



**UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO**

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

**Revisión Sistemática: Bioacumulación de Iones Metálicos con  
Microalgas Marinas para la Descontaminación en Efluentes de  
Aguas Residuales**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTORES:**

Payano Leon, Jhohan Andrew (ORCID: 0000-0002-2596-9753)  
Quevedo Bellido, Yahir Anderson (ORCID: 0000-0002-3773-5794)

**ASESOR:**

Dr. Túllume Chavesta, Milton César (ORCID: 0000-0002-0432-2459)

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

LIMA – PERÚ

2021

## **DEDICATORIA**

Dedico con todo mi corazón mi tesis a mis abuelos y padres, pues sin ellos no lo había logrado. Tu bendición a diario a lo largo de mi vida me protege y me lleva por el camino del bien. Por eso te doy mi trabajo en ofrenda por tu paciencia y amor a mis abuelos y padres.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a mis abuelos y padres, personas quienes se han esforzado en ayudarme en el desarrollo de esta tesis.

No ha sido sencillo el proceso de la tesis, pero gracias a las ganas, perseverancia y dedicación; se ha logrado culminar con excelencia en el desarrollo de esta tesis.

## ÍNDICE DEL CONTENIDO

CARÁTULA .....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	v
ÍNDICE DE GRÁFICOS .....	v
RESUMEN .....	vi
ABSTRACT .....	vii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	16
3.1. Tipo y diseño de investigación .....	16
3.2. Categoría, subcategoría y matriz de categorización .....	16
3.3. Escenario de estudio.....	18
3.4. Participantes .....	18
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	18
3.6. Procedimiento .....	18
3.7. Rigor científico .....	20
3.8. Método de análisis de información.....	21
3.9. Aspectos éticos .....	21
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	22
V. CONCLUSIONES .....	31
VI. RECOMENDACIONES.....	31
REFERENCIAS.....	33
ANEXOS	

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Níquel, cobre, hierro, oro, paladio, platino y rodio: distribución, uso y solubilidad de compuestos simples</i>	5
<i>Tabla 2. Matriz de categorización apriorística</i>	17
<i>Tabla 3. Microalgas más bioacumuladoras de iones metálicos</i>	22

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Proceso de bioadsorción de iones metálicos de efluentes de aguas residuales empleando microalgas marinas bioacumuladora</i>	7
<i>Figura 2. Micrografías de microalgas verdes bioacumuladoras de iones metálicos en aguas residuales</i>	8
<i>Figura 3. Mecanismos que influyen en la biosorción de iones metálicos en las microalgas marinas</i>	10

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<i>Gráfico 1. Procedimiento de recolección de datos</i>	19
<i>Gráfico 2. Microalgas marinas bioacumuladoras con mayor porcentaje de remoción</i>	25
<i>Gráfico 3. Microalgas marinas</i>	27
<i>Gráfico 4. Mecanismo de biosorción de iones metálicos en efluentes de aguas residuales empleando microalgas bioacumuladoras</i>	29

## RESUMEN

En el presente estudio se planteó el objetivo de conocer cuáles son las microalgas marinas bioacumuladoras de iones metálicos en efluentes de aguas residuales; presentando una metodología aplicada de diseño narrativo de tópico, para lo cual permitió realizar una clasificación de 85 literaturas actualizadas a nivel mundial, quedando seleccionadas 20 artículos científicos que cumplían con los diversos criterios de selección, mostrando los siguientes resultados:

Las microalgas marinas más bioacumuladoras de iones metálicos que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales son las pertenecientes al orden *Chlorellales*, presentando un porcentaje de remoción de 90 a 100%; además es el orden más usado por los investigadores, siendo empleado por un 43% de los investigadores; seguido de ellos se encuentra el orden Chlorococcales con un 24% de artículos empleados y un promedio de remoción del 70 al 80%. La bioacumulación más de los niveles de concentración de iones metálicos en algas marinas son los iones metálicos cadmio (Cd) y cromo (Cr), siendo el Cd el metal que presentó un promedio de adsorción del 80 al 90%, mientras que el Cr un 90 a 95%. Por último, el mecanismo de biosorción de iones metálicos que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales se pueden dar mediante los mecanismos de eliminación intracelular como extracelular para la adsorción de iones metálicos y estos mecanismos se clasifican según la dependencia del metabolismo celular o la ubicación dentro de la célula donde se elimina el metal, que se divide en tres tipos: acumulación / precipitación extracelular, precipitación / sorción en la superficie celular y acumulación intracelular.

**Palabras clave:** Microalgas marinas, bioacumulación, iones de metal, aguas residuales, efluentes, adsorción, polución.

## ABSTRACT

The objective of this study was to determine which marine microalgae bioaccumulate metal ions in wastewater effluents; presenting an applied methodology of topical narrative design, for which a classification of 85 updated literatures worldwide was made, and 20 scientific articles that met the various selection criteria were selected, showing the following results:

The marine microalgae that most bioaccumulate metal ions that influence the decontamination of wastewater effluents are those belonging to the order *Chlorellales*, presenting a removal percentage of 90 to 100%; it is also the order most used by researchers, being employed by 43% of the researchers; followed by the order Chlorococcales with 24% of items used and an average removal rate of 70 to 80%. The most bioaccumulative metal ion concentration levels in marine algae are cadmium (Cd) and chromium (Cr) metal ions, being Cd the metal that presented an average adsorption of 80 to 90%, while Cr an average of 90 to 95%. Finally, the mechanism of biosorption of metal ions that influence the decontamination of wastewater effluents can occur through intracellular and extracellular removal mechanisms for the adsorption of metal ions and these mechanisms are classified according to the dependence of cell metabolism or location within the cell where the metal is removed, which is divided into three types: accumulation / extracellular precipitation, precipitation / sorption on the cell surface and intracellular accumulation.

**Keywords:** Marine microalgae, bioaccumulation, metal ions, wastewater, effluents, adsorption, pollution

# I. INTRODUCCIÓN

La industrialización, la urbanización y el desarrollo tecnológico dan lugar a la generación de la compleja y tóxica contaminación (Soldner Christian S. et al., 2020, p.1). Los contaminantes tóxicos como los metales pesados, los hidrocarburos y los productos químicos pueden entrar en el medio ambiente por su liberación directa o indirecta desde la industria, los residuos municipales y la agricultura (Mustafa Shazia et al., 2021, p.1).

La rápida industrialización y la urbanización han dado lugar a la liberación de una gran cantidad de sustancias químicas peligrosas en el medio ambiente a través de los efluentes acuosos, lo que ha provocado la destrucción de los ecosistemas y la salud humana (Thasneema L. et al., 2021, p.1). Las elevadas emisiones de metales pesados no biodegradables como el arsénico, el cromo, el cadmio, el cobre, el zinc, el plomo y el mercurio, los tintes textiles tóxicos y los compuestos fenólicos nocivos provocan problemas tanto medioambientales como económicos (Archana V. et al., 2016, p.2).

Debido a su alta toxicidad, los iones de metales pesados en el agua representan un gran riesgo para el sistema biológico (Agasti Nityananda, 2021, p.1).

Estos contaminantes provocan la pérdida de diversidad en el ecosistema, así como un aumento de las toxinas en la cadena alimentaria humana (Rao Zhuang et al., 2017, p.1). La alteración del medio ambiente degrada la calidad de vida y provoca numerosas enfermedades (Wang Luyum et al., 2019, p.1).

Para la eliminación de estos contaminantes se han desarrollado diferentes enfoques como la evaporación, la precipitación, el intercambio de iones, la degradación aeróbica avanzada, la oxidación biológica, los procesos de oxidación, la ozonización, la coagulación, la filtración por membrana, la extracción en fase sólida, la nanofiltración, la degradación fotocatalítica y la degradación electroquímica (Dolatabidi Maryam et al., 2020, p.2). Sin embargo, estos métodos tienen algunas desventajas como la generación de lodos tóxicos u otros productos de desecho, la eliminación incompleta de los metales, los altos requerimientos de reactivos y de energía (Hamilton Amachree A., Iroha N., 2020, p.3).

La biorremediación ha surgido como un sustituto ecológico del proceso de tratamiento de aguas residuales (Jennifer Enyadike et al., 2019, p.1). En este caso la biorremediación, se utilizan microorganismos para eliminar o metabolizar las sustancias tóxicas y convertirlas en elementos no tóxicos, que sería una alternativa rentable y eficaz a los enfoques convencionales (Alkherraz Abdulfattah et al., 2020, p.2).

El uso de hongos, bacterias y microalgas ha demostrado ser eficaz en la biorremediación de aguas residuales (Benabdallah N. et al., 2017, p.1). En este sentido, se cree que las microalgas son un candidato potencial para la eliminación de sustancias tóxicas porque pueden eliminar eficazmente las sustancias tóxicas del entorno a través de sus diversas formas de nutrición, es decir, heterotrofia, mixotrofia y fototrofia (Aslam Ambreen et al., 2018, p.2).

Las microalgas convierten estos elementos tóxicos en un nivel considerable por acumulación, adsorción y metabolización (Elleuch Jihen et al., 2021, p.1). Del mismo modo, la capacidad única de las microalgas para realizar la fotosíntesis y utilizar sustratos de carbono en comparación con otros organismos se denomina fitorremediación (Hussain Fida et al., 2021, p.1).

Estas microalgas pueden reducir la cantidad de CO<sub>2</sub> de la atmósfera gracias a su capacidad fotosintética y su biofijación de CO<sub>2</sub>. Además, las microalgas pueden reproducirse en las aguas residuales utilizando micronutrientes ya presentes en ellas (Hussain Fida et al., 2017, p.2).

Frente a la realidad problemática se plantea el problema general: ¿Cómo la bioacumulación de iones metálicos con microalgas marinas influye en la descontaminación de efluentes de aguas residuales? como problemas específicos se tiene:

PE1: ¿Cuáles son las microalgas marinas más bioacumuladoras de iones metálicos que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales?

PE2: ¿De qué manera los niveles de concentración de iones metálicos en algas marinas influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales?

PE3: ¿Cuáles son los mecanismos de biosorción de iones metálicos que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales?

De igual. como objetivo general: Determinar si la bioacumulación de iones metálicos con microalgas marinas mejora en la descontaminación de efluentes de aguas residuales; y como objetivos específicos:

OE1: Identificar las microalgas marinas más bioacumuladoras de iones metálicos que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales.

OE2: Analizar los niveles de concentración de iones metálicos en algas marinas que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales.

OE3: Establecer los mecanismos de biosorción de iones metálicos que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales.

El presente estudio presenta una justificación teórica, porque se busca dar a conocer cuáles son las microalgas marinas bioacumuladoras de la contaminación de efluentes de aguas residuales con iones metálicos, dando a conocer a los lectores el poder de las microalgas marinas y su efectividad como un método de remediación eficaz y económicamente viable. Todo ello, usando un conglomerado de literaturas actualizadas de diversas fuentes de datos a nivel nacional e internacional, enfocando el estudio a los futuros investigadores para ampliar sus conocimientos y despertar el interés acerca de la aplicación de las microalgas marinas bioacumuladoras.

## II. MARCO TEÓRICO

Uno de los problemas ambientales más preocupantes en la actualidad es la contaminación de los distintos elementos ambientales (aire, suelo y agua) que induce amenazas ecológicas y para la salud humana debido a la divulgación de iones metálicos tóxicos (Gonsalvesh L. et al., 2016, p.2).

Los desarrollos tecnológicos han seguido el aumento de la afluencia de tóxicos a la atmósfera en las últimas décadas. Entre ellas destaca la contaminación del agua por especies metálicas (Fontana Klaiani B. et al., 2016, p.3). Los contaminantes procedentes de metales tóxicos son de naturaleza no degradable, son persistentes en el medio ambiente, presentan un alto potencial de dispersión en el agua y niveles de bioacumulación sustanciales en plantas y peces (Duan Chengyu et al., 2020, p.4).

