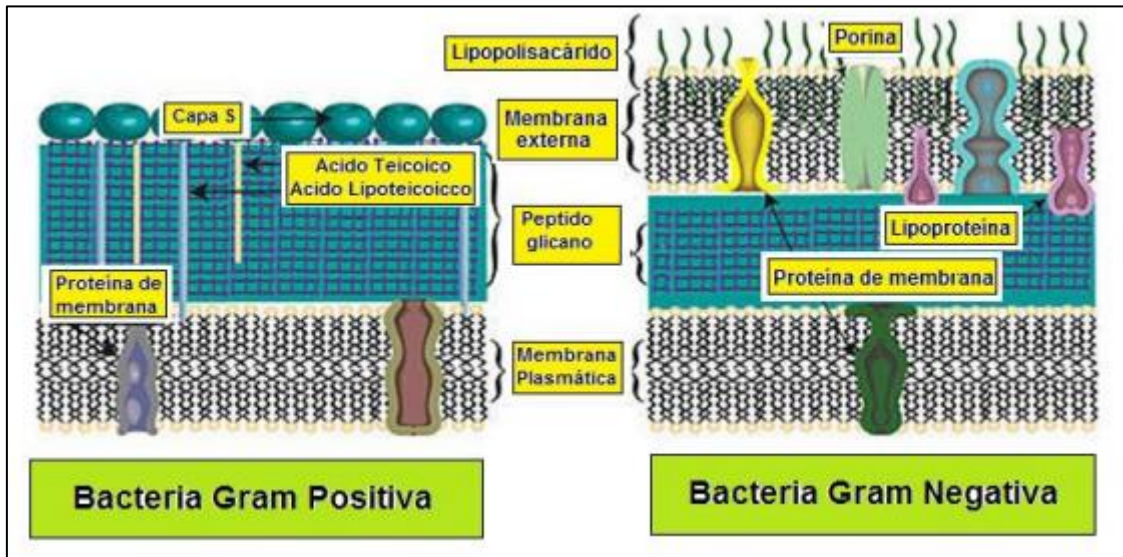


Figura 2: Estructura de las bacterias Gram Positivas y Gram Negativas.

Fuente:

<https://www.google.com.pe/search?q=membrana+celular+de+e.+coli&source=lms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiro6eL>

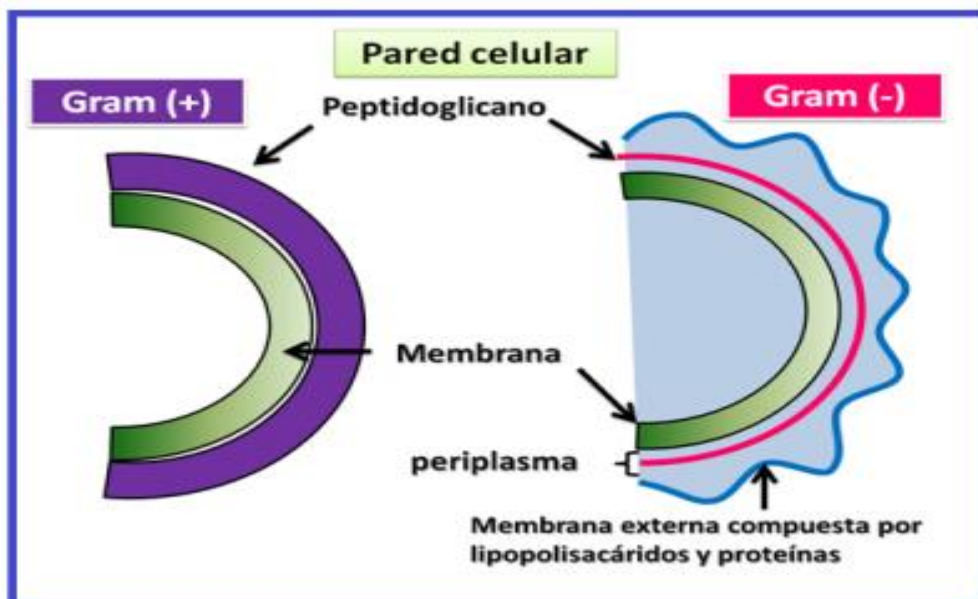


Figura 3: Estructura de las bacterias Gram Positivas y Gram Negativas.

Fuente: Shahid y Rehman, 2019

En las bacterias Gram Negativas, la membrana externa puede unirse a una variedad de iones metálicos. El catión parece ser un accesorio importante para estabilizar la estructura molecular de la membrana. La combinación con iones metálicos también puede reducir la carga repulsiva entre las moléculas de lipopolisacárido adyacentes y los componentes aniónicos de las proteínas.

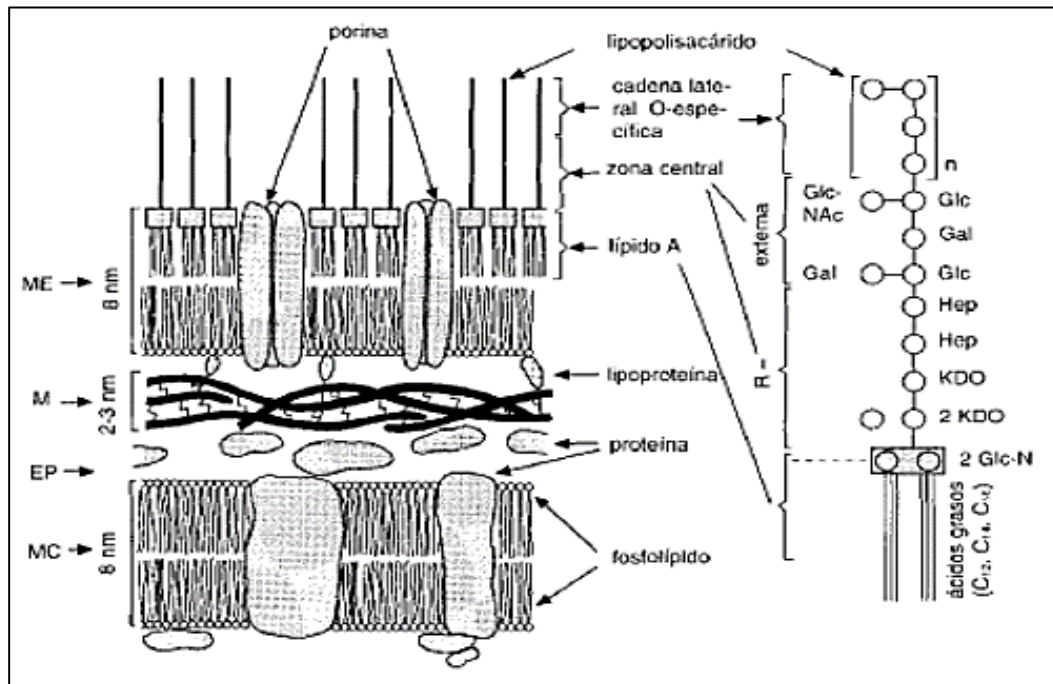


Figura 4: Modelo de la constitución de la pared celular de bacterias Gram Negativas

Fuente: Salam, 2019

En las bacterias Gram positivas presentan una pared celular con carga negativa, aunque también contienen un número menor de cargas positivas. El sitio aniónico es el carboxilato de peptidoglicano y el fosfato del ácido teicoico, mientras que el sitio catiónico es el grupo aniónico de D-alanina (ácido teicoico), azúcar (dextrano) y ácido diaminopimérico (péptido). Parte del grupo amino del peptidoglicano).

Respecto a las **isotermas de adsorción**, puede definirse como la relación de equilibrio entre la concentración de adsorbato y la concentración de partículas adsorbentes en la fase fluida a una temperatura determinada. Entre todas las isotermas de adsorción existentes, los modelos de Langmuir y Freundlich son los más citados en la literatura, ambos con base teórica diferente tal y como se describe a continuación:

a) **Isotermas de Langmuir**

Es el modelo más simple y antiguo, formulado por Langmuir en 1918. Se asume que las moléculas se adsorben en la superficie hasta que forman una monocapa

completa (saturación), momento en el que se detiene la adsorción y la superficie es uniforme. Es el único modelo que permite obtener las constantes necesarias para definir el equilibrio químico entre metales y biomasa.

Está basado en los siguientes supuestos:

- Todos los centros activos en la superficie del adsorbente están libres antes del contacto con el adsorbato.
- Todos los centros activos tienen la misma capacidad de adsorción y no cambiarán debido a la presencia de otros adsorbatos en los centros adyacentes.
- Cada adsorbato se une a un solo sitio activo.
- La adsorción se limita a una sola capa.

El modelo de Langmuir se puede expresar como:

$$q_e = \frac{q_{\max} C_e}{K + C_e} \quad \text{ó} \quad q_e = \frac{q_{\max} b C_e}{1 + b C_e}$$

Siendo:

qe: capacidad de adsorción de la biomasa en el equilibrio (mg ó mmol metal/g de biomasa).

qmax: capacidad máxima de recuperación metálica por parte de la biomasa (mg ó mmol metal/g de biomasa).

Ce: concentración metálica en el equilibrio (mg ó mmol metal/L).

K: La constante de Langmuir es equivalente al recíproco de la constante de equilibrio b (mg o mmol de metal / L). El valor de esta constante es igual a la concentración de metal a la que el valor qe es exactamente la mitad del valor qmax. Por tanto, mide la afinidad entre el metal y la biomasa, que es inversamente proporcional. La ecuación de Langmuir puede ser linealizada de las siguientes formas para facilitar su representación gráfica:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{C_e}{q_{\max}} + \frac{K}{q_{\max}}$$

Representando $\frac{C_e}{q_e}$ frente a **Ce**, a partir de la pendiente de la recta obtenida se conocería el valor de la **qmax** y a partir de la ordenada en el origen se obtendría el de la **K**. A su vez, la capacidad de adsorción q_e se determina en los experimentos de bioadsorción de la forma siguiente:

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

Siendo:

V: volumen de disolución (L).

C₀: concentración metálica inicial (mg ó mmol metal/L).

B: concentración de biomasa (g biomasa/L)

b) Isoterma de Freundlich

Es un modelo matemático empírico, asumiendo que el adsorbente no está saturado, por lo que no existe un valor límite para C_e . También se tiene en cuenta que cada centro activo puede tener una capacidad de adsorción diferente, y el proceso puede ser en varias capas.

La expresión de este modelo es la siguiente:

$$q = K_e \cdot C_e^{1/n}$$

La pendiente de la recta obtenida al representar **logq** frente a **logC_e** equivaldría a $\frac{1}{n}$ y el corte con el eje de ordenadas a **logK_e**.

III. METODOLOGIA

3.1. Tipo de Investigación

Basadas principalmente en la teoría generativa, estas investigaciones son "cortes metodológicos basados en principios teóricos, como la fenomenología (relación entre hechos y fenómenos) y la hermenéutica (decidir la explicación, interpretación y traducción de textos, principalmente escritos sagrados y textos antiguos, relacionado con la Filosofía). Por lo tanto, esta investigación ha generado nuevos conocimientos a través de una revisión sistemática de estudios previos sobre bioadsorción de metales pesados.

El presente trabajo de investigación es aplicada. Según Munarriz, B. (1992, p.12), una investigación aplicada porque aporta conocimientos científicos, recoge información real el cual ayuda a mejorar el conocimiento teórico, esta investigación está orientada a la exploración de principios y leyes ayudando a que el investigador pueda entender y conocer mejor la problemática. En ese sentido, esta investigación se consideró aplicada, porque los resultados servirán para ser usados en otras investigaciones, es decir aporta con el conocimiento científico respecto a la bioadsorción.

Respecto al diseño se consideró un diseño cualitativo narrativo de tópicos. Según Santos, Hidalgo y Arreaga (2018, p. 97) es cualitativa narrativa de tópicos porque se presenta en forma de un texto narrativo debido a que busca recolectar datos para poder analizar y describir. Lo que, para Hernández, Fernández y Baptista (2014, p. 473), vendría a ser un diseño sistemático, el cual se basa en el procedimiento de Corbin y Strauss. Por ello, la presente investigación mantiene este diseño ya que realizó una revisión sistemática de artículos científicos.

3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización apriorística

En la tabla 1 se detalla la matriz de categorización apriorística donde señala los objetivos específicos, problemas específicos, las categorías y subcategorías.