La densidad ( $>5 \text{ g cm}^3$ ) es el criterio más utilizado para clasificar los metales como pesados. Debido a su toxicidad, se reconocen y se tienen en cuenta los metales pesados, es decir, el cadmio, el mercurio, el plomo, el arsénico, el manganeso, el cromo, el cobalto, el níquel, el cobre, el zinc, el selenio, la plata, el antimonio y el talio (Ali Hazrat y Khan E., 2018, p.4).

De los diversos iones metálicos presentes en las aguas residuales el hierro es el más abundante y su producción anual se acerca a los tres mil millones de toneladas (Blaby H. et al., 2019, p.2). El oro, el paladio, el platino y el rodio son elementos significativamente más raros y su producción varía de 30 a 3000 toneladas por año (Landin Sandoval V. et al., 2020, p.2). Como se observa en la Tabla N°1.

Tabla N°1: Níquel, cobre, hierro, oro, paladio, platino y rodio: distribución, uso y solubilidad de compuestos simples

Metal	Distribución en la corteza terrestre / agua de mar, ppm	Producción mundial, toneladas por año (a 2015)	Uso	Solubilidad de compuestos simples g / 100 g de agua
<b>Ni</b>	80 / $1-6 \times 10^{-4}$	$2,5 \times 10^6$	<b>Producción de acero, aleaciones metálicas</b> , joyería, electrólisis, baterías, electrodomésticos, soldadura, industria química	Ni (OAc) <sub>2</sub> ~ 4 H <sub>2</sub> O, 17 (20 ° C); NiCl <sub>2</sub> · 6 H <sub>2</sub> O, 39,6 (25°C); NiCl <sub>2</sub> · 2 H <sub>2</sub> O, 254 (20°C); NiO, 50 (25 ° C); NiSO <sub>4</sub> · 6 H <sub>2</sub> O, 40,8 (25°C); NiCO <sub>3</sub> , 0,0093 (25 ° C); Ni <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 8 H <sub>2</sub> O, insoluble; Ni <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , insoluble
<b>Cu</b>	50 / $0,8-2,8 \times 10^{-4}$	$18,7 \times 10^6$	<b>Conductores eléctricos y térmicos, materiales industriales</b> , industria química	Cu (OAc) <sub>2</sub> , se hidroliza rápidamente para formar Cu <sub>2</sub> O; CuCl <sub>2</sub> , ligeramente soluble; Cu <sub>2</sub> O, insoluble; Cu (OAc) <sub>2</sub> · H <sub>2</sub> O, soluble; Cu (acac) <sub>2</sub> , ligeramente soluble; CuCl <sub>2</sub> · 2 H <sub>2</sub> O, 43,8 (25°C); Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6 H <sub>2</sub> O, 60,1 (25 ° C); CuSO <sub>4</sub> · 5 H <sub>2</sub> O, 18,4 (25°C); CuCO <sub>3</sub> , insoluble; Cu <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , insoluble; Cu (OH) <sub>2</sub> , insoluble
<b>Fe</b>	$41 \times 10^{-3}$ / $0,1-4 \times 10^{-4}$	$3,3 \times 10^9$	<b>Metalurgia, construcción</b> , muchas aplicaciones industriales y tecnológicas.	Fe (OAc) <sub>2</sub> ~ 4 H <sub>2</sub> O, soluble; Fe (acac) <sub>2</sub> , ligeramente soluble; FeCl <sub>2</sub> · 6 H <sub>2</sub> O, 39,4 (25°C); Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6 H <sub>2</sub> O, 134 (10 ° C); FeSO <sub>4</sub> · 7 H <sub>2</sub> O, 22,8 (25°C); FePO <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O, insoluble; FeCO <sub>3</sub> , 0,0067 (25 ° C); FeO, insoluble; Fe (OH) <sub>2</sub> , 0,00015 (18°C); FeCl <sub>3</sub> · 6 H <sub>2</sub> O, 74,4 (0°C); FeCl <sub>3</sub> · 3 H <sub>2</sub> O, 92 (20°C); Fe(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> · 9 H <sub>2</sub> O, 137,7 (20 ° C); Fe <sub>2</sub> (TAN <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> , lentamente soluble con hidrólisis; Fe <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> · 8 H <sub>2</sub> O, insoluble; Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , insoluble; Fe (OH) <sub>3</sub> , insoluble
<b>Au</b>	$1,1 \times 10^{-3}$ / $1 \times 10^{-5}$	3000	Joyería, odontología, electrodomésticos, medicina.	AuCl <sub>3</sub> , insoluble; AuCl <sub>3</sub> · 2 H <sub>2</sub> O, soluble; Au <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , insoluble; Au (OH) <sub>3</sub> , insoluble
<b>Pd</b>	$6 \times 10^{-4}$ / $1,9-6,8 \times 10^{-8}$	208	<b>Convertidores catalíticos automotrices</b> , aplicaciones técnicas, electrónica, joyería, industria química	Pd (OAc) <sub>2</sub> , insoluble; PdCl <sub>2</sub> · 2 H <sub>2</sub> O, 0,403 (30°C); PdCl <sub>2</sub> · 2 H <sub>2</sub> O, soluble; Pd(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 2 H <sub>2</sub> O, > 1 (30 ° C); <sup>[22]</sup> PdO, insoluble
<b>Pt</b>	$1 \times 10^{-3}$ / $1,1-2,7 \times 10^{-7}$	178	<b>Convertidores catalíticos automotrices</b> , joyería, aplicaciones técnicas, medicamentos contra el cáncer, industria química	PtCl <sub>2</sub> , insoluble; PtCl <sub>4</sub> · 5 H <sub>2</sub> O, soluble; Pt(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> · 6 H <sub>2</sub> O, 0,0141 (30 ° C); Pt(NH <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> Cl <sub>4</sub> · 2 H <sub>2</sub> O, 0,0253 (25°C); PtO, insoluble
<b>Rh</b>	$2 \times 10^{-4}$ / N / A	<30	<b>Convertidores catalíticos automotrices</b> , industria del vidrio, industria química, joyería, aplicaciones técnicas	RhCl <sub>3</sub> , insoluble; RhCl <sub>3</sub> · x H <sub>2</sub> O (x = 3-4), soluble; Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 5 H <sub>2</sub> O, insoluble; Rh (OH) <sub>3</sub> , 0,00001 (30 ° C)

Fuente: Modificado de Egorova Ksenia et al., 2016

De acuerdo con la Tabla N°1, los principales campos de aplicación se muestran en **negrita** y algunos datos corresponden a g en 100 g de solución.

El aumento de las concentraciones de estos iones de metales pesados tiene un efecto negativo en los seres vivos, es decir, en los humanos; se incorporan al organismo a través de procesos fisiológicos como la respiración, la alimentación, la ingesta de líquidos y la absorción cutánea (Dennis Kristine K., et al., 2019, p.3). Los agro-residuos centraron e impresionaron la atención como fuente de bajo coste para la producción de ACs eficaces y alternativa para las industrias a pequeña escala (Diep P. et al., 2018, p.2).

Los metales pesados pueden introducirse en las masas de agua a partir de diferentes efluentes industriales, como la fabricación de metales y dispositivos electrónicos, la minería, el revestimiento de metales y las instalaciones de generación de energía y dispositivos electrónicos, la minería, el chapado de metales y las instalaciones de generación de energía (Filiz Ertugrul et al., 2019, p.3). Alguno de ellos en el agua es extremadamente tóxicos y no son biodegradables (Geva Pola et al., 2016, p.1).

Una vez que entran en la cadena alimentaria tienen la capacidad de acumularse a baja concentración en los organismos vivos, con el potencial de causar efectos adversos como daños en el sistema nervioso, insuficiencia renal y cáncer (Tomás Giner et al., 2018, p.6). Los metales pesados pueden unirse fácilmente a las proteínas, los ácidos nucleicos y los pequeños metabolitos de los organismos vivos, lo que provoca una alteración o pérdida de la función biológica y/o perturbación del sitio de control del metal en el organismo (Grzegorzolka J. et al., 2019, p.3).

De este modo, su paso a las poblaciones humanas a través de la cadena alimentaria supone verdaderas amenazas, por lo que hoy en día son de gran importancia los trabajos científico-técnicos encaminados a buscar soluciones a esta cuestión (Gutiérrez J. et al., 2016, p.2).

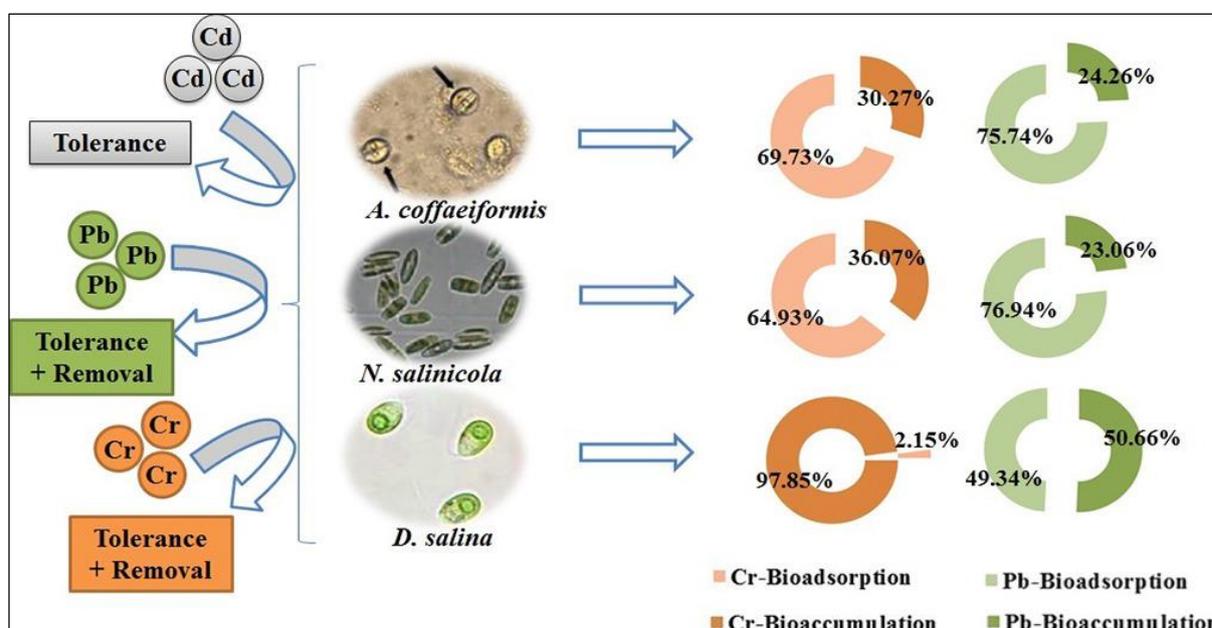
Existen numerosas tecnologías convencionales para eliminar el Cr, Pb y Cd de las aguas residuales contaminadas, como la precipitación química flotación, adsorción, intercambio iónico, coagulación/floculación, electrodiálisis, filtración por membrana, fotocatalisis y tratamiento electroquímico (Almomani Fares et al., 2020, p.4). Sin

embargo, estos métodos tienen algunas desventajas, como un proceso de tratamiento incompleto, la necesidad de equipos costosos, los elevados requisitos de mano de obra y supervisión (Ibuot Aniefone t al., 2017, p.2). Así también, son tecnologías que a menudo son inadecuadas para las aplicaciones prácticas, debido a su baja eficiencia, el elevado equipamiento necesario y los costes de depreciación (Jaafari J. et al., 2019, p.1).

La necesidad de reactivos químicos y la generación de lodos o residuos sólidos que requieren una eliminación posterior, además, estos procesos no han logrado satisfacer la demanda de recursos hídricos, ya que no son aplicables a grandes volúmenes (Jafarian V. et al., 2017, p.4).

Por lo tanto, el desarrollo de nuevas tecnologías de bajo costo y procesos ecológicos para los tratamientos de aguas contaminadas con oligoelementos son de gran interés (Jalmi Siddhi et al., 2018, p.1). Recientemente, los microorganismos han sido considerados como tecnologías alternativas innovadoras para la eliminación de contaminantes metálicos de sistemas acuosos. Como se observa en la Figura N°1.