Tabla 1 Matriz de Categorización Apriorística

Problema General	Objetivo General	Objetivos Específicos	Problemas Específicos	Categorías	Subcategorías	Unidad de Análisis
¿Cuáles son los aspectos más relevantes del proceso de bioadsorción de Metales Pesados por medio de microorganismos en efluentes industriales contaminados?		Identificar los tipos de microorganismos utilizados en el proceso de bioadsorción de metales en efluentes industriales contaminados	¿Cuáles son los tipos de microorganismos utilizados el proceso de proceso de bioadsorción de metales en efluentes industriales contaminados?	Tipo de Bioadsorbente	SubC1.1 Bacterias	Wu et al. 2017 Xu et al. 2020 Choińska-Pulit et al. 2018 Ezziat et al. 2019 Azizi et al. 2016 Sun et al. 2020
					SubC1.2 Vibriones	Migahed et al. 2016
					SubC1.3 Hongos	Nakkeeran et al , 2017
					SubC1.4 Algas	Husien et al, 2019
	Analizar los aspectos más relevantes del proceso de bioadsorción de Metales Pesados por medio de microorganismos en efluentes industriales contaminados	Identificar los tipos de metales adsorbidos en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes industriales contaminados	¿Cuáles son los tipos de metales adsorbidos en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes industriales contaminados?	Tipos de Metales	Cr ⁶⁺	Li et al, 2017
					Cu ²⁺	El-Naggar et al ,2020
					Cd ²⁺	Passos Galluzz et al, 2019
					Pb ²⁺	Nakkeeran et al , 2017
	Identificar las condiciones de absorción en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes industriales contaminados		¿Cuáles son las condiciones de absorción identificadas en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes industriales contaminados?	Condiciones de Absorción	SubC3.1 temperatura	Cai et al. 2016
					SubC3.2 pH	Ahmad et al, 2019
					SubC4.1 Condiciones Iniciales	Lin et al, 2020
					SubC4.2 condiciones de sustrato	Husien et al, 2019
					SubC4.3 Contacto (exposición)	Li et al , 2019
					SubC4.4 Capacidad de Retención	Sayadi et al , 2019
SubC4.5 Tiempo de concentración					Shen et al, 2017	
SubC4.6 Isotermas de Absorción					El-Naggar et al ,2020	

Fuente: Elaboración propia

3.3. Escenario de Estudio

El presente estudio no se tiene un escenario definido, dado que es una revisión bibliográfica sobre los diferentes procesos de bioadsorción con microorganismos, por la cual se utilizaron diversos artículos científicos para establecer validez de contenido de la investigación.

3.4. Participantes

Se seleccionó libros, revistas científicas, tesis de maestría considerando su relevancia para el tema, para ello se consultaron a diferentes bases de datos como: Scopus, Redalyc, SciELO y Google Académico, para poder establecer la validez y calidad de la información recopilada.

3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

En esta parte, la técnica que se empleó para la recolección de la información es el análisis documental, que servirá como base para la investigación (Domínguez y López, 2016, p. 15). El inicio de la búsqueda bibliográfica depende del tema del trabajo de investigación. Para hacer un buen uso de la información recopilada, es necesario investigarla para que los diferentes contenidos existentes puedan organizarse completamente para la planificación del trabajo futuro.(Cegarra, 2011, p. 102). De acuerdo con la investigación, se definirán las técnicas de recolección de datos: que pueden ser documentales y observación (Domínguez y López, 2016, p. 55). Según lo mencionado anteriormente en esta investigación se hizo uso de una ficha de recolección de datos que es mostrada en el Anexo correspondiente, la cual incluye información de: título, autor (es), tipo de documento, indexación, objetivo, método, resultado y conclusiones.

Tabla 2: *Técnica e instrumento de investigación.*

Técnica	Procedimiento	Instrumento
Observación y análisis documental	<ul style="list-style-type: none">• Recopilación de investigaciones y/o artículos científicos	<ul style="list-style-type: none">• Ficha de recolección de datos

Fuente: Elaboración propia

3.6. Procedimiento

Se realizó el muestreo de artículos científicos al tema de estudio. Los términos más importantes para la búsqueda tanto en inglés como en español fueron: biosorption, renewal of heavy metal, microbial Fuel Cell, bioadsorción, carga microbiana, dosis optima, se buscaron en base de datos como, Scopus, Redalyc, SciELO y Google Académico, se obtuvieron 18 artículos de estas se analizaron minuciosamente teniendo en cuenta los criterios de inclusión los cuales fueron de antigüedad no mayor a 5 años y los criterios de exclusión fueron: por no estar indexadas y por no contener información relevante para el tema de estudio de los cuales quedaron 18 artículos científicos.

3.7. Rigor científico

Para este estudio se desarrollaron los siguientes criterios descritos por Varela y Vives (2016, p.194):

- 1) En esta investigación se estableció el criterio de dependencia debido a la consistencia de la información, ya que, se utilizó artículos científicos extraídos de bases de datos científicos.
- 2) En esta investigación también se desarrolló el criterio de rigor de credibilidad debido a que, los datos obtenidos en este estudio son confiables, dado que, las fuentes de donde fueron extraídas son de bases de datos científicos acreditados.
- 3) En esta investigación se cumplió con la transferencia, dado que, en esta investigación la información proporcionada está hecho a base de estudios ya realizados, la cual, son extraídos de diferentes autores para la posible comparación.
- 4) El presente trabajo presenta como rigor de investigación la confirmabilidad, los artículos seleccionados se plantearon por medio de sus descripciones teóricas, fundamentos que contribuyeron con el proyecto de investigación.

3.8. Método de Análisis de Información

La información se agrupó de acuerdo a las categorías y subcategorías, de la cual tenemos 18 referencias que están relacionados con los bionsorbentes usando microorganismos, 10 correspondientes a bionsorbentes bacterianos, 4

biodsorbentes con hongos, 6 biodsorbentes con alga o liquen y 1 con biosorventes con vibriones. En base a ello, se mostrará si existen semejanzas o diferencias en el método de bioadsorción y ver cómo es su efectividad y poder catalogarlo desde las semejanzas y diferencias de los mismos lo cual será planteado en los resultados de la presente investigación.

3.9. Aspectos Éticos

La siguiente investigación posee aportes de fuentes confiables, respectivamente citadas respetando a los autores, las referencias bibliográficas siguiendo el manual ISO 690 de la Universidad César Vallejo (2017), el análisis de resultados será respaldados por los criterios de rigor científico establecidos, así mismo, esta investigación podrá ser utilizada por cualquier persona que requiera información con respecto al tema de estudio.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de haberse realizado la revisión sistemática correspondiente de los artículos científicos seleccionados, se analizó cada uno de ellos de acuerdo a las categorías y subcategorías de la investigación. En ese sentido según la revisión sistemática realizada por en la presente investigación se obtuvo resultados diversos, los cuales se clasificaron de acuerdo a los objetivos planteados:

Objetivo 1: Identificar los tipos de microorganismos utilizados en el proceso de bioadsorción de metales en efluentes contaminados.

Objetivo 2: Identificar los tipos de metales adsorbidos en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes contaminados.

Objetivo 3: Identificar las condiciones de absorción en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes contaminados.

Resultados del objetivo 1: Tipos de microorganismos

Tabla 3: Tipos de microorganismos utilizados en el proceso de bioadsorción de metales en efluentes contaminados

ESTUDIOS	TIPOS DE MICROORGANISMOS	METODOLOGÍA DEL TRATAMIENTO	RESULTADOS	AUTOR
Descontaminación de múltiples efluentes que contienen metales pesados mediante biotecnología microbiana	Bacteria. Sinergia de <i>Bacillus cereus</i> + <i>Camellia oleifera</i>	Aplicó un diseño experimental, basado en la biotecnología microbiana, es decir, la sinergia bacterias y <i>Camellia oleiferacake</i> (COC).	Removió 49% de Cu^{2+} , 83% de Cd^{2+} y 35% de Zn^{2+}	Wu et al. 2017
Eliminación discontinua y por lotes de metales pesados de efluentes industriales mediante consorcios microbianos	Bacterias: <i>Serratia plymuthica</i> ; <i>Serratia quinivorans</i> ; <i>Bacillus mojavensis</i> ; <i>Bacillus subtilis</i> ; <i>Bacillus pseudocaliphilus</i> ; <i>Paenibacillus peoriae</i> ; <i>Paenibacillus jamilae</i> ; Vibriones: <i>Vibrio kanaloae</i> ; <i>Vibrio lentus</i> ; <i>Vibrio jasicida</i> ; Hongos: <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Aplicó un diseño experimental, específicamente, un diseño estadístico de experimentos (DOE), para determinar la eficiencia de los microbios aislados en el proceso de remoción	Removió 98.9% de Cr^{6+} y 58% de Pb^{2+}	Migahed, Abdelrazak y Fawzy. 2016
Mecanismo y acción de <i>Aureobasidium pullulans</i> sobre la biosorción de metales	Hongos: <i>Aureobasidium pullulans</i>	Aplicó un diseño no experimental, donde analizó sistemáticamente las investigaciones acerca de la biosorción mediante el uso de hongos filamentosos.	Removió 60% de Cu^{2+} , 50% de Cd^{2+} , 55% de Zn^{2+} y 45% de Co^{2+}	Nakkeeran et al, 2017

ESTUDIOS	TIPOS DE MICROORGANISMOS	METODOLOGÍA DEL TRATAMIENTO	RESULTADOS	AUTOR
<i>Estudios de absorción de cromo hexavalente [Cr (VI)] en biomasa a microescala de Sargassum dentifolium, algas</i>	<i>Algas: Sargassum dentifolium</i>	<i>Usaron la biomasa pretratada de alga marina para eliminar el Cr (VI), y aplicaron un diseño experimental One Factor at a time (OFAT) y Full factorial.</i>	<i>Removió 98.68% de Cr⁶⁺</i>	<i>Husien et al, 2019</i>
<i>Caracterización de la biosorción de Cd²⁺ por Pseudomonas sp. Cepa 375, un nuevo biosorbente aislado de suelo contaminado con metales pesados en el sur de China</i>	<i>Pseudomonas sp. 375</i>	<i>Aplicó un diseño experimental, donde se usó a la Pseudomonas sp. 375, para el proceso de absorción natural del cadmio.</i>	<i>Removió entre 63.29 % y 92.59% de Cd²⁺</i>	<i>Xu et al. 2020</i>
<i>Optimización de la biosorción de cobre, plomo y cadmio en una bacteria recién aislada utilizando un diseño de Box-Behnken</i>	<i>"La cepa JAW1, identificada como Pseudomonas azotoformans"</i>	<i>Se utilizó el diseño experimental Box-Behnken para optimizar el proceso de biosorción, con tres factores: pH, metal inicial concentración, concentración del biosorbente.</i>	<i>Removió 69.66% de Cu²⁺, 98.51% de Cd²⁺ y 88.58% de Pb²⁺</i>	<i>Choińska-Pulit et al. 2018</i>
<i>Desafíos de la arquitectura de celdas de combustible microbianas en la recuperación y eliminación de metales pesados de las aguas residuales</i>	<i>"Pila Microbiana para adsorción (Geobacter) "</i>	<i>Utilizó un diseño no experimental, donde analizó y revisó sistemáticamente investigaciones relacionadas con la remoción de metales pesados mediante el uso de la tecnología de celdas de combustible</i>	<i>Removió 77.60% de V⁵⁺ y 98.60% de Cu²⁺</i>	<i>Ezziat et al. 2019</i>
<i>Evaluación de la eliminación de metales pesados de las aguas residuales en un reactor de biopelícula de lecho compacto modificado</i>	<i>"Acinetobacter baumannii, Enterobacter gergoviae, Edwardsiella hoshinae, Klebsiella pneumoniae,</i>	<i>Aplicó un diseño experimental, es decir, el método de lodos activados, y uso de reactor de biopelícula.</i>	<i>Removió 85.28% de Cu²⁺, 71.01% de Cd²⁺, 76.32% de</i>	<i>Azizi et al. 2016</i>

ESTUDIOS	TIPOS DE MICROORGANISMOS	METODOLOGÍA DEL TRATAMIENTO	RESULTADOS	AUTOR
Mecanismos de resistencia al cadmio de una cepa funcional <i>Enterobacter</i> sp. DNB-S2, aislada de suelo negro en el noreste de China	<p><i>Acinetobacter lwoffii</i>, <i>Moraxella lacunta</i>, <i>Escherichia coli</i>, <i>Pseudomonas putida</i>, <i>Acinetobacter haemolyticus</i>, <i>Enterobacter cloacae</i>, <i>Pseudomonas stutzeri</i>, <i>Aeromonas hydrophilia</i>, <i>Aeromonas sobria</i>, <i>Salmonella sp</i>, <i>Pseudomonas aeruginosa</i>, <i>Citrobacter koseri</i>, <i>Aeromonas salmonicida</i>. <i>koseri</i>, <i>Moraxella lacunta</i> "</p> <p><i>Enterobacter</i> sp. (DNB-S2)</p>	<p>Aplicó un diseño experimental, donde usó una cepa <i>Enterobacter</i> sp. DNB-S2 para la biodegradación de DBP y cadmio.</p>	<p>Zn^{2+} y 80.43% de Ni^{2+}</p> <p>Removió 98.25% de Cd^{2+}</p>	<p>Sun et al. 2020</p>

Fuente: Elaboración propia

Respecto a los tipos de microorganismos utilizados en el proceso de bioadsorción de metales, Wu *et al.* (2017, p. 191) realizó su investigación basándose en la sinergia de microbios y biomasa para descontaminar aguas residuales de metales, tales como, el cobre, cadmio y zinc. Usó al *Bacillus cereus*, bacterias comunes reductoras de sulfato (SRB) y una especie vegetal (*Camellia oleiferacake* - COC). La degradación de COC asistida por *B. cereus*, creó un ambiente anóxico y proporcionó energía y nutrición para SRB, tal y como se muestra en la figura 1. Cabe mencionar que una tecnología de flotación comúnmente utilizada en muchos tratamientos de efluentes se introdujo en el sistema para aumentar también la eficiencia de bioadsorción.

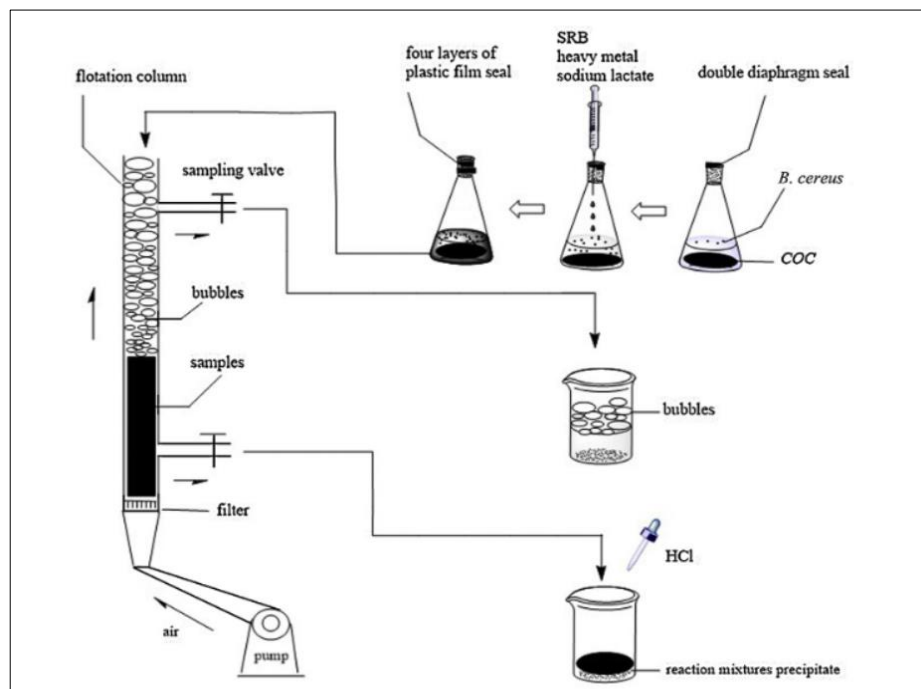


Figura 5: Diagrama esquemático de estrategias biotecnológicas para la limpieza de metales pesados.

Fuente: Citado de Wu et al. (2017)

Sin embargo, algunos autores usaron otros microorganismos para la bioadsorción de metales pesados, tal es el caso de Migahed, Abdelrazak y Fawzy (2016, p. 1172), el usó una biomasa de bacterias y esporas de hongos para el tratamiento de aguas residuales contaminadas por metales como el cromo (Cr) y el hierro (Fe); y lo particular de su trabajo experimental es que la biomasa estaba encerrada en una bolsa de té de celulosa colgada para facilitar la separación del biosorbente de las soluciones tratadas (figura 2)

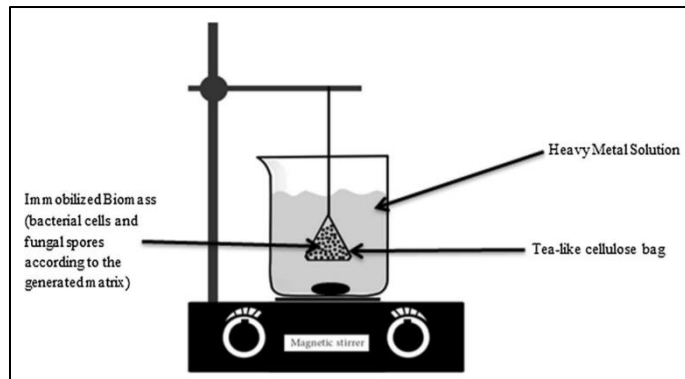


Figura 6: Esquema de bioadsorción de las bacterias y esporas de hongos

Fuente: Citado de Migahed et al. (2016)

Asimismo, Nakkeeran, Rathna y Viveka (2017, p. 222), realizó la biosorción de metales usando *Aureobasidium pullulans*, un hongo filamentoso capaz de producir una alta biomasa y tolerar los efectos de los metales pesados. Este organismo presenta una diversa morfología (figura 3) y según los autores es usado en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica.




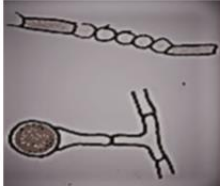

Morphology	Elucidation	Pictorial representation
Conidia	Ellipsoidal asexual spores	
Yeast-like cells	Elongated single cells	
Blastospores	Budding in yeast	
Chlamydospores	Cells formed with hyphae	
Mycelium	Aseptate polykaryotic hyphal extensions	

Figura 7: Morfología del *Aureobasidium pullulans*

Fuente: Citado de Nakkeeran et al. (2017)

En cambio, Husien *et al.* (2019), para la remoción del Cr (VI) presente en aguas residuales contaminadas, usaron un alga marina *Sargassum dentifolium*. Los autores analizaron los datos obtenidos de la absorción con dos formas lineales de isoterma, Langmuira y Freundlich. La isoterma de Langmuira manifestó un modelo más ajustado (figura 4).

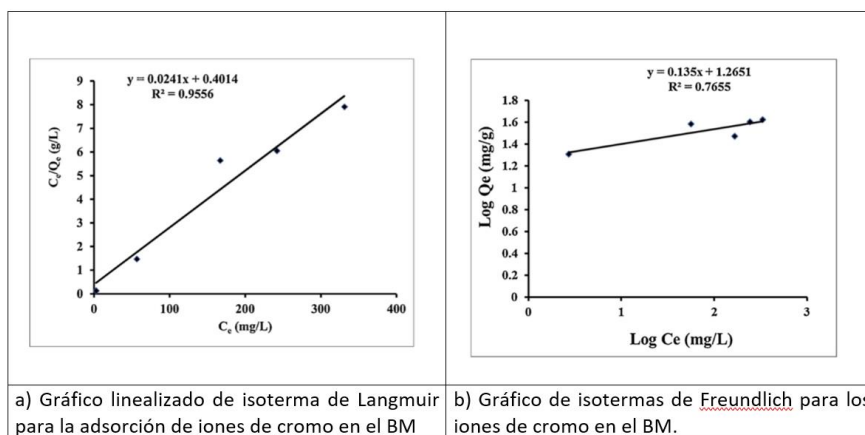


Figura 8: Modelos de isoterma (Langmuir y Freundlich)
Fuente: Citado de Husien *et al.* (2019)

En ese sentido, según los resultados presentes en la tabla 3, se pudo evidenciar el porcentaje de remoción que cada tipo de microorganismo (bacteria, hongos, vibriones, algas) pudo realizar en los medios contaminados con metales pesados. Se detalla en la figura 5 y 6.

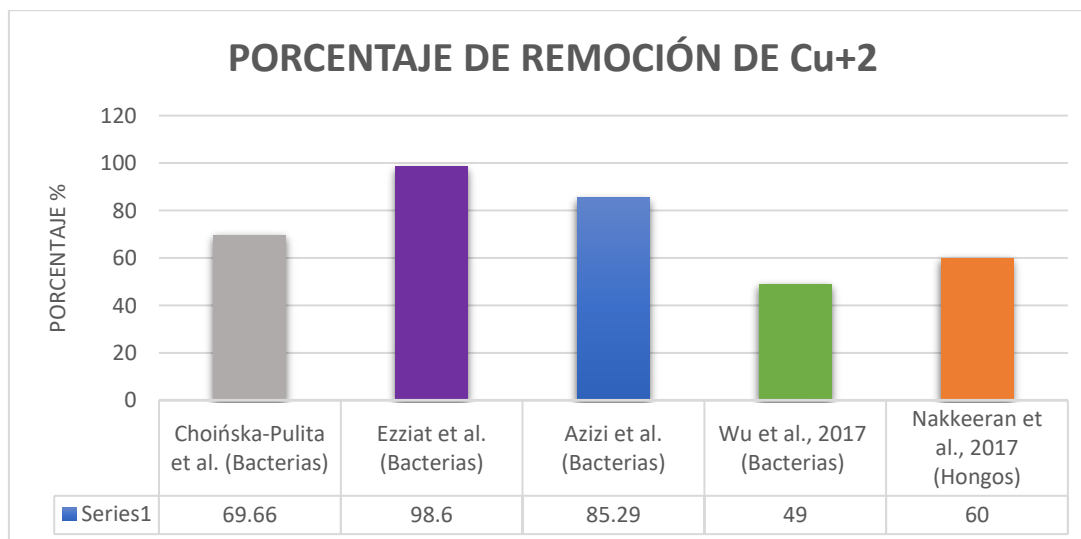


Figura 9: Gráfico comparativo de remoción del Cu²⁺ mediante microorganismos
Fuente: Elaboración propia

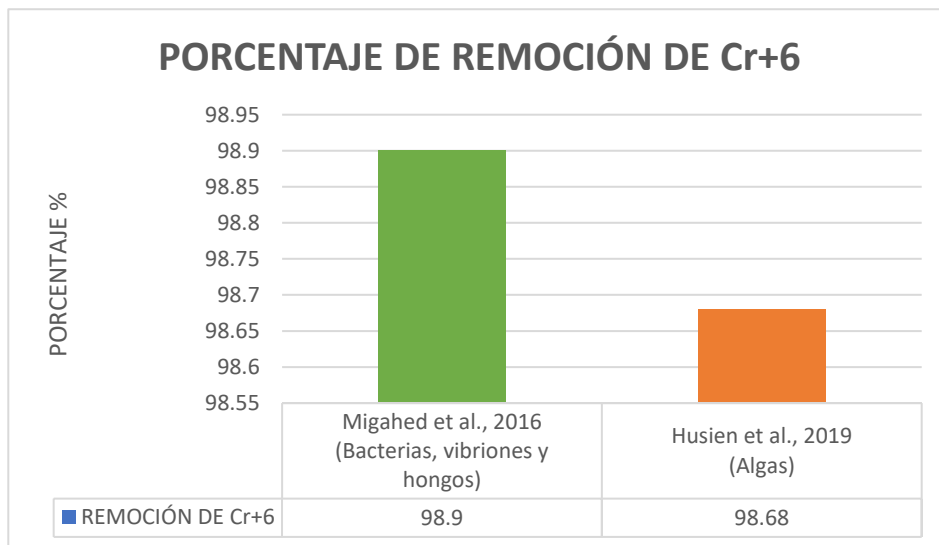


Figura 10: Gráfico comparativo de remoción del Cr6+ mediante microorganismos

Fuente: Elaboración propia

Según los gráficos se puede evidenciar que para el caso de remoción del Cu^{2+} , la investigación de Nakkeeran, Rathna y Viveka (2017, p. 225) obtuvo una mayor eficiencia en dicho proceso mediante el uso de hongos (*Aureobasidium pullulans*); mientras que para a remoción de Cr^{6+} , la investigación de Migahed, Abdelrazak y Fawzy (2016, p. 1177) obtuvo una mayor eficiencia mediante el uso de una biomasa formada por bacterias, vibriones y hongos.