Figura N°1: Proceso de bioadsorción de iones metálicos de efluentes de aguas residuales empleando microalgas marinas bioacumuladoras



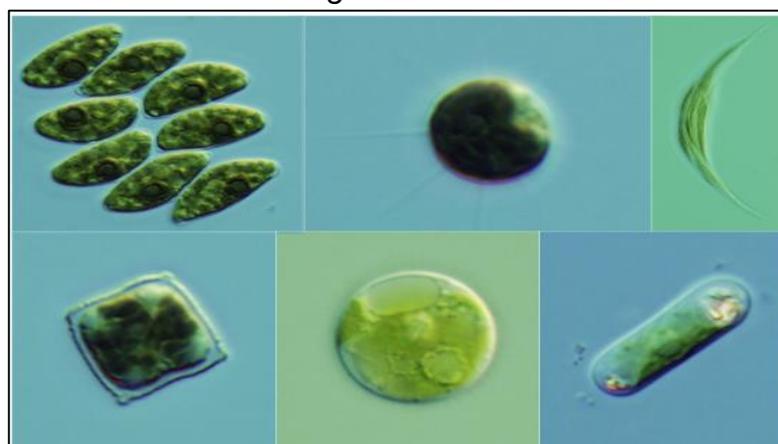
Fuente: Elleuch Jihen et al., 2021

Los bioprocesos para eliminación de metales utilizando biomasa microbiana inmovilizada fueron diseñados ofreciendo la posibilidad de liberación de metales por agentes de desorción (Zeraatkar et al., 2016, p.2). En particular, el uso de microalgas para la biorremediación de aguas residuales podría proporcionar un sistema sostenible de bajo costo que ofrece una eficiente eliminación de oligoelementos, así como la producción de biomasa microalgal para biocombustibles u otras aplicaciones industriales (Kumar et al., 2018; Kumar y Singh, 2020).

El uso de biotecnologías basadas en microalgas se caracteriza por ser un tratamiento autosuficiente ya que estos seres microscópicos son fotosintetizadores y pueden ser mixotróficos; es decir, realizan la fotosíntesis utilizando la luz solar como fuente de energía y la biofijación de CO<sub>2</sub> para su propio desarrollo (Krezel A. y Maret M., 2017, p.3).

Los mecanismos implicados en la eliminación de metales utilizando las células de microalgas no se conocen del todo. Según la ubicación donde se encuentra el metal eliminado, se clasifican en mecanismos dependientes del metabolismo que incluyen la acumulación intracelular y mecanismos no dependientes del metabolismo como la adsorción y la precipitación (Balzano et al., 2020, p.7). La exposición de las microalgas a los metales podría provocar varias vías metabólicas; de hecho, las síntesis de moléculas antioxidantes de metales se consideran entre los principales procesos de defensa implementados por las células vivas (Balzano Sergio et al., 2020, p.124).

*Figura N°2: Micrografías de microalgas verdes bioacumuladoras de iones metálicos en aguas residuales*



*Fuente: Heimann K. y Huerlimann R., 2016*

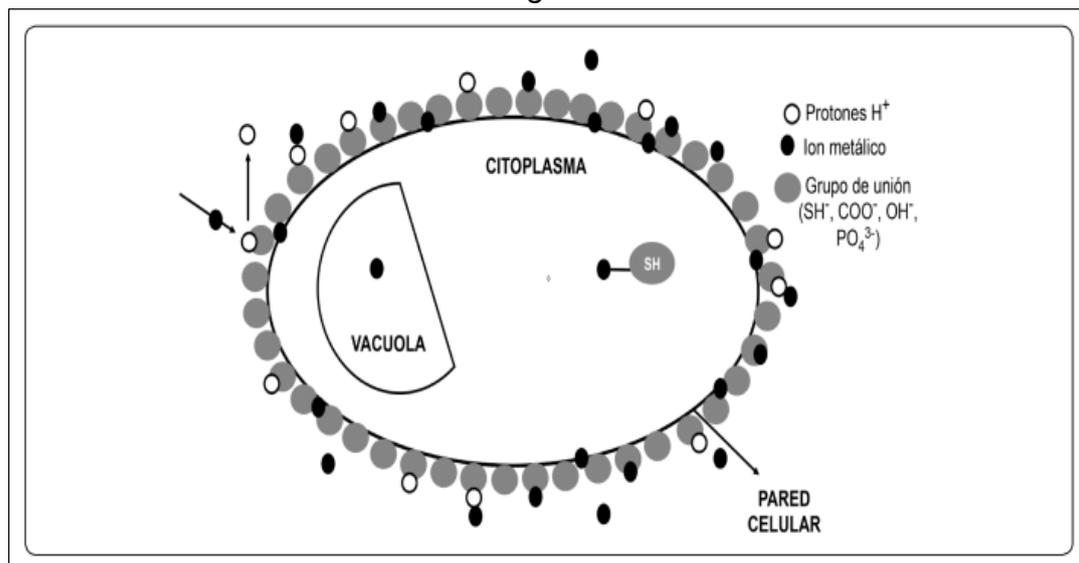
De acuerdo con la figura N°2, se muestra las micrografías de microalgas verdes de agua dulce que crecen en aguas residuales para su biorremediación. De izquierda a derecha, arriba: *Scenedesmus obliquus*, *Franceia sp.*, *Ankistrodesmus sp.*; abajo: *Tetraedron sp.*, *Chlorella sp.*, *Mesotaenium sp.*

Estas microalgas se vienen utilizando para la remediación de aguas residuales que contienen altas cargas de iones metálicos, como el níquel de la minería y la metalurgia, el acero inoxidable, la galvanoplastia y las aguas residuales de la fabricación de baterías y acumuladores (Mondal M. et al., 2019, p.7).

Las microalgas eucariotas están presentes en seis supergrupos diferentes (*Archaeplastida*, *Hacrobia*, *Rhizaria*, *Excavata*, *Alveolata* y *Heterokontophyta*), lo que resulta en una diversidad genética mucho mayor que las plantas terrestres (*Archaeplastida*) o los hongos y animales (*Opisthokonta*) (Capacoila C., 2020, p.3). Esto conduce a una mayor diversidad de metabolitos primarios y secundarios, incluidos ligandos orgánicos y proteínas de unión a metales para microalgas, dado que la mayoría de los estudios se centran en plantas, animales, levaduras y bacterias, una proporción significativa de metabolitos de microalgas se desconoce o no se caracteriza hasta la fecha (Yan Chincheng et al., 2021, p.3).

Por lo tanto, es probable que muchos ligandos orgánicos y proteínas de unión a metales de microalgas sean desconocidos, y algunos de ellos podrían resultar útiles para la fitorremediación u otras aplicaciones biotecnológicas (Ummalya S. y Singh A., 2021, p.3). La diversidad genética, enzimática y química mucho mayor que se encuentra en las microalgas, junto con la capacidad de las microalgas para crecer con luz solar y nutrientes inorgánicos, hace que los microorganismos fotosintéticos sean los mejores candidatos para aplicaciones biotecnológicas y remediación de HM (Zeraatkar Amin K. et al., 2016, p.5). Los diversos factores como las propiedades de las microalgas que influyen para que ocurra una correcta adsorción de los iones metálicos se muestra en la figura N°3.

Figura N°3: Mecanismos que influyen en la biosorción de iones metálicos en las microalgas marinas



Fuente: Cortés Téllez A., et al., 2018

Es así que estos consorcios de microalgas nativas son estables y competentes para aplicaciones de remediación de aguas residuales ricas en nutrientes y metales (Abu Ghosh et al., 2016, p.358).

También, la biomasa de microalgas oleaginosas están reconocidas como una materia prima potencial para la producción de biocombustibles (Wei R. et al., 2020, p.4). A pesar de sus muchas ventajas, la comercialización de biocombustibles de algas se enfrenta a enormes retos debido a sus elevados costes de procesamiento y a sus necesidades energéticas (Pérez Bou et al., 2018, p.2).

Alrededor del 70% de la biomasa total de las algas queda como biomasa desgrasada (DAB) tras la extracción de lípidos con fines de biocombustible (Bou Lizandra P. et al., 2018, p.1). Una utilización económica adecuada de la biomasa algal desgrasada (DAB) puede mejorar la economía general del proceso de producción de biocombustible de algas (Leiva Colos J., 2020, p.3).

Puede utilizarse como suplemento alimenticio alternativo para el ganado y también para producción de metano mediante digestión anaeróbica. Otra aplicación de valor añadido aplicación del DAB podría ser como adsorbente para la eliminación de metales pesados y colorantes de aguas residuales industriales (Moreno Rivas S. y Ramos C., 2018, p.4).

Así mismo, las microalgas pueden cultivarse en fotobiorreactores, y una de las ventajas es que su biomasa puede ser reutilizada para la generación de valor añadido (Mwandira W. et al., 2020, p.5). Estos microorganismos se han cultivado en fotobiorreactores para investigación desde hace más de 140 años y estos reactores son necesarios porque proporcionan condiciones ambientales adecuadas para que los microorganismos mixotróficos (que realizan la fotosíntesis) sean cultivados para llevar a cabo reacciones fotobiológicas (Li Rui et al., 2019, p.11).

Los fotobiorreactores son esenciales para controlar algunos parámetros, como temperatura, el pH y la luminosidad, ya que influyen en el crecimiento de las microalgas y las actividades metabólicas que dan lugar a la eliminación de ciertos contaminantes con el fin de tratar los efluentes industriales (Olsson Sanna et al., 2017, p.3). Especies de microalgas, como *Chlamydomonas spp.*, *Chlorella spp.*, *Chlorococcum sp.*, *Cylindrotheca sp.*, *Dunaliella sp.*, *Euglena gracilis*, *Scenedesmus obliquus*, y *Selenastrum capricornutum* son investigadas, ya que, han demostrado ser capaz de biodegradar compuestos aromáticos en condiciones heterótrofas; es decir, pueden utilizar el carbono orgánico como fuente de energía (Penen F. et al., 2017, p.4).

Las condiciones de cultivo y el tipo de especies de microalgas a cultivar son factores que determinan la capacidad de crecimiento y eliminación de los iones metálicos (Summermatter S. et al., 2017, p.2). Teniendo en cuenta estos factores, las especies de microalgas marinas como *Nannochloropsis oculata* e *Isochrysis galbana* son capaces de crecer en aguas hipersalinas, como las aguas de producción, eliminando diversos contaminantes (Ammar et al., 2018, p.2).

Los 10 (5 nacionales y 5 internacionales) antecedentes más relevantes acerca de las microalgas marinas bioacumuladoras de iones metálicos se presentan a continuación:

Entre los estudios nacionales tenemos:

Para **Manaya Roger et al., (2020)**, en su estudio, los objetivos de esta investigación fueron cuantificar y evaluar las concentraciones de cobre, plomo y cadmio en tejidos comestibles de *Donax obesulus*. Presentando como metodología; recolectar muestras de *Donax obesulus* en tres playas de la costa de Lambayeque (de sur a norte: Lagunas, San José y El Gigante) entre mayo y julio de 2013. Las muestras fueron sometidas a

una prueba toxicológica mediante espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (OES) (ICP). Obteniendo como resultados que el cobre presentó una clara tendencia acumulativa en *Donax obesulus* con la mayor concentración en la playa de San José en julio ( $10.1 \mu\text{g g}^{-1}$ ). En contraste, las concentraciones de plomo ( $> 0.3 \mu\text{g g}^{-1}$ ) y cadmio ( $> 0.2 \mu\text{g g}^{-1}$ ) fueron escasas en todas las áreas de muestreo durante el tiempo que abarcó la investigación. Concluyendo que la bioacumulación de cobre, plomo y cadmio que se encuentra en *Donax obesulus* podría vulnerar la seguridad alimentaria de sus consumidores.