Resultados del objetivo 2: Tipos de metales absorbidos

Tabla 4: Tipos de metales adsorbidos en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes contaminados

ESTUDIO	TIPOS DE METALES	METODOLOGÍA DEL TRATAMIENTO	RESULTADOS	AUTOR
<i>Caracterización de la biosorción de Pb²⁺ por la cepa psicrotrofica Pseudomonas sp. I3 aislada del suelo de permafrost del humedal de Mohe en el noreste de China</i>	Pb ²⁺	<i>Aplicó un diseño experimental donde se desarrolla la cinética de absorción para microorganismos vivos y no vivos y se usa las Pseudomonas sp. I3 para la absorción de Pb²⁺</i>	<i>Remoción del 48% de Pb²⁺</i>	<i>Li et al., 2017</i>
<i>Proceso innovador de biosorción de bajo costo de Cr⁶⁺ por Pseudomonas alcaliphila NEWG-2</i>	Cr ⁶⁺	<i>Aplicó un diseño experimental donde se efectuó la bioremediación de Cr⁶⁺ en función del proceso de sorción bacteriana mediante el uso de Pseudomonas sp. NEWG-2.</i>	<i>Remoción del 96.6% de Cr⁶⁺</i>	<i>El-Naggar et al., 2020</i>
<i>Biosorción de cobre por Rhodococcus erythropolis aislado de la mina Sossego - PA – Brasil</i>	Cu ²⁺	<i>Aplicó un diseño experimental donde usaron la cepa de Rhodococcus erythropolis y se cultivó en medio LB, bajo agitación orbital a 180 rpm y 28 ° C.</i>	<i>Remoción del 75% de Cu²⁺</i>	<i>Passos Galluzzi et al., 2019</i>
<i>Mecanismo y acción de Aureobasidium pullulans sobre la biosorción de metales</i>	Cu ²⁺ , Cd ²⁺ , Zn ³⁺ , Co ²⁺	<i>Aplicó un diseño no experimental, donde analizó sistemáticamente las investigaciones acerca de la biosorción mediante el uso de hongos filamentosos.</i>	<i>Remoción del 60% de Cu²⁺, 50% de Cd²⁺, 55% de Zn²⁺ y 45% de Co²⁺</i>	<i>Nakkeeran et al., 2017</i>

Fuente: Elaboración propia

Referente a los tipos de metales adsorbidos en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes contaminados, podemos encontrar diversos elementos, sin embargo, según la revisión sistemática que se realizó pudimos evidenciar que, por ejemplo, Li *et al.* (2017, p. 8), realizó un proceso de bioadsorción de plomo (Pb) encontradas en las aguas residuales al noreste de China proveniente de sector industrial. Para ello hicieron uso de una biomasa de bacterias *Pseudomonassp* I3; y además los datos de equilibrio para biosorventes vivos se ajustaron bien al modelo de Langmuir (figura 5),

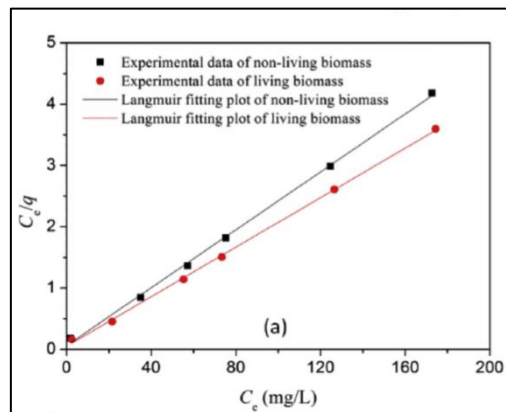


Figura 11: Bioadsorción del Pb según el modelo de Langmuir.

Fuente: Citado de Li *et al.* (2017)

En cambio, El-Naggar *et al.* (2020, p. 1), menciona que uno de los metales pesados que más problemas de salud causa cuando son descargados junto con las aguas residuales en los ecosistemas acuáticos, es el cromo hexavalente, es por ello que en su investigación realizó la bioremediación del Cr (VI) mediante el uso de *Peusomonas sp.* NEWG-2 (figura 6).

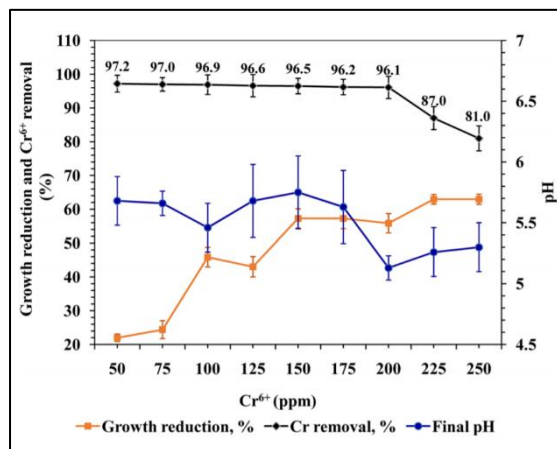


Figura 12: Reducción del crecimiento, eliminación de Cr^{6+} y pH final como potencialidad de *Pseudomonas sp.* NEWG-2 hacia umbrales de

Fuente: Citado de El-Naggar *et al.* (2020)

Por otro lado, Passos Galluzzi *et al.* (2019, p. 477), en su trabajo experimental, realizó la biosorción del cobre (Cu^{2+}) mediante el uso de una biomasa de una cepa bacteriana identificada como *Rhodococcus erythropolis*. Asimismo, la capacidad de absorción del metal se calculó mediante la construcción de modelos de isothermas de Langmuir y Freundlich.

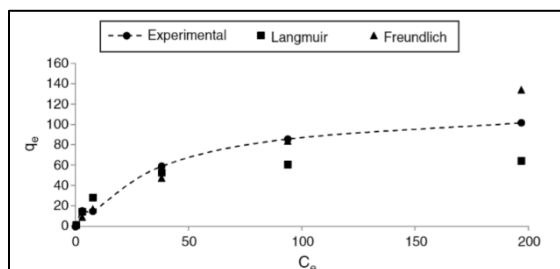


Figura 13: Comparativo entre los datos experimentales y las isothermas ajustadas a pH 6.

Fuente: Citado de Passos Galluzzi *et al.* (2019)

En ese sentido, según los resultados presentes en la tabla 4, se pudo evidenciar el los tipos de metales absorbidos por los microorganismos (bacteria, hongos, vibriones, algas) pudo realizar en los medios contaminados con metales pesados. Se detalla lo mencionado anteriormente en la figura 10.

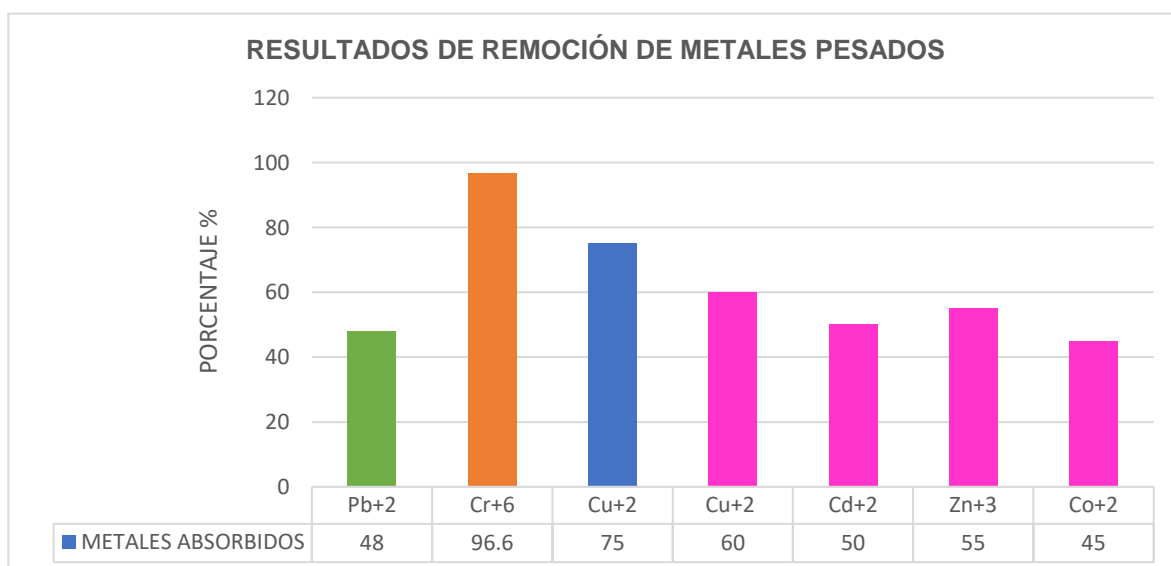


Figura 14: Comparación de resultados según el tipo de metal absorbido

Fuente: Elaboración Propia.

Según el gráfico podemos evidenciar los diferentes tipos de metales removidos, donde el que obtuvo mayor absorción mediante el tipo de microorganismo (bacteria) utilizado fue el Cr^{6+} con un 96.6 % y el que obtuvo una menor absorción mediante el microorganismo (bacteria) fue el Pb^{2+} con un 48%. Se puede evidenciar la máxima y mínima remoción que se obtuvo para los metales pesados, así también como el tipo de microorganismo, en ambos casos, fueron bacterias.

Resultados del objetivo 3: Condiciones de absorción

Tabla 5: Condiciones de absorción en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes contaminados.

ESTUDIO	CONDICIONES DE ABSORCIÓN	METODOLOGÍA DEL TRATAMIENTO	RESULTADOS	AUTOR
<i>Un enfoque novedoso de utilización de la biomasa de conidios fúngicos para eliminar metales pesados de la solución acuosa mediante inmovilización</i>	<i>pH: 7 Tiempo: 1.6 hrs. T°: 25°C Agitación: 100 rpm Isoterma: Langmuir</i>	<i>Aplicaron un diseño experimental, donde reforzaron la acción del <i>Penicillium janthinillum</i> para la biosorción con perlas de alcohol polivinílico (PVA) – alginato de sodio (SA)</i>	<i>Remoción de 98.9% de Cu^{2+}, 84.8% de Cd^{+2} y 95.5% de Pb^{+2}</i>	<i>Cai et al. 2016</i>
<i>Fitorremediación: las algas como herramientas ecológicas para la eliminación de metales pesados de las aguas residuales.</i>	<i>pH: 6 - 8.1 Tiempo: 1 - 8 hrs. T°: 35.5°C Agitación: 150 rpm Isoterma: Freundlich</i>	<i>Aplicó un diseño de revisión sistemática para analizar las investigaciones científicas sobre la Fitorremediación.</i>	<i>Remoción de 68% de Cd^{+2}, de 52% de Pb^{+2}, 65% de Ni^{+2}, 50% de Sb^{+2} y 77% de As^{+1}</i>	<i>Ahmad et al, 2019</i>
<i>Aplicación de algas para la absorción de metales pesados: un metanálisis de 20 años</i>	<i>pH: 4 - 7.5 Tiempo: 0.3 hrs. T°: 30°C Agitación: 150 rpm Isoterma: Freundlich</i>	<i>Aplicaron un diseño experimental. Realizaron la absorción mediante el uso de biomasa de algas en aguas contaminadas por metales pesados.</i>	<i>Remoción de 70% de Cd^{+2}, 80% de Pb^{+2} y 85% de Zn^{+2}</i>	<i>Lin et al, 2020</i>

ESTUDIO	CONDICIONES DE ABSORCIÓN	METODOLOGÍA DEL TRATAMIENTO	RESULTADOS	AUTOR
<i>Estudios de absorción de cromo hexavalente [Cr (VI)] en biomasa a microescala de Sargassum dentifolium.</i>	pH: 8 Tiempo: 1 hr T°: 40°C Agitación: 100rpm Isoterma: Langmuir	<i>Usaron la biomasa pretratada de alga marina para eliminar el Cr (VI), y aplicaron un diseño experimental One Factor at a time (OFAT) y Full factorial.</i>	Remoción de 99.68% de Cr+6	Husien et al, 2019
<i>Eliminación mejorada de Pb (II) mediante biosorbentes a base de algas cultivadas en cultivos con alto contenido de fósforo</i>	pH: 6 Tiempo: 48 hrs. T°: 25°C Agitación: 5000 rpm Isoterma: Langmuir	<i>Aplicaron un diseño experimental. Realizaron la absorción mediante el uso de microalgas en aguas contaminadas por plomo (Pb II).</i>	Remoción de 80% de Pb y 95.67% de P	Li et al , 2019
<i>Aplicación de polvo modificado de Spirulina platensis y Chlorella vulgaris sobre la absorción de metales pesados de soluciones acuosas</i>	pH: 7 Tiempo: 2 hrs T°: 40°C Agitación: 100 rpm Isoterma: Langmuir	<i>Aplicaron un diseño experimental. Evaluaron la tasa de absorción de iones metálicos; en la solución acuosa con polvo modificado con ácido sulfúrico biosorbente de algas Spirulina platensis y Chlorella vulgaris.</i>	Remoción de (Spirulina platensis (80.75%) Chlorella vulgaris (84.75%)) de Cu^{2+} ; remoción de (Spirulina platensis (92.76) Chlorella vulgaris (87.52%)) de Cd^{+2} ; remoción de Spirulina platensis (94.09%) Chlorella vulgaris (90.09%)) de Pb^{+2}	Sayadi et al , 2019
<i>Complejo inmovilizado de microalgas y biocarbón: un nuevo biosorbente eficaz para la eliminación de</i>	pH: 8 Tiempo: 35 hrs. T°: 28°C Agitación: 450rpm	<i>Aplicaron un diseño experimental. Realizaron la bioadsorción mediante el uso de las viables (Chlorella sp) y variando los principales parámetros operativos</i>	Remoción de 90.56 % de Cd^{+2}	Shen et al, 2017

ESTUDIO	CONDICIONES DE ABSORCIÓN	METODOLOGÍA DEL TRATAMIENTO	RESULTADOS	AUTOR
<i>cadmio de una solución acuosa</i>	<i>Isoterma: Langmuir</i>			
<i>Proceso innovador de biosorción de bajo costo de Cr⁺⁶ por Pseudomonas caliphila NEWG-2</i>	<i>pH: 7 Tiempo: 48 T: 20°C Agitación: 100 rpm Isoterma: Langmuir</i>	<i>Aplicó un diseño experimental donde se efectuó la bioremovoción de Cr+6 en función del proceso de sorción bacteriana mediante el uso de Pseudomonas sp. NEWG-2.</i>	<i>Remoción del 96.6% de Cr⁶⁺</i>	<i>El-Naggar et al ,2020</i>

Fuente: Elaboración propia

Por último, respecto a las condiciones de absorción algunos autores manifiestan que, durante sus procesos experimentales ciertos factores fueron más influyentes que otros, tal es el caso de Cai *et al.* (2016, p. 4), constató los cambios en la capacidad de absorción de los metales y la eficiencia de eliminación con la temperatura (figura 8, 9 y 10) según las perlas de alcohol polivinílico (PVA) – alginato de sodio (SA).