**Zapata Fernán C. et al., (2017)**, en su estudio presentó como objetivo determinar la bioacumulación de metales pesados Cu, Zn, Fe y Pb en hígados, riñones y músculos de *Oncorhynchus mykiss*. trucha en siete centros de producción de la provincia de Yauli, Junín-Perú. Presentando como metodología de estudio La determinación y cuantificación del total de metales pesados en muestras de agua recolectadas mensualmente en los sitios de producción y en 28 truchas que promediaron  $250 \text{ g}$  y  $27 \text{ cm}$ ; realizando mediante espectrofotometría de absorción atómica, de acuerdo con la metodología recomendada por la FAO. Presentando como resultados que los niveles de Zn, Fe y Pb superan los estándares de calidad ambiental establecidos por el Ministerio de Medio Ambiente del Perú para los ríos de la costa y sierra, así como los estándares de calidad de la Unión Europea para el cultivo de trucha, mientras que el nivel de Cu cumplió con esos estándares. Concluyendo que la correlación entre las concentraciones de cobre, zinc, hierro y plomo en el agua y las concentraciones de estos metales en el hígado, los riñones y los músculos es baja y no significativa, a excepción del cobre, que tuvo una correlación significativa.

**Méndez Ancca Sheda et al. (2020)**, presenta como objetivo determinar la concentración celular y la biomasa seca en tres especies de microalgas marinas: *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis oculata* y *Tetraselmis striata*. Teniendo como metodología, que, las cepas se suministraron por el Laboratorio Costero de Ilo perteneciente al Instituto del Mar del Perú (IMARPE) y luego, se acondicionaron las microalgas para ser cultivadas en medio semicontrolado. Teniendo como resultado, El orden de máxima concentración celular (cel/mL) para las microalgas fue: *Nannochloropsis oculata* > *Chlorella vulgaris* > *Tetraselmis striata* donde *N. oculata* representó 7,63 veces superior a *T. striata*. En el caso de la biomasa, el orden

correspondió a: *C. vulgaris* > *T. striata* > *N. oculata* existiendo 1,32 g de diferencia. Concluyendo que, la especie de microalga *Chlorella vulgaris* indicó la mayor ventaja para usarse en la acuicultura comparativamente con las otras dos especies.

**Iannacone Oliver et al., (2003)**, en su investigación tiene como objetivo La evaluación de Riesgos Ambientales (ERA) por el mercurio en los ambientes marinos requiere del empleo de especies bioindicadoras. Donde se presentó como metodología de investigación, determinar el efecto ecotoxicológico agudo del mercurio ( $Hg^{2+}$ ) sobre larvas de *E. analoga* procedentes de cuatro playas de Lima, Perú: Santa María del Mar, Conchán, El Silencio y Puerto Viejo. Las larvas con menos de 24 h fueron obtenidas de hembras ovígeras en octubre y noviembre de 1999. Se alimentaron con la microalga *Nannochloris sp.* y se evaluaron en agua de mar con luz UV. El Diseño en bloques completamente aleatorizado empleado fue de 6 concentraciones x 4 repeticiones. Donde los resultados dieron; que los parámetros de Concentración de efectos no observables (NOEC) y de Concentración más baja de efectos observables (LOEC) fueron 0,65 mg L<sup>-1</sup> y 1,63 mg L<sup>-1</sup> a 96 h de exposición, respectivamente. Así mismo, no se encontraron diferencias significativas en los valores de CL50 entre las cuatro localidades evaluadas. El coeficiente de variabilidad (CV) para la CL50 fue aceptable (CV48h = 26,51 % y CV96h = 40,94 %). Concluyendo que, los resultados son comparados con otras especies de crustáceos acuáticos al nivel mundial y se analizan las perspectivas del uso de *E. analoga* como organismo bioindicador de toxicidad.

De acuerdo con **Moreno Rivas et al., (2018)**, presenta como objetivo realizar la descontaminación de iones metálicos (arsénico, cadmio y plomo en medio hídrico, en aguas residuales, por biosorción usando *Saccharomyces cerevisiae*; para lo cual realizó como metodología la aplicación de un pH: 20, Metal inicial (mg/L): 6, Concen. De biomasa (g/L): 4, Tiempo (min.): 60, Adsorción máx.: 2.4. Dando como resultados que el método de biosorción con *S. cerevisiae* para la descontaminación de metales pesados es una alternativa prometedora para eliminar bajas concentraciones de As<sup>+3</sup>, As<sup>+5</sup>, Cd<sup>2+</sup> y Pb<sup>2+</sup> en agua para consumo; sin embargo, la mayoría de los progresos actuales se conservan a nivel de laboratorio.

Así mismo, se presentaron 5 antecedentes internacionales:

**Saavedra Ricardo et al., (2018)**, en su estudio presenta como objetivo realizar un estudio comparativo de arsénico, boro, cobre, manganeso y zinc del agua por diferentes microalgas verdes; donde la metodología consiste en representa un estudio comparativo de absorción de los elementos tóxicos arsénico, boro, cobre, manganeso y zinc en soluciones monometálicas y multimetálicas por cuatro especies de microalgas verdes (*Chlamydomonas reinhardtii* , *Chlorella vulgaris* , *Scenedesmus almeriensis* y una *Chlorophyceae spp. Autóctona*), evaluando el efecto. de pH y tiempo de contacto, teniendo un pH óptimo: 9.5, Metal inicial (mg/L): 12, Conc. de biomasa (g/L): 1, Tiempo (min.): 180, Max. Adsorción (mg/g): 5.0. Obteniendo como resultados que las eficiencias máximas de remoción para cada elemento tóxico fueron 99.4% para Mn (*C. vulgaris* , pH 7.0, 3 h), 91.9% para Zn ( *Chlorophyceae spp.*, PH 5.5, 3 h), 88% para Cu ( *Chlorophyceae spp.*, PH 7.0, 10 min), 40.7% para As ( *S. almeriensis* , pH 9.5, 3 h) y 38.6% para B ( *S. almeriensis*, pH 5,5, 10 min).

**Shen Ying et al., (2018)**, presentó como objetivo determinar la mejora de la biorremediación de cadmio mediante un complejo de gránulos derivados del jacinto de agua inmovilizados con *Chlorella sp.*; para o cual presentó como objetivo del estudio realizar un complejo de gránulos derivados del jacinto de agua inmovilizados con *Chlorella sp.* aplicando por primera vez, en la biorremediación de cadmio (Cd); además, la eficiencia de eliminación de Cd (II) del complejo se optimizó investigando varios parámetros, incluidos los materiales del sedimento, la edad del cultivo de algas y la intensidad de la luz. Donde los resultados mostraron que la eficiencia de eliminación de Cd (II) se relacionó positivamente con la eficiencia de inmovilización de algas y la capacidad de bioacumulación de algas. concluyendo que las pruebas de recuperación tanto en células de microalgas como en WLBp demostraron que las células de algas y el sedimento de biocarbón se pueden reciclar y reutilizar de forma económica.

**Nithya L. et al., (2019)**, presentó como objetivo principal utilizar la biomasa de algas de desecho de *Spirulina platensis*. obtenido después de la producción de biodiesel. Teniendo como metodología que las muestras de algas utilizadas en el estudio se sometieron a análisis FTIR, TGA y SEM, respectivamente. Además, mediante EDX se analizan los posibles elementos químicos de las especies de algas antes y después de

que se identificara la extracción de biodiesel. Dando como resultado que la capacidad de adsorción de la biomasa extraída con biodiésel es de 45,5 mg / g para los iones de cromo; además, los estudios de temperatura mostraron que la máxima eficiencia de adsorción se observa a 60 ° C favoreciendo el tipo de adsorción endotérmica y una eficiencia máxima de desorción de 82,5% y 70,4% que se informa para muestras de algas extraídas con algas puras y biodiesel, respectivamente. Concluyendo que los mecanismos de adsorción se interpretaron utilizando modelos isotermos, cinéticos, de difusión y termodinámicos.

**Daneshvar Ehsan et al., (2019)**, en su estudio presenta una comparación exhaustiva del potencial de diferentes materiales basados en microalgas para la eliminación del cromo hexavalente (Cr (VI)) del agua. Donde los resultados de los estudios de columna continuos mostraron que la eficiencia de eliminación de la columna aumentó de 52,33 a 57,58% al aumentar la dosis de adsorbente de 0,125 a 0,200 g. La eficiencia de desorción de Cr (VI) por NaOH 0,1 M se incrementó de 51,16 a 59,41% mediante un baño de sonicación en comparación con un agitador de rodillos. Pudiendo concluir que más del 97% del Cr (VI) desorbido se recuperó en menos de 10 minutos por BaCl<sub>2</sub>, además el estudio muestra que los materiales de microalgas no vivas son más efectivos que las células vivas en la remoción y recuperación de Cr (VI) del agua.

**Suganya S. et al., (2017)**, presenta como objetivo en el presente estudio, la aplicación eficaz de la microalga *Rhizoclonium hookeri* (RH) para eliminar los iones metálicos [Pb (II) y Ni (II)] de la solución acuosa en experimentos de modo de adsorción por lotes. Donde la metodología, señala que el proceso de adsorción se vio influenciado por varios parámetros operativos, como la concentración inicial de iones metálicos, el tiempo de contacto, el pH, el tamaño de las partículas, la dosis de adsorbente y la temperatura. Donde los resultados indican que los datos de adsorción se ajustaron mejor con el modelo de isoterma Sips. En consecuencia, la microalga RH con buena capacidad de adsorción y reutilización podría usarse como un adsorbente eficaz para la adsorción de iones Pb (II) y Ni (II) de las aguas residuales.

### **III. METODOLOGÍA**

#### **3.1. Tipo y diseño de investigación**

El tipo de investigación que presenta este estudio es cualitativa básica ya que, la investigación básica se refiere a las actividades de los científicos que investigan cuestiones teóricas con el fin de generar conocimiento (Hernández, 2014, p.40). Y es usada porque se investigaron, analizaron y recolectaron datos de diversos estudios científicos con el fin de tener un diagnóstico que conduzca a resolver el problema planteado en el presente estudio.

Así también se describe el diseño narrativo de tópico por Veland siri et al., (2018, p.1), señalando que este tipo de diseño presenta principal atención en los participantes y los sucesos presentados; mediante la descripción en forma de historia de los autores. Y es señalado de tópico, ya que se va a centrar en un fenómeno y no solo en un persona o grupo de personas. Este tipo de diseño se aplicada debido a que se pretende estudiar al fenómeno de ocurre cuando se aplica las microalgas marinas bioacumuladoras.

#### **3.2. Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística**

Las categorías planteadas se elaboraron de acuerdo a los objetivos y problemas específicos; sirviendo de línea para la elaboración de las sub categorías, las cuales serán desarrolladas en los resultados. (Ver tabla N°2).

#### **Categorías, subcategorías y matriz de categorización apriorística**

Tabla N°2: Matriz de categorización apriorística

Objetivos específicos	Problemas específicos	Categoría	Subcategoría	Criterio 1	Criterio 2
Identificar las microalgas marinas más bioacumuladoras de iones metálicos que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales.	¿Cuáles son las microalgas marinas más bioacumuladoras de iones metálicos que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales?	Microalgas marinas bioacumuladoras con mayor porcentaje de remoción  (Ummalyma S. y Singh A., 2021, p.3).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Chlamydomonas spp.</i>,</li> <li>• <i>Chlorella spp.</i>,</li> <li>• <i>Chlorococcum sp.</i>,</li> <li>• <i>Cylindrotheca sp.</i>,</li> <li>• <i>Dunaliella sp.</i></li> </ul> (Capacoila C., 2020, p.3).	De acuerdo al ion metal	De acuerdo al porcentaje de eliminación
Analizar los niveles de concentración de iones metálicos en algas marinas que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales.	¿De qué manera los niveles de concentración de iones metálicos en algas marinas influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales?	Bioacumulación más obtenida de iones metálicos  (Leong y Chang, 2020, p.2)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arsénico</li> <li>• Cadmio</li> <li>• Plomo</li> </ul> (Yan Chincheng et al., 2021, p.3).	De acuerdo a la concentración inicial	De acuerdo al tiempo de adsorción
Establecer los mecanismos de biosorción de iones metálicos que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales.	¿Cuáles son los mecanismos de biosorción de iones metálicos que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales?	Mecanismo de biosorción de iones metálicos  (Naveed et al., 2019, p.2).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asociados con el metabolismo</li> <li>• Asociados con el lugar celular donde ocurre la biosorción</li> </ul> (Bou Lizandra P. et al., 2018, p.1).	De acuerdo al metabolismo	De acuerdo a la acumulación intracelular

Elaboración

### **3.3. Escenario de estudio**

El escenario de estudio son todos los laboratorios y lugares de campo donde se llevaron a cabo los análisis de la bioacumulación de iones metálicos, siendo estos detallados en cada una de las investigaciones usadas y extraídas a nivel nacional e internacional, encontradas en diversos idiomas. Los escenarios de estudio presentes en cada una de las investigaciones son artículos científicos indizados de portales web y bibliotecas virtuales, así como páginas institucionales.

### **3.4. Participantes**

Los participantes que involucran este estudio se encuentran de manera virtual, siendo los sitios web como: ScienceDirect, PubMed, Scopus y Scielo los que fueron visitados para la extracción de las literaturas usadas; estas páginas permiten el libre acceso a realizar búsquedas de los estudios pudiendo encontrar una variedad de revistas científicas con una alta calidad.

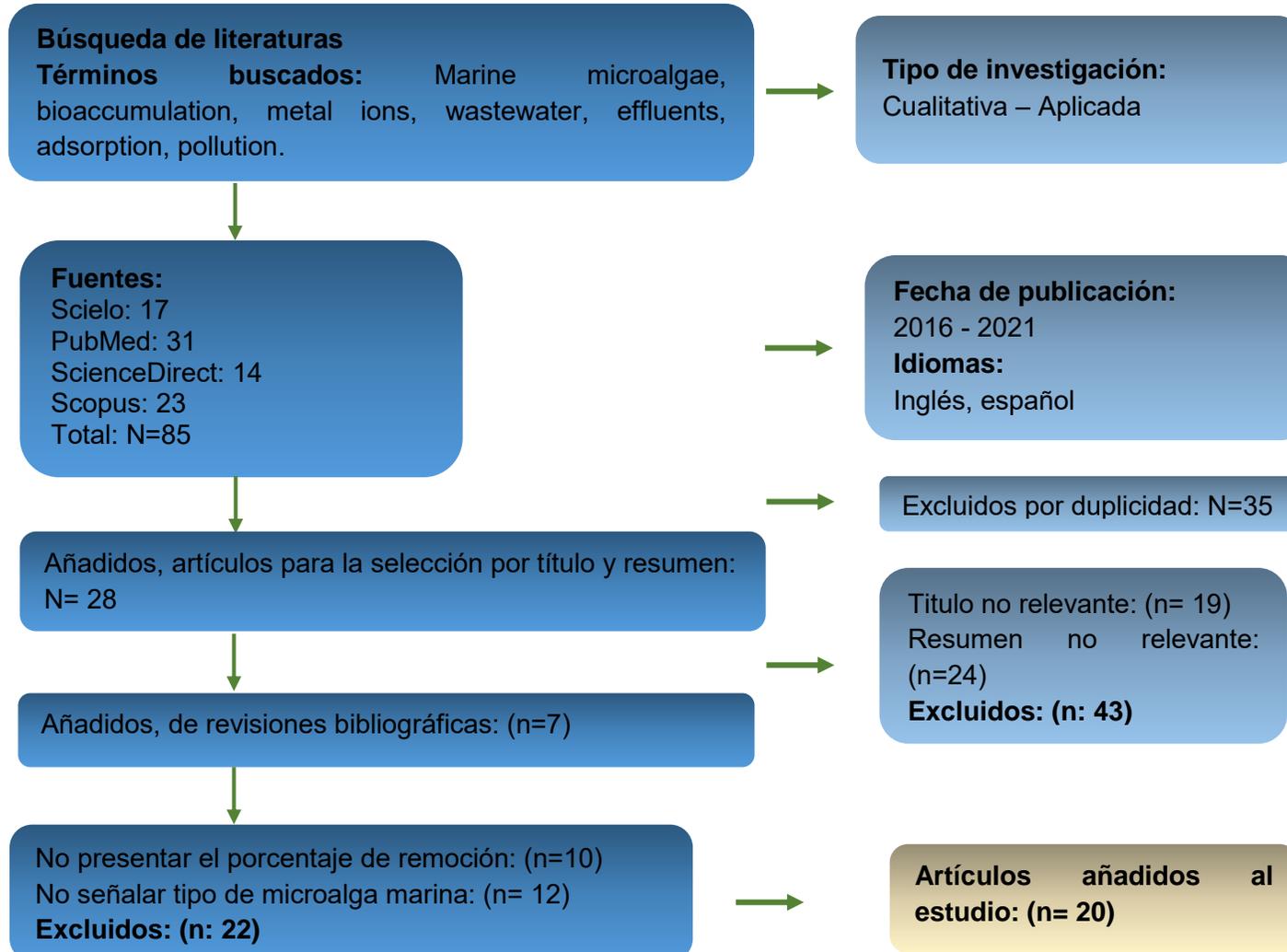
### **3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

La técnica usada es el análisis de contenido, citada por Luna González M. et al., (2015, p.1), como el método en el que a través de la lectura se va a inferir y extraer datos para la recolección de información y debe ser aplicado de manera objetiva y sistemática. Siendo aplicado de la mano con la ficha de análisis; siendo propuesta en este estudio la ficha de análisis de contenido (Ver anexo N°1).

De acuerdo con Vilches Loreno, (2020, p.1), la ficha es un documento que mediante la lectura se plasmarán datos esenciales del documento original, que permitirán obtener una copia de manera sintetizada, clara y de fácil acceso. La ficha propuesta detalla datos de los estudios como: Tipo de investigación, datos de autor, objetivos, resultados, conclusión.

### **3.6. Procedimiento**

Gráfico N°1: Procedimiento de recolección de datos



Elaboración propia

### **3.7. Rigor científico**

La aplicación estricta del método científico para garantizar un diseño experimental, una metodología, un análisis, una interpretación y un informe de resultados sólidos e imparciales (Jiménez María S., 2011, p.14). Esto incluye una total transparencia en la comunicación de los detalles experimentales para que otros puedan reproducir y ampliar los hallazgos (Campbell J., Hindle A. y Stroulia E., 2015, p.141). Debido a ello este estudio cumple con 4 criterios que garantizan el rigor científico de la investigación:

**Credibilidad:** Este criterio se basa en que tan creíbles son los datos brindados, exigiendo que se aplique la fiabilidad y validez del diseño del estudio, así como la metodología, permitiendo asegurar que la información es objetiva y única. Este criterio se consigue dejando la metodología y diseño de cómo se realizó el presente estudio, para que otros investigadores puedan continuar con el aplicándolo a otros contextos.

**Validez:** Este criterio se enfoca en que los investigadores científicos acepten el estudio y lo califiquen como válido y coherente. Este criterio se consigue comparando diversos estudios enfocados en la aplicación de microalgas marinas bioacumuladoras de iones metálicos en efluentes de aguas residuales.

**Auditabilidad:** Este criterio se encuentra enfocado en el poder de los investigadores para continuar con un estudio siguiendo las pistas dejadas, recolectando información como registros de documentos. Este criterio se obtiene mediante el análisis realizado en los diversos estudios y los cuales dan un resultado similar a los de otros investigadores.

**Transferibilidad:** Este criterio es el poder de transferir o traspasar un estudio a otros ámbitos para que otros observadores puedan usarlo. Esto se ha conseguido con los resultados y conclusiones presentadas para resolver la problemática de los iones metálicos en efluentes de aguas residuales y que pueden ser usadas por otros investigadores ya que se dejó la información completa de los estudios usados en las bibliografías para que puedan ser tomados.

### **3.8. Método de análisis de información**

Como método de análisis se tomó a la matriz de categorización, así como otras técnicas; en este instrumento se plantearon las categorías y sub categorías desarrolladas en los resultados para brindar datos específicos y describir con exactitud cada uno de los problemas específicos planteados.

Categorías:

1. Microalgas marinas bioacumuladoras con mayor porcentaje de remoción
2. Bioacumulación más obtenida de iones metálicos
3. Mecanismo de biosorción de iones metálicos

Sub categorías:

•*Chlamydomonas spp.*,

•*Chlorella spp.*,

•*Chlorococcum sp.*,

•*Cylindrotheca sp.*,

•*Dunaliella sp.*

•Arsénico

•Cadmio

•Plomo

•Asociados con el metabolismo

•Asociados con el lugar celular donde ocurre la biosorción

### **3.9. Aspectos éticos**

Este estudio cumplió con los aspectos éticos de la autenticidad, ya que realizó el debido citado de los autores que fueron usados en el estudio, aplicando la Normativa señalada por la UCV en el manual ISO 690 y la Guía de Productos Observables, así también, se pasó por el programa turnitin para comprobar que la información brindada es verídica.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla N° 3: Microalgas más bioacumuladoras de iones metálicos

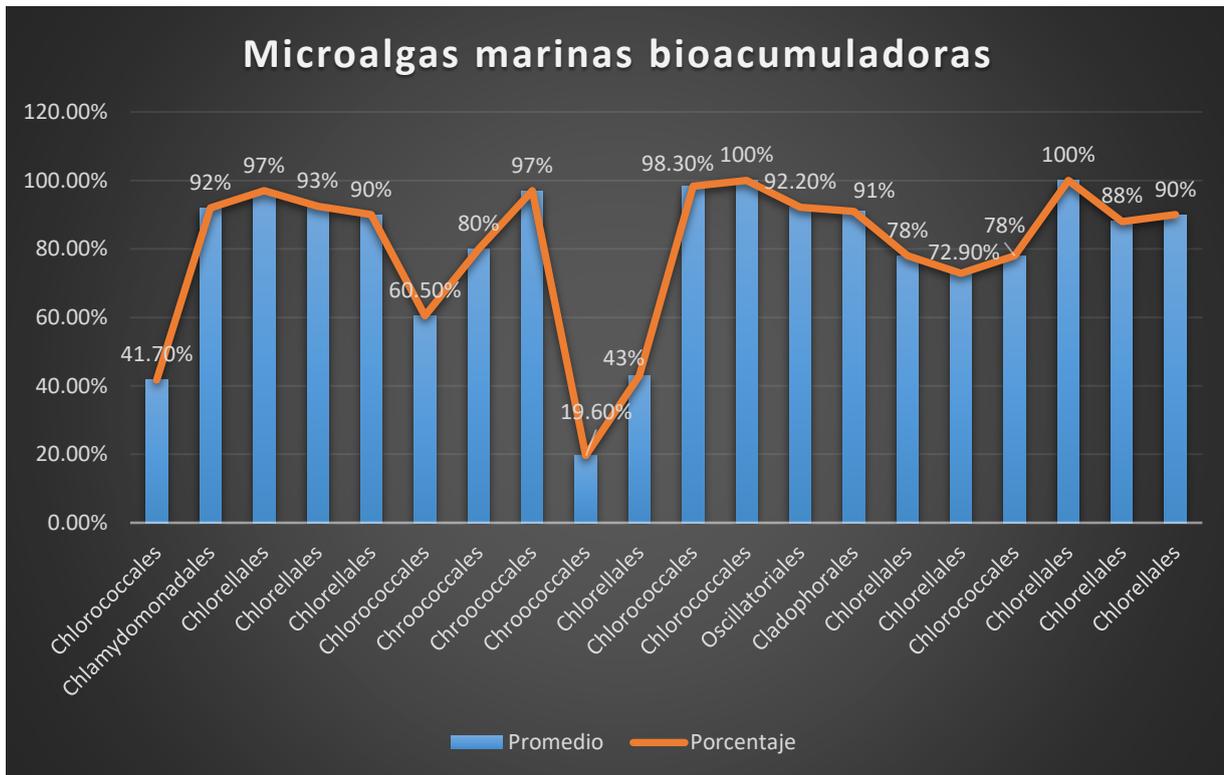
Microalgas marinas	Metal	Concentración inicial de microalga	Tiempo de adsorción	Adsorción máxima	% de remoción	Fuente
<b>Saccharomyces cerevisiae</b>	arsénico, cadmio y plomo en aguas residuales Metal inicial (mg/L): 6	Concen. De biomasa (g/L): 4	Tiempo (min.): 60	pH: 20 Adsorción máx.: 2.4	Eliminación (%) eficiente: 78%	Moreno Rivas et al., 2018
<b>Scenedesmus almeriensis</b>	Arsénico Metal inicial (mg/L): 12	Conc. de biomasa (g/L): 1	Tiempo (min.): 180	pH óptimo: 9.5 Max. Adsorción (mg/g): 5.0	Eliminación (%) eficiente: 41.7	Saavedra Ricardo et al., 2018
<b>Coelastrum sp</b>	Cadmio	Conc. de biomasa (g/L): 1	Tiempo (min): 60	Temp (°C): 30 pH óptimo: 7,5 adsorción máxima (mg/g): 36.1	Eliminación (%) eficiente: 98%	Zheng Heshan et al., 2016
<b>Chlorella minutissima</b>	Cadmio	Conc. de biomasa (g/L): 4	Tiempo (min): 20	Temp (°C): 28 pH óptimo: 6 adsorción máxima (mg/g): 303	Eliminación (%) eficiente: 97%	Yang Jinshui et al., 2016
<b>Chlorella sp inmovilizada</b>	Cadmio Metal inicial (mg/L): 10	Conc. de biomasa (g/L): 1,3	No indica	pH óptimo: 6 adsorción máxima (mg/g): 15,51	Eliminación (%) eficiente: 92,5%	Shen Ying et al., 2018
<b>Parachlorella sp.</b>	Cadmio Metal inicial (mg/L): 100	Conc. de biomasa (g/L): 1	No indica	Temperatura °C: 35 pH óptimo: 7 adsorción máxima (mg/g): 96,2	Eliminación (%) eficiente: 90%	Dirbaz M. y Roosta A., 2018
<b>Scenedesmus-24</b>	Cadmio Metal inicial (mg/L): 200	Conc. de biomasa (g/L): 1,5	No indica	pH óptimo: 6 adsorción máxima (mg/g): 48.4	Eliminación (%) eficiente: 60.5%	Jena Jayashree et al., 2016