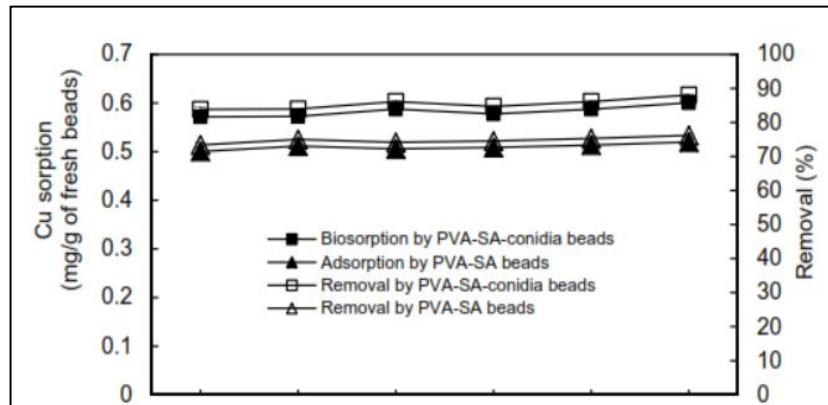


Figura 15: Cambios en la sorción y remoción de Cu en función de la temperatura.

Fuente: Citado de Cai *et al.* (2016)

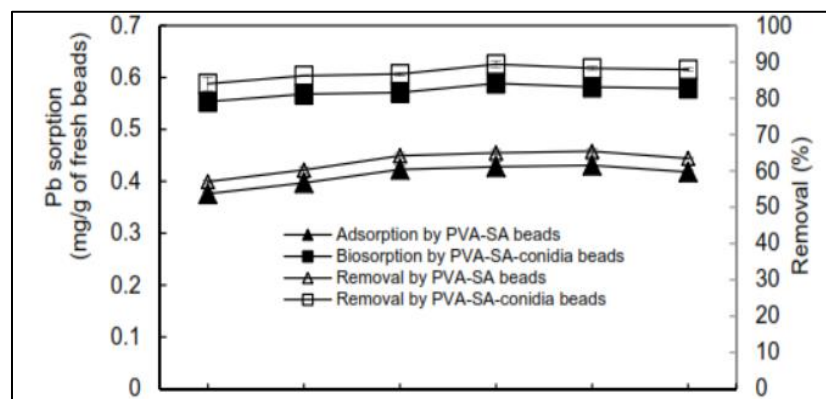


Figura 16: Cambios en la sorción y remoción de Pb en función de la temperatura.

Fuente: Citado de Cai *et al.* (2016)

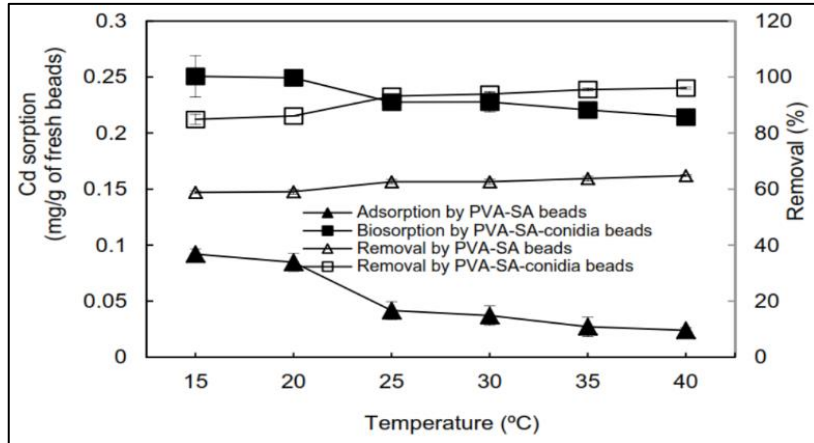


Figura 17: Cambios en la sorción y remoción de Cd en función de la temperatura.

Fuente: Citado de Cai et al. (2016)

Ahmad *et al.* (2019, p. 67), realizó una revisión sistemática presentando a la fitorremediación como una alternativa ecológica, rentable e innovadora para solucionar la problemática de remoción de metales pesados en medios acuosos, asimismo menciona que la eficiencia de este tratamiento se basa en las condiciones fisicoquímicas a las que las algas puedan estar sometidas durante el proceso. Uno de los principales factores que condiciona el proceso de biosorción es el pH, tanto en la biomasa de algas activas como las pasivas (figura 14)

METAL	ESTADO IÓNICO	BIOMASA DE ALGAS	pH	CAPACIDAD MÁXIMA DE CONSUMO (mg/g)	REFERENCIAS
Active algal biomass					
Cd	Cd ²⁺	<i>Chaetoceros calcitrans</i>	8	1055.27	Sjahrul and Arifin (2012)
		<i>Desmodesmus pleiomorphus</i>	4	61.2	Monteiro et al. (2010)
		<i>Isochrysis galbana</i>		0.02	Sbihi et al. (2012)
		<i>Planothidium lanceolatum</i>	7	275.51	Sbihi et al. (2012)
		<i>Scenedesmus abundans</i>	8	574	Monteiro et al. (2009)
		<i>Synechocystis</i> sp.		199.83	Tiantian et al. (2011)
		<i>Tetraselmis chuii</i>	8	13.46	Sjahrul and Arifin (2012)
		<i>Tetraselmis chuii</i>		292.6	da Costa and de Franca (1998)
		Cr	Cr ³⁺	<i>Spirulina</i> sp.	
<i>Spirulina</i> sp.				333	Doshi et al. (2007)
Cu	Cu ²⁺	<i>Anabaena cylindrica</i>	4–5	12.62	Tien et al. (2005)
		<i>Anabaena spiroides</i>	4–5	8.73	Tien et al. (2005)
		<i>Asterionella formosa</i>	4–5	1.1	Tien et al. (2005)
		<i>Aulacoseira varians</i>	4–5	2.29	Tien et al. (2005)
		<i>Ceratium hirundinella</i>	4–5	2.3	Tien et al. (2005)
		<i>Chlorella fusca</i>	6	3.2	Dönmez et al. (1999)
		<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	7	2.4	Yan and Pan (2002)
		<i>Chlorella</i> sp.		220	Doshi et al. (2006)
		<i>Closterium lunula</i>	7	0.5	Yan and Pan (2002)
		<i>Eudorina elegans</i>	4–5	3.96	Tien et al. (2005)
		<i>Isochrysis galbana</i>		0.11	Sbihi et al. (2012)
		<i>Planothidium lanceolatum</i>	7	134.32	Sbihi et al. (2012)
		Passive algal biomass			
Cd	Cd ²⁺	<i>AER Chlorella</i>	3–7	7.74	Sandau et al. (1996)
		<i>Aulosira fertilissima</i>	5	14.57	Singh et al. (2007)
		<i>Calothrix parietina</i>	7		Inthorna et al. (2002)
		<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	6	42.6	Tüzün et al. (2005)
		<i>Cyclotella cryptica</i>	6	22.24	Schmitt et al. (2001)
		<i>Desmodesmus pleiomorphus</i>		58.6	Monteiro et al. (2011)

Figura 18: Nivel de pH del proceso de fitorremediación de algas activas y pasivas.

Fuente: Citado de Ahmad *et al.* (2019)

En cambio, Shen et al. (2017, p. 1035), investigó la viabilidad de la biorremediación de cadmio (Cd) utilizando el complejo inmovilizado de microalgas – biocarbón (MBIC). Además, comprobó que el modelo de isoterma de absorción que mejor se ajustaba a MBIC era el modelo Sips (figura 12).

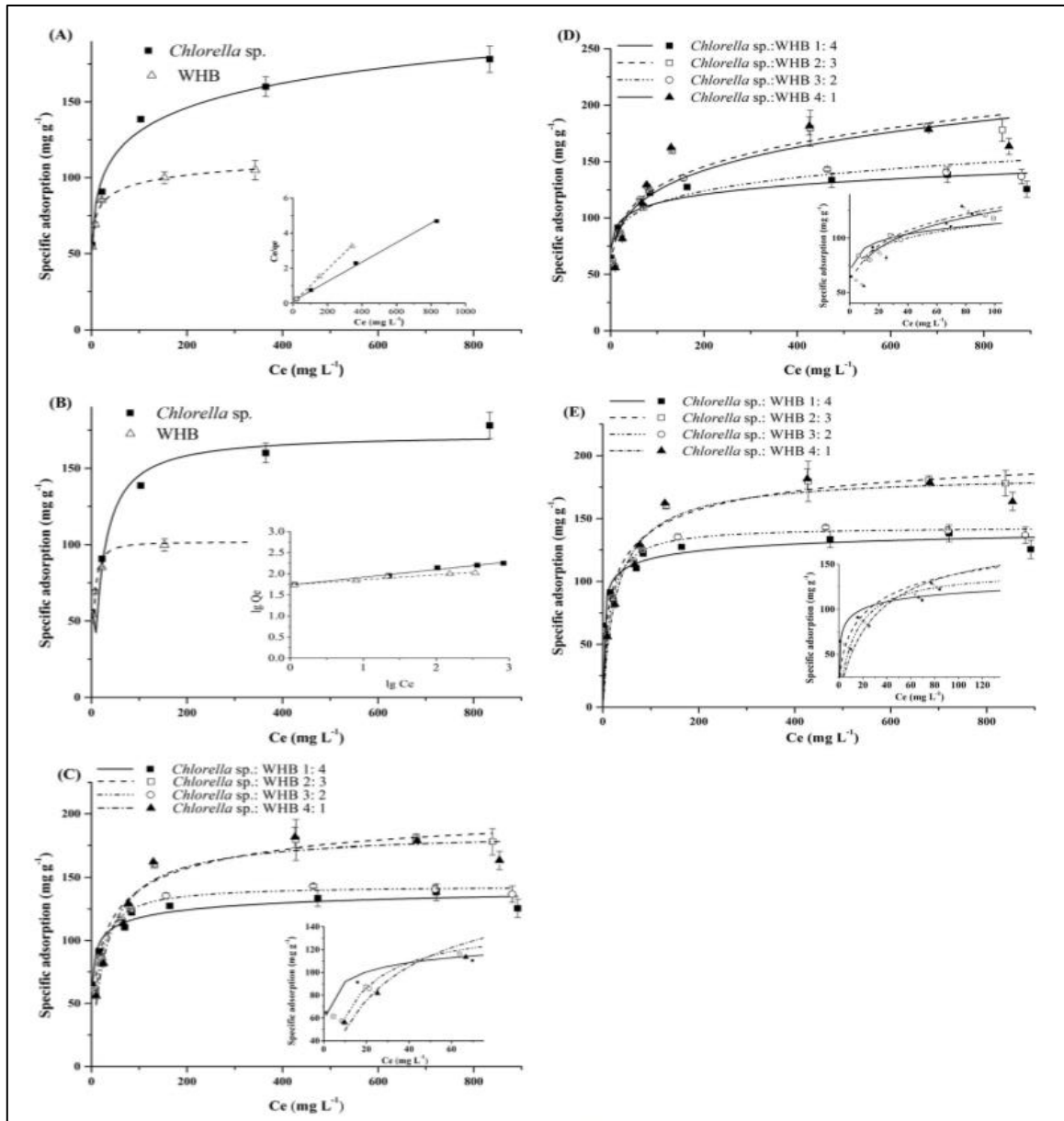


Figura 19: Modelado de isotermas para la biosorción de cadmio.

Fuente: Citado de Shen et al. (2017)

(A) Modelo de Langmuir no lineal y (recuadro) lineal para Chlorellasp. y WHB. (B) Modelo de Freundlich no lineal y (recuadro) lineal para Chlorellasp. y WHB. (C) Modelo de Langmuir no lineal para MBIC y (recuadro) imagen ampliada del rango de C_e entre 0 y 60 mg/l. (D) Modelo de Freundlich no lineal para MBIC e imagen ampliada (recuadro) del rango de C_e entre 0 y 100 mg/l. (E) Modelo Sips no lineal

para MBIC y (recuadro) imagen ampliada del rango de Ce entre 0 y 100 mg/l. Todos los datos son medias \pm error estándar de la media.

Por lo tanto, la investigación realizada por Shen et al. (2017, p. 1038) indicó claramente que una combinación de microalgas y biocarbón puede mejorar la capacidad de absorción de Cd (II), lo que demostró una estrategia factible de eliminación de metales pesados de las aguas residuales.

En ese sentido, según los resultados presentes en la tabla 5, se pudo evidenciar las condiciones en las que se logra la mayor absorción eficiente por los microorganismos (bacteria, hongos, vibriones, algas). Se detalla lo mencionado anteriormente en la figura 11.

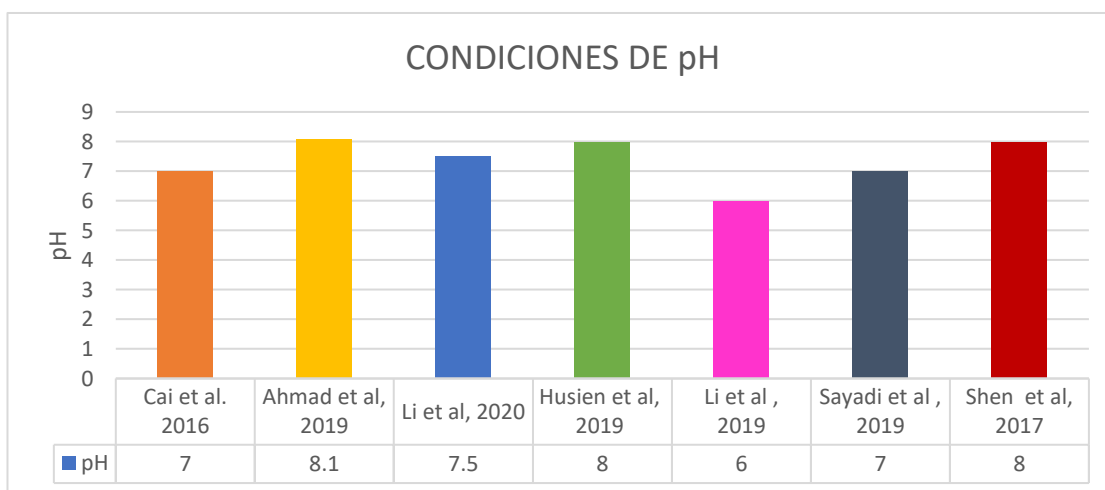


Figura 20: Comparación de nivel de pH alcanzado en la absorción
Fuente: Elaboración propia

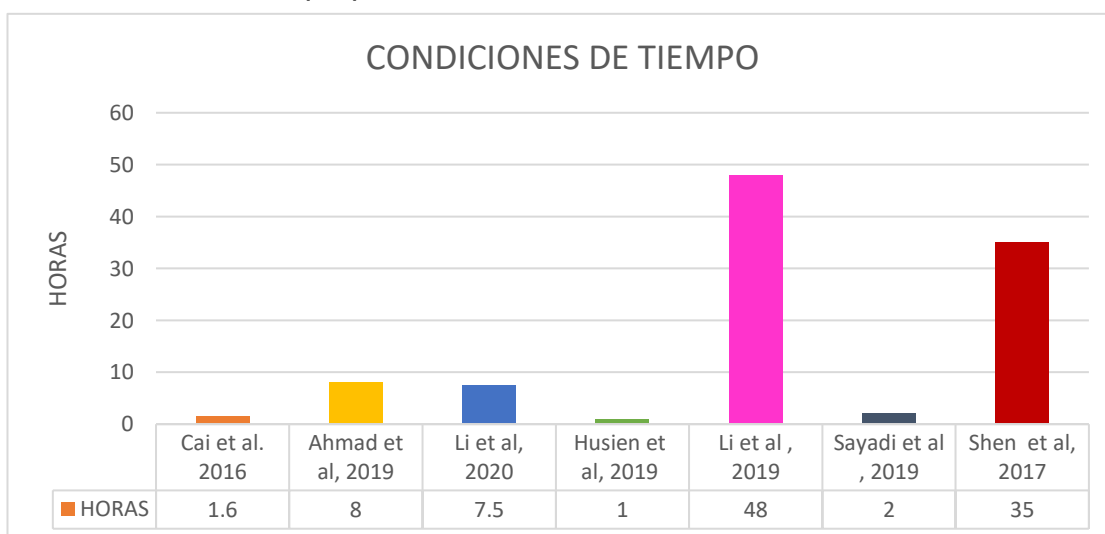


Figura 21: Comparación de período de tiempo para la absorción
Fuente: Elaboración propia

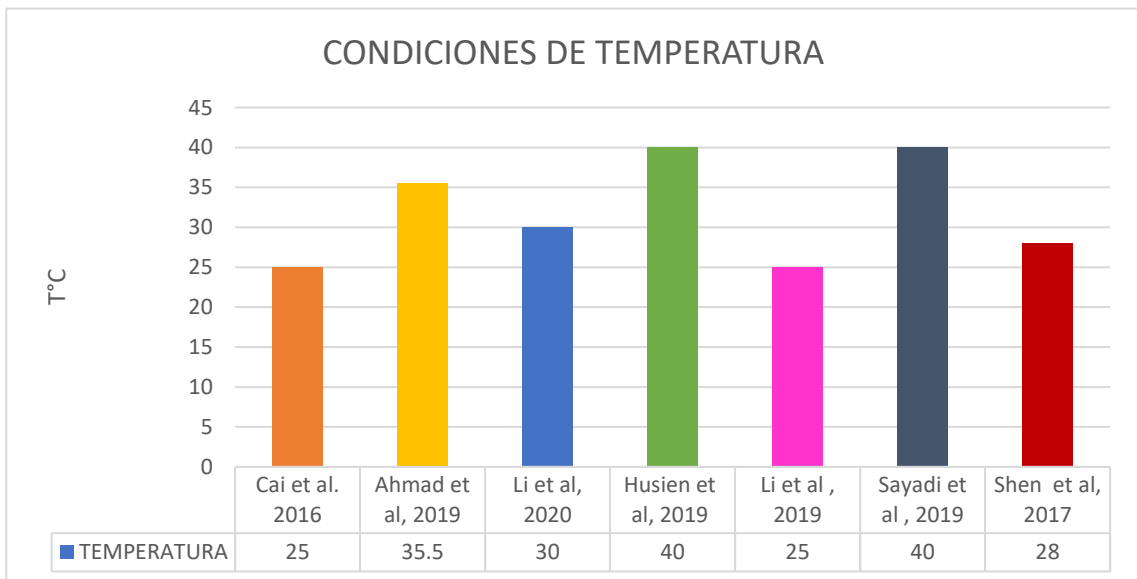


Figura 22: Comparación de condiciones de temperatura alcanzadas en la bioadsorción

Fuente: Elaboración propia

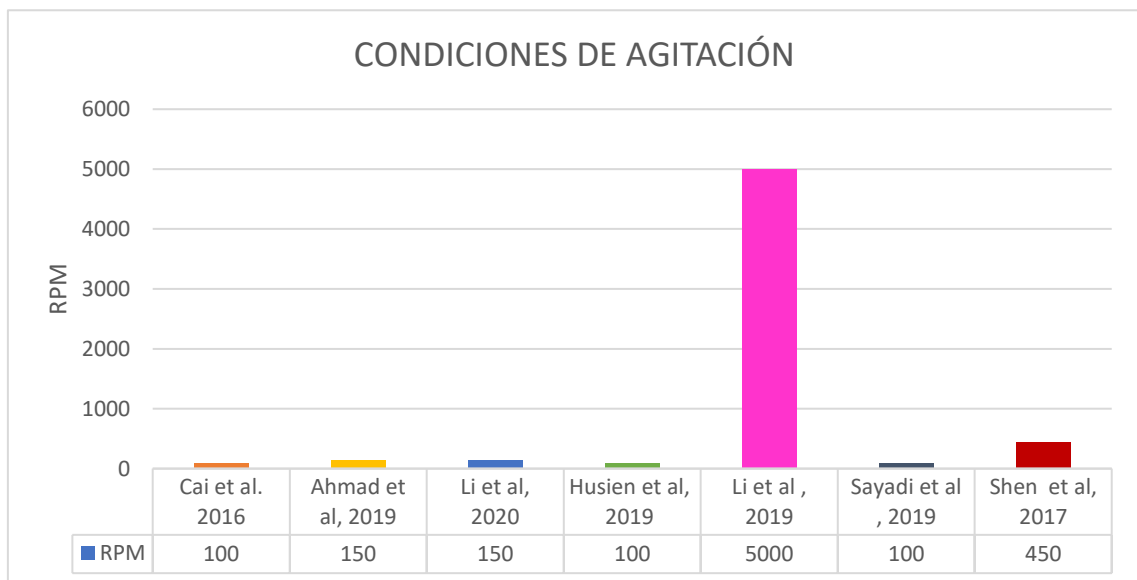


Figura 23: Comparación de condiciones de agitación alcanzadas para la bioadsorción

Fuente: Elaboración propia

Según las figuras 16, 17, 18 y 19 podemos evidenciar las condiciones necesarias por cada tipo de microorganismo para lograr una bioadsorción eficiente de los metales pesados removidos en las muestras de agua contaminada. Se deduce que el rango de valores de pH varió entre 6 y 8.1. En el caso del tiempo, se pudo comprobar que si existe un microorganismo que requiere de un período considerable para alcanzar una bioadsorción eficiente, es el caso de la

investigación de Li *et al.* (2019), el cual usó algas (*Chlorella sp*) para dicho proceso. Para la temperatura, la investigación de Sayadi et al. y Husien et al. mostraron un valor de 40 °C de condición para la bioadsorción. Por último, para la agitación, la investigación con más revoluciones por minuto necesarios para adquirir una bioadsorción eficiente fue la de Li *et al.*, con un valor notable de 5000 rpm.

Por lo tanto, se puede verificar que las condiciones con mayores diferencias son el período de tiempo (horas) y la agitación (rpm).

Por último, el modelo que más se ajusta para describir el equilibrio de la absorción de un material en una superficie en proceso de bioadsorción con microorganismos en efluentes industriales es la isoterma de Langmuir ya que muestra un mejor ajuste y representatividad del proceso de absorción para explicar su eficiencia y rendimiento, esto también está en función del metal a absorber. Los detalles se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: Descripción de las isotermas de absorción (Categoría 3: Condiciones de absorción)

AUTOR	MODELO DE ISOTERMA DE ABSORCIÓN	ECUACIÓN			COEFICIENTE DE CORRELACIÓN		
		Cu	Pb	Cd	Cu	Pb	Cd
CAI ET AL. (2016)	ISOTERMA DE LANGMUIR	$y=0.0736x + 0.5759$	$y=0.2557x - 0.6091$	$y= 0.2125x + 0.2919$	R2=0.9988	R2=0.9955	R2=0.9859
HUSIEN ET AL. (2019)	ISOTERMA DE LANGMUIR	ECUACIÓN			COEFICIENTE DE CORRELACIÓN		
		$y=0.0241x + 0.414$			R2=0.9556		
SAYADI ET AL. (2019)	ISOTERMA DE LANGMUIR	<i>Chlorella Vulgaris</i>			<i>Spirulina platensis</i>		
		Cd	Pb	Cu	Cd	Pb	Cu
		qm (mg/g)= 37.87 KL= 0.28 R2=0.930	qm (mg/g)=41.49 KL=0.20 R2=0.826	qm (mg/g)=37.31 KL= 0.61 R2=0.935	qm (mg/g)= 38.75 KL= 0.61 R2=0.925	qm (mg/g)=39.37 KL=0.35 R2=0.936	qm (mg/g)=37.45 KL= 0.47 R2=0.887
LI ET AL. (2019)	ISOTERMA DE LANGMUIR	BIOABSORBENTE B-280					
		qmax (mg/g)= 635.79 KL= 0.0527 R2= 0.9846					
SHEN ET AL. (2017)	ISOTERMA DE LANGMUIR	PARÁMETROS					
		qmax (mg/g) = 169.92 KL (L/mg) = 0.06 R2 = 0.99					
EL-NAGGAR ET AL. (2020)	ISOTERMA DE LANGMUIR	PERLAS INOCULADAS			PERLAS NO INOCULADAS		
		qmáx(mg/g)=10.000 b constant (L/g)=0.2468 R2= 0.9990			qmáx(mg/g)= 7.405 b constant (L/g)= 0.0334 R2= 0.9225		

Fuente: Elaboración prop

V. CONCLUSIONES

OG: Se analizó los aspectos más relevantes del proceso de bioadsorción de metales pesados por medio de microorganismos en efluentes contaminados, tanto aspectos propios de los microorganismos (morfología, taxonomía, propiedades), como de las características de los metales.