<b>Spirulina platensis</b>	Cromo (VI) Metal inicial (mg/L): 500	No indica	Tiempo (min): 90	Temperatura °C: 60 pH óptimo: 1 adsorción máxima (mg/g): 59,6	Eliminación (%) eficiente: 80%	Nithya L. et al., 2019
<b>Spirulina platensis</b>	Cromo (VI) Metal inicial (mg/L): 500	No indica	Tiempo (min): 90	Temperatura °C: 60 pH óptimo: 1 adsorción máxima (mg/g): 45.5	Eliminación (%) eficiente: 97%	
<b>Spirulina platensis inmovilizada</b>	Cromo (VI) Metal inicial (mg/L): 250	Conc. de biomasa (g/L): 1	No indica	Temperatura °C: 25 pH óptimo: 2 adsorción máxima (mg/g): 49	Eliminación (%) eficiente: 96 %	Kwak Hyo et al., 2016
<b>Chlorella vulgaris</b>	Cromo (VI) Metal inicial (mg/L): 147	Conc. de biomasa (g/L): 1	Tiempo (min): 240	Temp (°C): 25 pH óptimo: 2 adsorción máxima (mg/g): 63,2	Eliminación (%) eficiente: 43%	Sibi G., 2016
<b>Scenedesmus quadricauda</b>	Cromo (III) Metal inicial (mg/L): 100	Conc. de biomasa (g/L): 2	Tiempo (min): 120	Temp (°C): 25 pH óptimo: 6	Eliminación (%) eficiente: 98,3 %	Shokri Khoubestani et al., 2016
<b>Scenedesmus quadricauda</b>	Cromo (III) Metal inicial (mg/L): 10	Conc. de biomasa (g/L): 2	Tiempo (min): 240	Temp (°C): 22 pH óptimo: 2	Eliminación (%) eficiente: 100 %	Daneshvar Ehsan et al., 2019
<b>Phormidium sp</b>	Plomo Metal inicial (mg/L): 10	Conc. de biomasa (g/L): 4	Tiempo (min): 40	Temp (°C): 25 pH óptimo: 5 adsorción máxima (mg/g): 2,305	Eliminación (%) eficiente: 92,2 %	Das Debayan et al., 2016
<b>Rhizoclonium hookeri</b>	Plomo (II) Metal inicial (mg/L): 250	No indica	Tiempo (min): 120	Temp (°C): 40 pH óptimo: 4,5 adsorción máxima (mg/g): 81.7	Eliminación (%) eficiente: 99 %	Suganya S. et al., 2017
<b>Chlorella sp</b>	Plomo Metal inicial (mg/L): 20	Conc. de biomasa (g/L): 1,5	Tiempo (min): 180	Temp (°C): 25 pH óptimo: 6 adsorción máxima (mg/g): 10,4	Eliminación (%) eficiente: 78%	Molazadeh Parvin et al., 2016
<b>Chlorella vulgaris</b>	Mercurio (Hg) Metal inicial (mg/L): 48	Conc. de biomasa (g/L): 2	Tiempo (min): 120	Temp (°C): 20 pH óptimo: 5 adsorción máxima (mg/g): 17,49	Eliminación (%) eficiente: 72,9 %	Solisio C. et al., 2019

<b>Scenedesmus obtusus XJ-15</b>	Mercurio Metal inicial (mg/L): 20	Conc. de biomasa (g/L): 0,125	Tiempo (min): 180	Temp (°C): 25 pH óptimo: 5	Eliminación (%) eficiente: 78 %	Huang Rong et al., 2019
<b>Chlorella vulgaris</b>	Nitrógeno Metal inicial (mg/L): 250	Conc. de biomasa (g/L): 0,5	Tiempo 95 horas	Temp (°C): 25 pH óptimo: 6	Eliminación (%) eficiente: T1: 95%	Mujtaba G. y Lee K., 2017
	Fósforo Metal inicial (mg/L): 10	Conc. de biomasa (g/L): 1,0	Tiempo: 36 horas	Temp (°C): 25	Eliminación (%) eficiente: 100%	
<b>Chlorella</b>	Fósforo Metal inicial (mg/L):	Conc. de biomasa (g/L): 5	Tiempo: 11días	Temp (°C): 26 pH óptimo: 6	Eliminación (%) eficiente: 88%	Kumar P. et al., 2019
	Nitrógeno Metal inicial (mg/L):	Conc. de biomasa (g/L): 5	Tiempo: 11días	Temp (°C): 26 pH óptimo: 6	Eliminación (%) eficiente: 67%	
<b>Chlorella pyrenoidosa</b>	Fosfato	Conc. de biomasa (g/L): 0,4		Temp (°C): 25 adsorción máxima (mg/g): 23	Eliminación (%) eficiente: 90%	Gupta Suvidha et al., 2017

***Elaboración propia***

Gráfico N°2: Microalgas marinas bioacumuladoras con mayor porcentaje de remoción



Elaboración propia

De acuerdo al gráfico N°2 respecto a los resultados presentes en la Tabla N° 3 y el Anexo N°3 se tiene que las microalgas marinas más bioacumuladoras de iones metálicos con mayor porcentaje de remoción se encuentran en el orden Chlorellales, presentando un porcentaje de remoción de 90 a 100%; además es el orden más usado por los investigadores, siendo empleado por un 43% de los investigadores; seguido de ellos se encuentra el orden Chlorococcales con un 24% de artículos empleados y un promedio de remoción del 70 al 80%.

Ello es debido a su proceso de autofloculación y que las microalgas han desarrollado un amplio espectro de mecanismos (extracelulares e intracelulares) para hacer frente a la toxicidad por metales pesados (Kumar Ramesh et al., (2020, p.431). Así también se afirma por Zainith Surabhi et al., (2021, p.2), que la absorción de metales pesados por microalgas es superior a los procesos fisicoquímicos predominantes empleado en la remoción de metales pesados tóxicos.

Así también, Alam Md et al., (2016, p.14), menciona que los microalgas tienen varios mecanismos de protección contra la toxicidad de los metales., donde la defensa antioxidante es uno de ellos para la respuesta al estrés.

Esta afirmación es apoyada por Shen Ying et al., 2018, usando la microalga *Chlorella sp* presentando un porcentaje de remoción del 92,5%.

De igual manera Molazadeh Parvin et al., 2016 y Solisio C. et al., 2019 emplearon la microalga *Chlorella sp* y *Chlorella vulgaris* generando un porcentaje de remoción de los iones metálicos plomo y mercurio en un 78% y 72,9% respectivamente. Pero estas afirmaciones son refutadas por Sibi G., 2016, quien empleando la microalga *Chlorella vulgaris* también del orden Chlorellales y presentando un porcentaje de remoción del 43%.

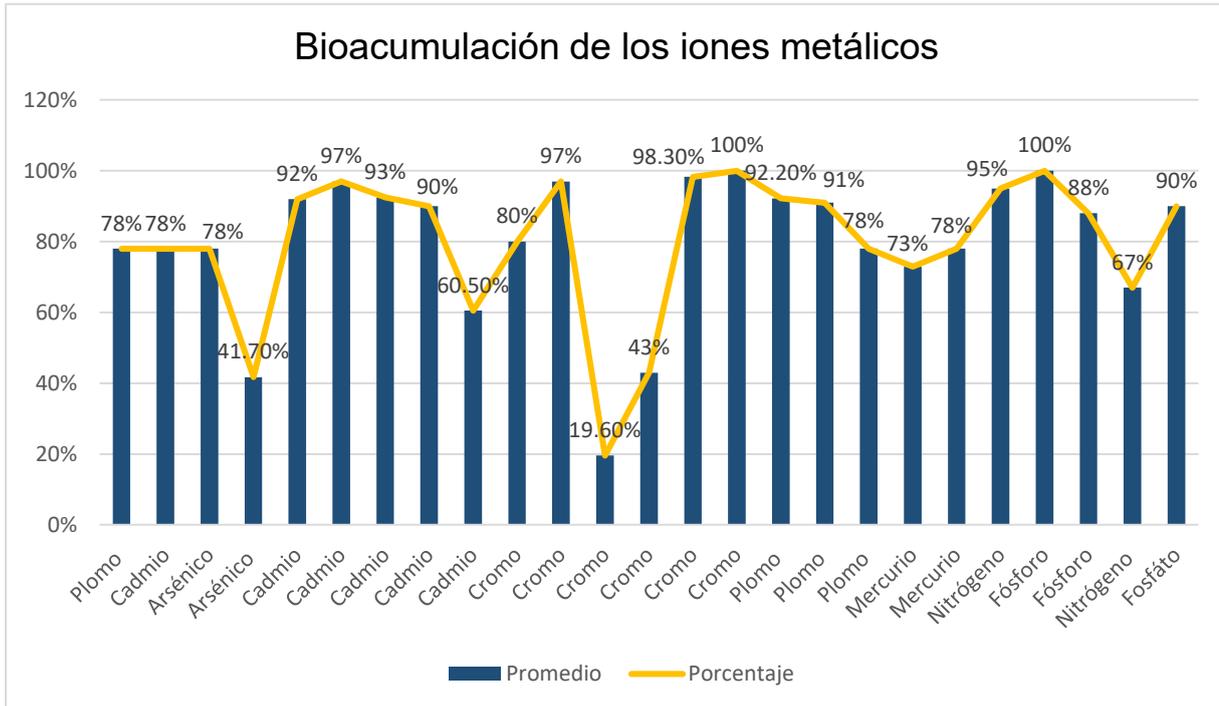
Mujtaba G. y Lee K., 2017 contradice lo dicho por Sibi G., 2016, reafirmando los resultados anteriores, señalando que realizó dos estudios usando la microalga *Chlorella vulgaris* también del orden Chlorellales generándole un porcentaje de remoción del 95% para el nitrógeno y 100% para el fósforo. Siendo apoyado estos resultados por Kumar P. et al., 2019, quien también empleó la micro alga marina *Chlorella* obteniendo para dos muestras de los no metales fósforo y nitrógeno el 88% y 61% respectivamente.

Además, Sayadi Mohammad et al., (2019, p.3), afirma que la floculación de la microalga la microalga *Chlorella vulgaris* mejoró su crecimiento, síntesis de pigmentos fotosintéticos y actividad antioxidante en condiciones de estrés, lo que indica una mejor tolerancia a los iones de metales pesados por un potencial para eliminarlos de manera más eficiente de las aguas residuales contaminadas, junto con una biorremediación.

La presencia generalizada de las microalgas marinas, junto con su capacidad para cultivar y concentrar metales pesados, determina su idoneidad en aplicaciones prácticas de biorremediación de aguas residuales.

Por tal motivo, para evaluar su potencial se realizara la evaluación crítica de la bioacumulación más obtenida de iones metálicos por algas marinas, de acuerdo a los criterios de la concentración inicial y el tiempo de adsorción, mostrando los resultados en el gráfico N°3.

Gráfico N°3: Microalgas marinas



Elaboración propia

De acuerdo al gráfico N° 3, con respecto a la Tabla N° 3 y anexo N° 3 se tiene que la bioacumulación de iones metálicos que más se obtuvo usando microalgas marinas fue con el cadmio (Cd) y cromo (Cr), siendo el Cd el metal que presentó un promedio de adsorción del 80 al 90%, mientras que el Cr un 90 a 95%.

El Cd fue motivo de estudio por un 28% de los investigadores y el Cr por un 27% de los investigadores.

Estos resultados son también respaldados por lo obtenido en el estudio de Sayadi Mohammad et al., (2019, p.3), quien indica que más del 60% de Cd 2+ fueron eliminados por el cultivo de microalgas en 3 días en presencia de hasta 4,0 mg / L Cd 2+, respectivamente usando la microalga *Chlorella vulgaris* JSC-7.

Además, Shen Ying et al., (2018), adiciona a las afirmaciones anteriores señalando que, el Cd presentando una concentración inicial 10 mg/L y una biomasa de microalga de 1,3 g/L obtuvo una adsorción máxima de 15,51 mg/g, lo que equivale a un 92,5% de remoción del ion metálico. Así también Dirbaz M. y Roosta A., (2018), respaldo a Shen Ying et al., (2018), mostrando que con una concentración inicial de Cd en 60 mg/L y una concentración de biomasa de la microalga en 1 g/L obtuvo una adsorción máxima del 96,2 mg/g lo que equivale al 90% de adsorción.

Una investigación realizada por Anastopoulos I. y Kyzas G., (2016, p.2), evaluó la remoción de cadmio (II) y plomo (II) de una solución acuosa por el alga verde azul *Anabaena sphaerica* y los resultados sugirieron que esta alga tiene una capacidad de biosorción relativamente alta para la eliminación de cadmio (II) y plomo (II), calculada en 111,1 mg / gy 121,95 mg / g, respectivamente.

Jena Jayashree et al., 2016 y Moreno Rivas et al., 2018 también afirman lo anteriormente dicho, mostrando que presentaron un porcentaje de eliminación del 78% y 60,5%, con una concentración inicial del ion metálico Cd en 6 mg/L y 200 mg/L respectivamente.

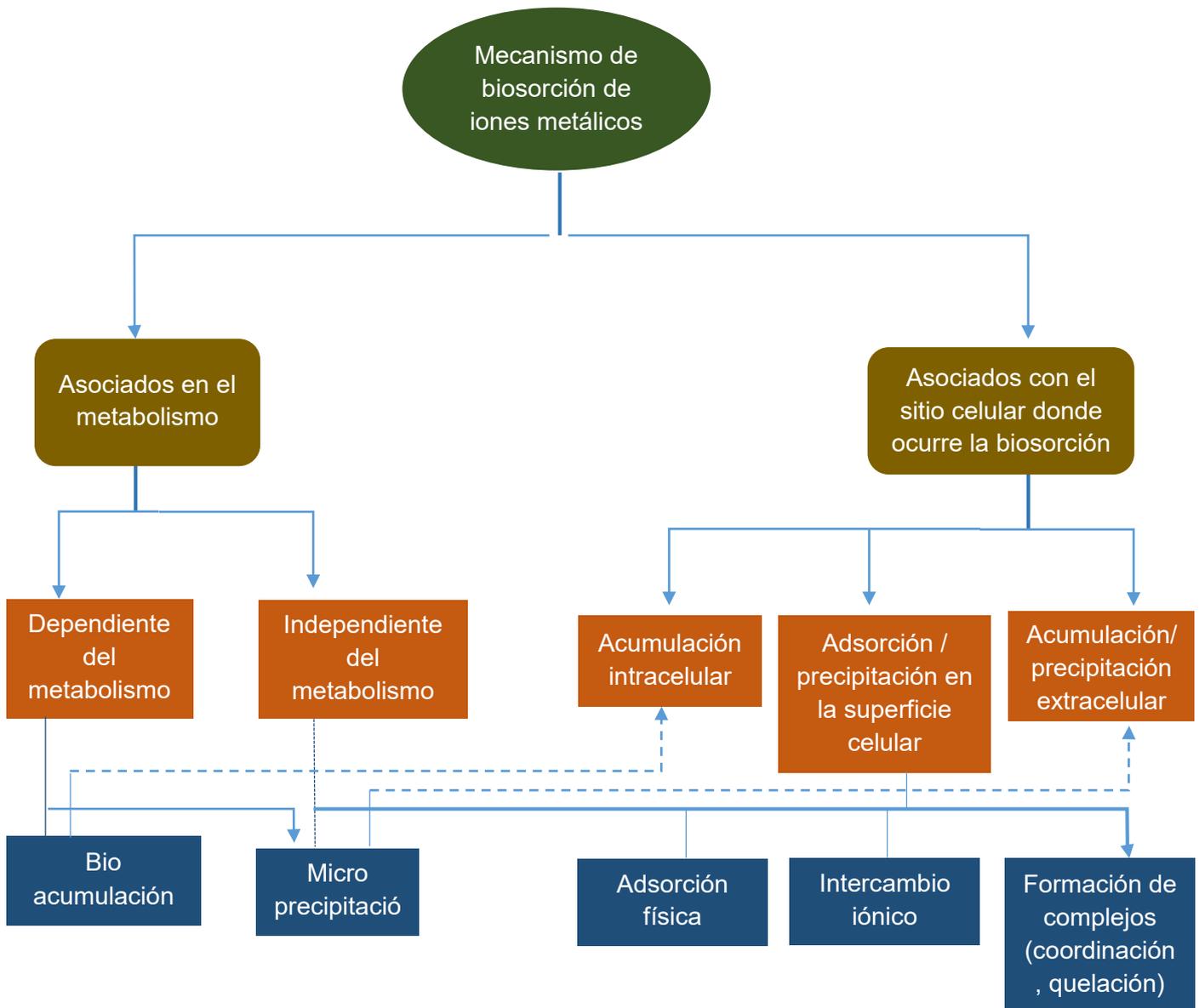
De igual forma, Nithya L. et al., 2019 y Shokri Khoubestani et al., 2016 confirman los resultados presentados, mostrando que estudiaron al Cr empleando microalgas marinas obteniendo porcentajes de remoción del 80% - 97% y 98,3%.

Opuesto a ello, se encuentra Kwak Hyo et al., 2016, mostrando que con una concentración inicial de cromo (VI) 250 mg/L, presentó una adsorción máxima del metal en 49 mg/g lo que equivale al 96% de eliminación. Ello también apoyado por Sibi G., 2016, mostrando que con una concentración de 100 mg/L de Cromo (III), presentó un porcentaje de eliminación del 43%.

Estos enunciados son contrastados por Daneshvar Ehsan et al., 2019, refutando que en su estudio el Cromo (III) con una concentración inicial de 10 mg/L y una concentración de biomasa de 2mg/L en un tiempo de 240min. presentó un porcentaje de eliminación eficiente del 100%.

De manera análoga se buscó identificar el mecanismo de biosorción de iones metálicos en efluentes de aguas residuales empleando microalgas bioacumuladoras; mostrando los resultados obtenidos en el gráfico 4.

Gráfico N°4: Mecanismo de biosorción de iones metálicos en efluentes de aguas residuales empleando microalgas bioacumuladoras



Fuente: Modificado de Ali Redha A., 2020

De acuerdo al Gráfico N°4, se tiene que los mecanismos de biosorción de iones metálicos que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales se pueden dar mediante los mecanismos de eliminación intracelular como extracelular para la adsorción de iones metálicos.

Como se ha mostrado, los mecanismos se clasifican según la dependencia del metabolismo celular o la ubicación dentro de la célula donde se elimina el metal, que se divide en tres tipos: acumulación / precipitación extracelular, precipitación / sorción en la superficie celular y acumulación intracelular (Bilal M. et al., 2018, p.4).

Así también Gupta Suvidha et al., (2017), apoya la afirmación descrita por Ali Redha A., (2020, p.188), en el gráfico 4, donde señala que el mecanismo o mecanismos de biosorción pueden variar en consecuencia, los mecanismos incluyen la adsorción física, el intercambio de iones, la complejación, la precipitación y el transporte a través de las células.

Añadiendo lo mencionado anteriormente, Saavedra Ricardo et al., (2018), señala que la eficacia de la eliminación de metales pesados por un biosorbente específico en condiciones específicas puede compararse mediante la capacidad de biosorción calculada del biosorbente en cuestión. Así también está Nithya L. et al., (2019), haciendo mención que varios factores pueden influir en la capacidad de biosorción de diferentes biosorbentes, que incluyen principalmente el pH del agua, la temperatura, el tiempo de contacto, la dosis de biomasa y la concentración inicial de metales pesados.

Por otro lado, enfocándose en las algas marinas Mujtaba G. y Lee K., (2017), señala que la alta capacidad de biosorción de las algas se debe a la composición de su pared celular que se compone de quitina, polisacáridos, proteínas y lípidos que contienen grupos funcionales vitales que ayudan en la biosorción y el mecanismo de adsorción se describe por la cinética, la cual se encuentra gobernada por el fenómeno de difusión externa, donde las microalgas muestran una cinética de adsorción muy rápida; lo que puede comprobar una alta afinidad del adsorbato con el adsorbente.

Además, varios factores pueden contribuir en el control de los mecanismos, entre ellos las características químicas, estereoquímicas y de coordinación del metal de interés que involucra la masa iónica, el radio iónico y el estado de oxidación del ión metálico (Noli F. et al., 2019, p.13).

## V. CONCLUSIONES

De acuerdo a la revisión realizada se puede concluir los siguientes puntos:

1. Se puede concluir que las microalgas marinas bioacumuladoras son un método de biosorción efectiva para la descontaminación de iones metálicos como As, Cd, Pb y Cr en aguas residuales y aguas para consumo, debido a la capacidad de adsorción.
2. Las microalgas marinas más bioacumuladoras de iones metálicos que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales son las pertenecientes al orden Chlorellales, presentando un porcentaje de remoción de 90 a 100%; además es el orden más usado por los investigadores, siendo empleado por un 43% de los investigadores; seguido de ellos se encuentra el orden Chlorococcales con un 24% de artículos empleados y un promedio de remoción del 70 al 80%. Ello es debido a su proceso de autofloculación y que las microalgas han desarrollado un amplio espectro de mecanismos (extracelulares e intracelulares) para hacer frente a la toxicidad por metales pesados.
3. La bioacumulación más los niveles de concentración de iones metálicos en algas marinas son los iones metálicos cadmio (Cd) y cromo (Cr), siendo el Cd el metal que presentó un promedio de adsorción del 80 al 90%, mientras que el Cr un 90 a 95%. Además, el Cd fue motivo de estudio por un 28% de los investigadores y el Cr por un 27% de los investigadores.
4. El mecanismo de biosorción de iones metálicos que influyen en la descontaminación de efluentes de aguas residuales se pueden dar mediante los mecanismos de eliminación intracelular como extracelular para la adsorción de iones metálicos y estos mecanismos se clasifican según la dependencia del metabolismo celular o la ubicación dentro de la célula donde se elimina el metal, que se divide en tres tipos: acumulación / precipitación extracelular, precipitación / sorción en la superficie celular y acumulación intracelular.