OE1: Se identificó los tipos de microorganismos utilizados en el proceso de bioadsorción de metales en efluentes contaminados; Bacteria: Sinergia de *Bacillus cereus* y *Camellia oleífera*, *Serratia plymuthica*, *Serratia quinivorans*, *Bacillus mojavenensis*, *Bacillus subtilis*, *Bacillus pseudocaliphilus*; *Paenibacillus peoriae*; *Paenibacillus jamilae*, *Pseudomonas sp. 375*, *Acinetobacter baumannii*, *Enterobacter gergoviae*, *Endwardsiella hoshinae*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acinetobacter lwoffii*, *Moraxella lacunata*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas putida*, *Acinetobacter haemolyticus*, *Enterobacter cloacae*, *Pseudomonas stutzeri*, *Aeromonas hydrophilia*, *Aeromonas sobria*, *Salmonella sp*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Citrobacter koseri*, *Aeromonas salmonicida. koseri*, *Moraxella lacunata Pila Microbiana para adsorción (Geobacter)*, *Enterobacter sp. (DNB-S2)*; Vibriones: *Vibrio kanaloae*, *Vibrio lentus*, *Vibrio jasicida*; Hongos: *Saccharomyces cerevisiae*, *Aureobasidium pullulans*; Algas: *Sargassum dentifolium*. Cabe mencionar que según la revisión sistemática analizada los microorganismos más utilizados en los procesos de bioadsorción son los pertenecientes al reino monera, específicamente las bacterias. Las cuales se clasifican de la siguiente manera (tabla 7 y 8):

Tabla 7: Bacterias gran negativas y gran positivas

ID	Autor	Microorganismo : Bacteria	Clasificación por tinción
1	Wu et al. 2017	<i>Bacillus cereus</i>	Gram Positivo
2	Xu et al. 2020	<i>Pseudomonas sp. 375</i>	Gram negativo
3	Migahed, Abdelrazak y Fawzy. 2016	<i>Serratia plymuthica</i> <i>Serratia quinivorans</i> <i>Bacillus mojavensis</i> <i>Bacillus subtilis</i> <i>Bacillus pseudocaliphilus</i> <i>Paenibacillus peoriae</i> <i>Paenibacillus jamilae</i>	Gram Positivo
4	Choińska-Pulita et al. 2018	<i>Pseudomonas azotoformans</i> la cepa JAW1	Gram negativo
5	Ezziat et al. 2019	<i>Geobacter</i>	Gram Positivo
6	Azizi et al. 2016	<i>Acinetobacter baumannii, Enterobacter gergoviae, Edwardsiella hoshinae, Klebsiella pneumoniae, Acinetobacter Iwoffii, Moraxella lacunta, Escherichia coli, Pseudomonas putida, Acinetobacter haemolyticus, Enterobacter cloacae, Pseudomonas stutzeri, Aeromonas hydrophilia, Aeromonas sobria, Salmonella sp, Pseudomonas aeruginosa, Citrobacter koseri, Aeromonas salmonicida. koseri, Moraxella lacunta</i>	Gram Positivo Gram Negativo
7	Sun et al. 2020	<i>Enterobacter sp. (DNB-S2)</i>	Gram Positivo

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8: Hongos y algas

ID	Autor	Algas (especie)
1	Husien et al, 2019	<i>Sargassum dentifolium</i>
ID	Autor	Hongos (especie)
1	Nakkeeran et al, 2017	<i>Aureobasidium pullulans</i>

Fuente: Elaboración propia

OE2: Se identificó los tipos de metales adsorbidos en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes contaminados, entre los que destaca, el Cr^{+6} , Cu^{+2} , Cd^{+2} y Pb^{+2} . Sin embargo, según las diversas investigaciones analizadas, se destaca el estudio de bioadsorción del Cr hexavalente ya que es uno de los metales más peligrosos y tóxicos presentes en las aguas residuales. debido a que en los diferentes estudios presentados se evidencia mayor referencia de Cr hexavalente, teniendo como microorganismo eliminador a la *Serratia sp*, el cual lo asimila en su proceso fisiológica según lo manifiestan Migahed, Abdelrazak y Fawzy. 2016 y con un porcentaje de remoción del 98.9 %, el máximo alcanzado entre todos los metales.

OE3: Se identificó las condiciones de absorción en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes contaminadas, tales como, temperatura, pH, exposición, isothermas de absorción y cinética de absorción. Los rangos de pH variaron entre 6 y 8.1; los rangos de T° entre 25 °C y 40 °C; las condiciones de tiempo entre 1 – 48 horas; las condiciones de agitación entre 100 y 5000 rpm. Estas condiciones se deben de tener en control porque si hay una variación los microorganismos vivos reaccionan de manera agresiva frente al sustrato y realizando un control mantienen un equilibrio y adsorción óptimo.

VI. RECOMENDACIONES

De acuerdo a las investigaciones analizadas, el cromo hexavalente es uno de los metales más presentes en los efluentes, por ello se recomienda replicar los métodos de bioadsorción mostrados en esta investigación para reducir el nivel de contaminación en los ecosistemas acuáticos.

Asimismo, se recomienda el uso de otros microorganismos no tan comunes en el proceso de bioadsorción, para generar un enriquecimiento científico en las investigaciones.

En el Perú, las fuentes de información de calidad científica aún no son tan accesibles para todas las personas dedicadas a la investigación, es por ello que se recomienda la incorporación de estos estudios en los principales portales nacionales.

REFERENCIAS

1. ABIOYE, O. P., et al. Biosorption of lead, chromium and cadmium in tannery effluent using indigenous microorganisms. *Brazilian Journal of Biological Sciences*. 2018. Vol. 5, no. 9, p. 25-32. DOI 10.21472/bjbs.050903.
2. AFZAL, Abuzar Muhammad, RASOOL, Muhammad Hidayat, WASEEM, Muhammad y ASLAM, Bilal, 2017. Assessment of heavy metal tolerance and biosorptive potential of *Klebsiella variicola* isolated from industrial effluents. *AMB Express*. 29 septiembre 2017. Vol. 7, no. 1, p. 184. DOI 10.1186/s13568-017-0482-2.
3. AHMAD, Shamshad, et al. Phycoremediation: Algae as Eco-friendly Tools for the Removal of Heavy Metals from Wastewaters. *Springer Link*, 53-76, 2019. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-13-3426-9_3
4. ARADA, María, GARRIDO, Larramendi y ACEBAL, Ana. Evaluación de metales pesados e impacto ambiental en los pozos “Rive Fuente” y “Bárbara” del poblado El Cobre. *Revista Cubana de Química*. 30(1), 68-76, 2018. ISSN: 2224-5421
5. AZIZI, Shohreh, KAMIKA, Ilunga y TEKERE, Memory, 2016. Evaluation of Heavy Metal Removal from Wastewater in a Modified Packed Bed Biofilm Reactor. *PLOS ONE*. 17 mayo 2016. Vol. 11, no. 5, p. e0155462. DOI 10.1371/journal.pone.0155462.
6. CAI, Xunchao, et al. Microbial characterization of heavy metal resistant bacterial strains isolated from an electroplating wastewater treatment plant. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 15 octubre 2019. Vol. 181, p. 472-480. DOI 10.1016/j.ecoenv.2019.06.036.

7. CALAO, Clelia y MARRUGO, José. Efectos genotóxicos asociados a metales pesados en una población humana de la región de La Mojana, Colombia, 2013. *Revista Biomédica*, 35, 139-151, 2015.
ISSN: 0120-4157
8. CAVIEDES, Diego, et al. Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1), 73-90, 2015.
ISSN 1657-6985
9. CEGARRA, José. Metodología de la investigación científica y tecnológica. 1era Edición: ISE, 2004. 376 pp.
ISBN: 9788499690278
10. CHEN, Jianwen, LI, Junjian, ZHANG, Hong, SHI, Wei y LIU, Yong, 2019. Bacterial Heavy-Metal and Antibiotic Resistance Genes in a Copper Tailing Dam Area in Northern China. *Frontiers in Microbiology* [en línea]. 2019. Vol. 10. [Accedido 16 mayo 2021]. DOI 10.3389/fmicb.2019.01916. Recuperado a partir de: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2019.01916/full>.
11. CHOIŃSKA-PULIT, Anna, SOBOLCZYK-BEDNAREK, Justyna y ŁABA, Wojciech, 2018. Optimization of copper, lead and cadmium biosorption onto newly isolated bacterium using a Box-Behnken design. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 1 marzo 2018. Vol. 149, p. 275-283. DOI 10.1016/j.ecoenv.2017.12.008.
12. DIEP, Patrick, MAHADEVAN, Radhakrishnan y YAKUNIN, Alexander F., 2018. Heavy Metal Removal by Bioaccumulation Using Genetically Engineered Microorganisms. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* [en línea]. 2018. Vol. 6. [Accedido 16 mayo 2021]. DOI 10.3389/fbioe.2018.00157.

13. DOMÍNGUEZ, Rubén y LÓPEZ, María. Análisis documental del contenido fílmico en seis filmotecas españolas. Depósito de Investigación Universidad de Sevilla, 25(5), 787-794, 2016.
ISSN 1699-2407
14. EL-NAGGAR, Noura El-Ahmady, et al. 2020. Innovative low-cost biosorption process of Cr 6+ by Pseudomonas alcaliphila NEWG-2. Scientific Reports. 20 agosto 2020. Vol. 10, no. 1, p. 14043. DOI 10.1038/s41598-020-70473-5.
15. EZZIAT, Loubna, et al. Challenges of Microbial Fuel Cell Architecture on Heavy Metal Recovery and Removal From Wastewater. Frontiers in Energy Research [en línea]. 2019. Vol. 7. [Accedido 16 mayo 2021]. DOI 10.3389/fenrg.2019.00001.
16. FONDO EDITORIAL CÉSAR VALLEJO. Referencias estilo ISO 690 y 690-2. 1era Edición: UCV, 2017. 34 pp.
17. HERNANDEZ, Roberto, FERNÁNDEZ, Carlos y BAPTISTA, Pilar. Metodología de la Investigación. 6ta Edición. México: Mc Graw Hill, 2014. 600 pp.
ISBN: 978-1-4562-2396-0
18. HUSIEN, Sh., LABENA, A., EL-BELELY, E. F., MAHMOUD, Hamada M. y HAMOUDA, Asmaa S., 2019. Adsorption studies of hexavalent chromium [Cr (VI)] on micro-scale biomass of Sargassum dentifolium, Seaweed. Journal of Environmental Chemical Engineering. 1 diciembre 2019. Vol. 7, no. 6, p. 103444. DOI 10.1016/j.jece.2019.103444.
19. LARIOS, Fernando, GONZÁLEZ Carlos y MORALES, Yennyfer. Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. Revista de la Facultad de Ingeniería, 2(1), 8-25, 2015.
ISSN 2311-7915

20. Las aguas residuales y sus efectos contaminantes. [Mensaje en un blog]. República Dominicana, Rodríguez, H., (13 de marzo del 2017). Recuperado de: <https://www.iagua.es/blogs/hector-rodriguez-pimentel/aguas-residuales-y-efectos-contaminantes>.
21. LI, Dandan, et al. 2017. Characterization of Pb²⁺ biosorption by psychrotrophic strain *Pseudomonas* sp. I3 isolated from permafrost soil of Mohe wetland in Northeast China. *Journal of Environmental Management*. 1 julio 2017. Vol. 196, p. 8-15.
DOI 10.1016/j.jenvman.2017.02.076.
22. LI, Yinta, SONG, Shaoxian, XIA, Ling, YIN, Huaqun, GARCÍA MEZA, Jessica Viridiana y JU, Wenming, 2019. Enhanced Pb(II) removal by algal-based biosorbent cultivated in high-phosphorus cultures. *Chemical Engineering Journal*. 1 abril 2019. Vol. 361, p. 167-179.
DOI 10.1016/j.cej.2018.12.070.
23. LIN, Zeyu, LI, Jing, LUAN, Yaning y DAI, Wei, 2020. Application of algae for heavy metal adsorption: A 20-year meta-analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 1 marzo 2020. Vol. 190, p. 110089. DOI 10.1016/j.ecoenv.2019.110089.
24. LONDOÑO, Luis, LONDOÑO, Paula y MUÑOZ, Fabián. Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 145-153, 2016.
DOI:10.18684/BSAA(14)145-153
25. MAL, J., et al. Effect of heavy metal co-contaminants on selenite bioreduction by anaerobic granular sludge. *Bioresource Technology*. 1 abril 2016. Vol. 206, p. 1-8. DOI 10.1016/j.biortech.2016.01.064.
26. MIGAHED F., ABDELRAZAK, A. y FAWZY, G., 2017. Batch and continuous removal of heavy metals from industrial effluents using microbial consortia.

International Journal of Environmental Science and Technology. 1 junio 2017.
Vol. 14, no. 6, p. 1169-1180.
DOI 10.1007/s13762-016-1229-3.

27. MUNARRIZ, Begoña, 1992. Técnicas y métodos en Investigación cualitativa [en línea]. Universidade da Coruña. [Accedido 10 abril 2021]. ISBN 978-84-600-8006-0. Recuperado a partir de: <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/8533>
28. NAKKEERAN, Ekambaram, RATHNA, Ravichandran y VIVEKA, Ravichandran, 2018. Mechanism and Action of Aureobasidium pullulans on Biosorption of Metals. Waste Bioremediation [en línea]. Singapore: Springer. p. 215-231. Energy, Environment, and Sustainability. [Accedido 18 mayo 2021]. ISBN 978-981-10-7413-4. Recuperado a partir de: https://doi.org/10.1007/978-981-10-7413-4_11
29. ÑAUPAS et al. Metodología de la Investigación Cuantitativa – Cualitativa y Redacción de la Tesis. 5ª Edición. Bogotá: Ediciones de la U, 2018. 562 pp. ISBN: 978-958-762-876-0
30. PASSOS GALLUZZI, Marcela. Copper biosorption by Rhodococcus erythropolis isolated from the Sossego Mine – PA – Brazil. Journal of Materials Research and Technology, 8(1), 475-483, 2019.
31. PÉREZ, Perla y AZCONA, María. Los efectos del cadmio en la salud. Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas, 17(3), 199-205, 2012. ISSN: 1665-7330
32. PRIETO, Judith, et al. Contaminación Y Fitotoxicidad En Plantas Por Metales Pesados Provenientes De Suelos Y Agua. Revista Tropical and Subtropical Agroecosystems, 10, 29-44. 2009. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/939/93911243003.pdf>

33. REYES, Yulieth, et al. Heavy metals contamination: implications for health and food safety. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66-77, 2016. ISSN: 2422-4324
34. SANTOS, Ofelia, HIDALGO, Cristian Y ARREAGA, Carlos. *Técnicas y Métodos Cualitativos para la Investigación Científica. La etapa final del análisis y la redacción del informe de investigación cualitativo*. 1era Edición. Ecuador: Editorial UTMACH, 2018. 104 pp. ISBN: 978-9942-24-092-7
35. SAYADI, Mohammad Hossein, RASHKI, Omolbanin y SHAHRI, Elham, 2019. Application of modified *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* powder on the adsorption of heavy metals from aqueous solutions. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 1 junio 2019. Vol. 7, no. 3, p. 103169. DOI 10.1016/j.jece.2019.103169.
36. SHEN, Ying, et al. 2017. Microalgal-biochar immobilized complex: A novel efficient biosorbent for cadmium removal from aqueous solution. *Bioresource Technology*. 1 noviembre 2017. Vol. 244, p. 1031-1038. DOI 10.1016/j.biortech.2017.08.085.
37. SUN, Ruixue, et al. Cadmium resistance mechanisms of a functional strain *Enterobacter* sp. DNB-S2, isolated from black soil in Northeast China. *Environmental Pollution*. 1 agosto 2020. Vol. 263, p. 114612. DOI 10.1016/j.envpol.2020.114612.
38. VALERA Margarita y VIVES Tania. Autenticidad y calidad en la investigación educativa cualitativa: multivocalidad. *Investigaciones en Educación Médica*, 5(19), 191-198, 2016. ISSN 2007-865X

39. VENDRUSCOLO, Francielo, DA ROCHA, Glalber Luiz y ANTONIOSI, Nelson Roberto, 2017. Biosorption of hexavalent chromium by microorganisms. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 1 abril 2017. Vol. 119, p. 87-95. DOI 10.1016/j.ibiod.2016.10.008.

40. WU, Minxi, et al. 2017. Decontamination of multiple heavy metals-containing effluents through microbial biotechnology. *Journal of Hazardous Materials*. 5 septiembre 2017. Vol. 337, p. 189-197. DOI 10.1016/j.jhazmat.2017.05.006.

41. XU, Shaozu, et al. Characterization of Cd²⁺ biosorption by *Pseudomonas* sp. strain 375, a novel biosorbent isolated from soil polluted with heavy metals in Southern China. *Chemosphere*. 1 febrero 2020. Vol. 240, p. 124893. DOI 10.1016/j.chemosphere.2019.124893.

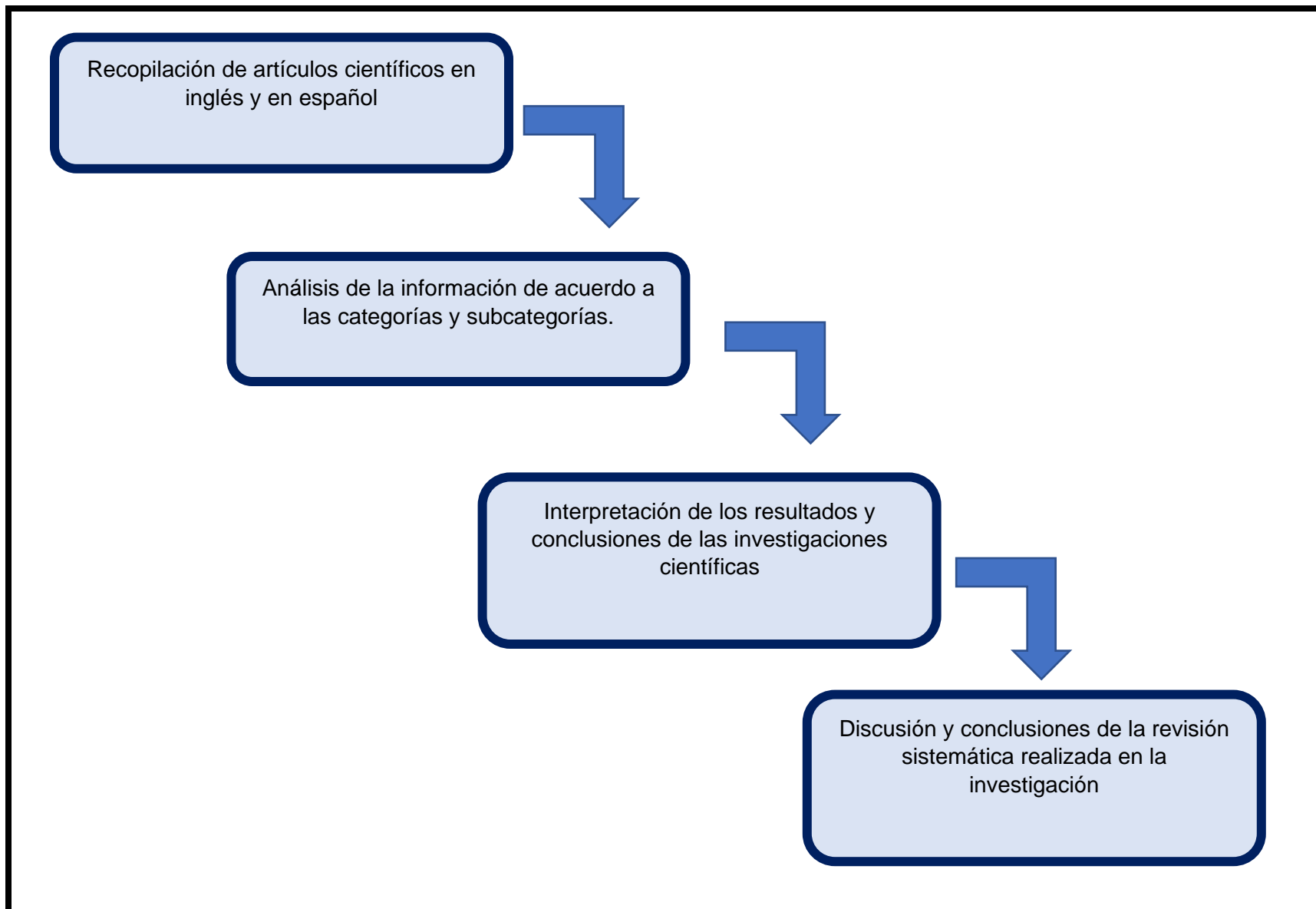
ANEXOS

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de operacionalización de variables

Problema General	Objetivo General	Objetivos Específicos	Problemas Específicos	Categorías	Subcategorías	Unidad de Análisis
¿Cuáles son los aspectos más relevantes del proceso de bioadsorción de Metales Pesados por medio de microorganismos en efluentes industriales contaminados?	Analizar los aspectos más relevantes del proceso de bioadsorción de Metales Pesados por medio de microorganismos en efluentes industriales contaminados	Identificar los tipos de microorganismos utilizados en el proceso de bioadsorción de metales en efluentes contaminados	¿Cuáles son los tipos de microorganismos utilizados en el proceso de bioadsorción de metales en efluentes contaminados?	Tipo de Bioadsorbente	SubC1.1 Bacterias	Wu et al. 2017; Xu et al. 2020; Choińska-Pulita et al. 2018; Ezziat et al. 2019; Azizi et al. 2016; Sun et al. 2020
					SubC1.2 Vibriones	Migahed et al. 2016
					SubC1.3 Pseudomonas	Nakkeeran et al, 2017
					SubC1.4 Formación Mixta	Husien et al, 2019
		Identificar los tipos de metales adsorbidos en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes contaminados	¿Cuáles son los tipos de metales adsorbidos en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes contaminados?	Tipos de Metales	Cr +6	Li et al, 2017
					Cu+2	El-Naggar et al ,2020
					Cd+2	Passos Galluzz et al, 2019
					Pb+2	Nakkeeran et al, 2017
		Identificar las condiciones de absorción en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes contaminados	¿Cuáles son las condiciones de absorción identificadas en el proceso de bioadsorción por medio de microorganismos en efluentes contaminados?	Condiciones de Absorción	SubC3.1 temperatura	Cai et al. 2016
					SubC3.2 pH	Ahmad et al, 2019
					SubC4.1 Condiciones Iniciales	Lin et al, 2020
					SubC4.2 condiciones de sustrato	Husien et al, 2019
					SubC4.3 Contacto (exposición)	Li et al, 2019
SubC4.4 Capacidad de Retención	Sayadi et al, 2019					
SubC4.5 Tiempo de concentración	Shen et al, 2017					
SubC4.6 Isotermas de Absorción	El-Naggar et al ,2020					

Anexo 3: Diagrama de flujo del procedimiento de investigación





UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

Declaratoria de Autenticidad del Asesor

Yo, RITA JAQUELINE CABELLO TORRES, docente de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA y Escuela Profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO, asesor(a) del Trabajo de Investigación / Tesis titulada: " Bioadsorción de Metales Pesados por Medio de Microorganismos en Efluentes Industriales Contaminados. Revisión sistemática 2021", de la autora KLEYDI DANIXA GALA PALOMINO, constato que la investigación cumple con el índice de similitud establecido, y verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin, el cual ha sido realizado sin filtros, ni exclusiones, obteniendo un porcentaje de 26%

He revisado dicho reporte y concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la Tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas por la Universidad César Vallejo.

En tal sentido asumo la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Lima, de junio de 2021

Apellidos y Nombres del Asesor:	Firma
CABELLO TORRES RITA JAQUELINE DNI: 08947396 ORCID: 0000-0002-9965-9678	