## VI. RECOMENDACIONES

En base a la revisión exhaustiva realizada para conocer cuáles son las microalgas marinas bioacumuladoras de iones metálicos en efluentes de aguas residuales se puede recomendar lo siguiente:

- Se recomienda realizar un estudio práctico en el que se establezcan rangos donde oscilen la capacidad de biosorción de las microalgas de acuerdo a las algas pardas, rojas, doradas, verdiazules y verdes.
- Se recomienda realizar una clasificación de la amplia variedad de algas marinas en base a sus ventajas y desventajas a fin de obtener un nivel de eficiencia de cada especie.
- Se recomienda a los futuros investigadores realizar un estudio analizando críticamente la biosorción, como un método que tiene el potencial de competir con los métodos industriales habituales.
- Debido a la necesidad de optimizar las condiciones de uso a gran escala y estudiar nuevas posibilidades como: inmovilización por encapsulamiento y el uso de tecnologías híbridas; ya que estas tecnologías combinan método de adsorción, se recomienda mayores estudios con otros procesos tradicionales, y combinación a fin de optimizar el proceso.

## REFERENCIAS

1. Abu-Ghosh, S., Fixler, D., Dubinsky, Z., & Iluz, D. (2016). Flashing light in microalgae biotechnology. *Bioresource Technology*, 203, 357–363. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.057>
2. AGASTI, Nityananda. Decontamination of heavy metal ions from water by composites prepared from waste. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 2021, p. 100088. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2021.100088>
3. ALAM, Md Asraful, et al. Enhanced removal of Zn<sup>2+</sup> or Cd<sup>2+</sup> by the flocculating *Chlorella vulgaris* JSC-7. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, vol. 289, p. 38-45. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.012>
4. ALI, Hazrat; KHAN, Ezzat. What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term 'heavy metals'—proposal of a comprehensive definition. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 2018, vol. 100, no 1, p. 6-19. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/02772248.2017.1413652>
5. ALI REDHA, Ali. Removal of heavy metals from aqueous media by biosorption. *Arab Journal of basic and applied sciences*, 2020, vol. 27, no 1, p. 183-193. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/25765299.2020.1756177>
6. ALKHERRAZ, Abdulfattah Mohammed; ALI, Aisha Khalifa; ELSHERIF, Khaled Muftah. Removal of Pb (II), Zn (II), Cu (II) and Cd (II) from aqueous solutions by adsorption onto olive branches activated carbon: equilibrium and thermodynamic studies. *Chemistry International*, 2020, vol. 6, no 1, p. 11-20. Disponible en: ISSN: 2410-9649
7. Alondra A. Cortés Téllez, Sebastián Sánchez-Fortún Rodríguez y Ma. Carmen Bartolomé Camacho. Mecanismos de resistencia a metales tóxicos (Cd) bajo variaciones abióticas en microalgas. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.recqb.2017.08.005>
8. ALMOMANI, Fares, et al. Heavy metal ions removal from industrial wastewater using magnetic nanoparticles (MNP). *Applied Surface Science*, 2020, vol. 506, p. 144924. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144924>

9. Anastopoulos, I., & Kyzas, G. Z. (2015). Progress in batch biosorption of heavy metals onto algae. *Journal of Molecular Liquids*, 209, 77-86. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.05.023>
10. ARCHANA, V.; BEGUM, KM Meera S.; ANANTHARAMAN, N. Studies on removal of phenol using ionic liquid immobilized polymeric micro-capsules. *Arabian Journal of Chemistry*, 2016, vol. 9, no 3, p. 371-382. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.03.017>
11. ASLAM, Ambreen, et al. Mixed microalgae consortia growth under higher concentration of CO<sub>2</sub> from unfiltered coal fired flue gas: fatty acid profiling and biodiesel production. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2018, vol. 179, p. 126-133. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2018.01.003>
12. BALZANO, Sergio, et al. Microalgal metallothioneins and phytochelatins and their potential use in bioremediation. *Frontiers in Microbiology*, 2020, vol. 11, p. 517. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.00517>
13. BENABDALLAH, N. K., et al. Bioaccumulation of trace metals by red alga *Corallina elongata* in the coast of Beni Saf, west coast, Algeria. *Chem. Int.*, 2017, vol. 3, no 3, p. 220-231.
14. Bilal, M., Rasheed, T., Sosa-Hernández, J. E., Raza, A., Nabeel, F., & Iqbal, H. (2018). Biosorption: an interplay between marine algae and potentially toxic elements—a review. *Marine drugs*, 16(2), 65. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/md16020065>
15. BLABY-HAAS, Crysten E.; MERCHANT, Sabeeha S. Comparative and functional algal genomics. *Annual review of plant biology*, 2019, vol. 70, p. 605-638. Disponible en: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-095841>
16. BOU, Lizandra Pérez, et al. Biosorción microbiana de metales pesados: características del proceso/Biosorption of heavy metals: characteristics of the process. *Revista Cubana de Ciencias Biológicas*, 2018, vol. 6, no 1, p. 13. Disponible en: ISSN: 2307-695X

17. CAPACOILA CALCINA, José Antonio. Remoción de arsénico con biomásas orgánicas. Una revisión. 2020.
18. DANESHVAR, Ehsan, et al. Hexavalent chromium removal from water by microalgal-based materials: adsorption, desorption and recovery studies. *Bioresource technology*, 2019, vol. 293, p. 122064. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122064>
19. DAS, Debayan, et al. Biosorption of lead ions (Pb<sup>2+</sup>) from simulated wastewater using residual biomass of microalgae. *Desalination and Water Treatment*, 2016, vol. 57, no 10, p. 4576-4586. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.994105>
20. DENNIS, Kristine K., et al. Phytochelatin database: a resource for phytochelatin complexes of nutritional and environmental metals. *Database*, 2019, vol. 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1093/database/baz083>
21. DIEP, Patrick; MAHADEVAN, Radhakrishnan; YAKUNIN, Alexander F. Heavy metal removal by bioaccumulation using genetically engineered microorganisms. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 2018, vol. 6, p. 157. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2018.00157>
22. DIRBAZ, Mahboobeh; ROOSTA, Aliakbar. Adsorption, kinetic and thermodynamic studies for the biosorption of cadmium onto microalgae *Parachlorella* sp. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2018, vol. 6, no 2, p. 2302-2309. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.039>
23. DOLATABADI, Maryam, et al. Adsorption of tetracycline antibiotic onto modified zeolite: Experimental investigation and modeling. *MethodsX*, 2020, vol. 7, p. 100885. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100885>
24. DUAN, Chengyu, et al. Removal of heavy metals from aqueous solution using carbon-based adsorbents: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, vol. 37, p. 101339. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101339>
25. EGOROVA, Ksenia S.; ANANIKOV, Valentine P. Which metals are green for catalysis? Comparison of the toxicities of Ni, Cu, Fe, Pd, Pt, Rh, and Au salts.

- Angewandte Chemie International Edition, 2016, vol. 55, no 40, p. 12150-12162. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/anie.201603777>
26. ELLEUCH, Jihen, et al. Potential of three local marine microalgae from Tunisian coasts for cadmium, lead and chromium removals. *Science of The Total Environment*, 2021, vol. 799, p. 149464. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149464>
27. FILIZ, Ertugrul, et al. Comparative analyses of phytochelatin synthase (PCS) genes in higher plants. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2019, vol. 33, no 1, p. 178-194. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/13102818.2018.1559096>
28. FONTANA, Klaiani B., et al. Textile dye removal from aqueous solutions by malt bagasse: isotherm, kinetic and thermodynamic studies. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2016, vol. 124, p. 329-336. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.11.012>
29. GEVA, Polina, et al. Increased copper bioremediation ability of new transgenic and adapted *Saccharomyces cerevisiae* strains. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 23, no 19, p. 19613-19625. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7157-4>
30. GONSALVES, L., et al. Preparation, characterization and application of polystyrene based activated carbons for Ni (II) removal from aqueous solution. *Fuel Processing Technology*, 2016, vol. 149, p. 75-85. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.03.024>
31. GUPTA, Suvidha; PANDEY, R. A.; PAWAR, Sanjay B. Bioremediation of synthetic high-chemical oxygen demand wastewater using microalgal species *Chlorella pyrenoidosa*. *Bioremediation Journal*, 2017, vol. 21, no 1, p. 38-51. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10889868.2017.1282936>
32. GUTIÉRREZ, Juan C.; AMARO, Francisco; MARTÍN-GONZÁLEZ, Ana. Heavy metal whole-cell biosensors using eukaryotic microorganisms: an updated critical review. *Frontiers in microbiology*, 2015, vol. 6, p. 48. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00048>

33. GRZEGRZOLKA, Jędrzej, et al. Expression of tesmin (MTL5) in non-small cell lung cancer: A preliminary study. *Oncology reports*, 2019, vol. 42, no 1, p. 253-262. Disponible en: <https://doi.org/10.3892/or.2019.7145>
34. HAMILTON-AMACHREE, Akens; IROHA, Nkem Bartholomew. Corrosion inhibition of API 5L X80 pipeline steel in acidic environment using aqueous extract of *Thevetia peruviana*. *Chem. Int.*, 2020, vol. 6, no 3, p. 110-121. Disponible en: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3516565>
35. HEIMANN, Kirsten; HUERLIMANN, Roger. Microalgal classification: major classes and genera of commercial microalgal species. En *Handbook of marine microalgae*. Academic Press, 2016. p. 25-41. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800776-1.00003-0>
36. HUANG, Rong, et al. Immobilization of mercury using high-phosphate culture-modified microalgae. *Environmental Pollution*, 2019, vol. 254, p. 112966. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.112966>
37. HUSSAIN, Fida, et al. Microalgae an ecofriendly and sustainable wastewater treatment option: Biomass application in biofuel and bio-fertilizer production. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, vol. 137, p. 110603. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110603>
38. HUSSAIN, Fida, et al. Microalgae screening under CO<sub>2</sub> stress: Growth and micro-nutrients removal efficiency. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2017, vol. 170, p. 91-98. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2017.03.021>
39. IANNACONE OLIVER, José Alberto; ALVARIÑO FLORES, Lorena. Efecto Ecotoxicológico agudo del Mercurio sobre Larvas del "Muy Muy" emerita analoga (Stimpson)(Decapoda: Hippidae) procedentes de cuatro localidades de Lima. *Ecología Aplicada*, 2003, vol. 2, no 1, p. 111-115. Disponible en: SSN 1726-2216
40. IBUOT, Aniefon, et al. Metal bioremediation by CrMTP4 over-expressing *Chlamydomonas reinhardtii* in comparison to natural wastewater-tolerant microalgae strains. *Algal Research*, 2017, vol. 24, p. 89-96. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.03.002>

41. JAAFARI, Jalil; YAGHMAEIAN, Kamyar. Optimization of heavy metal biosorption onto freshwater algae (*Chlorella coloniales*) using response surface methodology (RSM). *Chemosphere*, 2019, vol. 217, p. 447-455. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.205>
42. JAFARIAN, V.; GHAFARI, F. A unique metallothionein-engineered in *Escherichia coli* for biosorption of lead, zinc, and cadmium; absorption or adsorption?. *Microbiology*, 2017, vol. 86, no 1, p. 73-81. Disponible en: <https://doi.org/10.1134/s0026261717010064>
43. JALMI, Siddhi K., et al. Traversing the links between heavy metal stress and plant signaling. *Frontiers in plant science*, 2018, vol. 9, p. 12. Disponible en: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00012>
44. JENA, Jayashree, et al. Biological sequestration and retention of cadmium as CdS nanoparticles by the microalga *Scenedesmus-24*. *Journal of Applied Phycology*, 2015, vol. 27, no 6, p. 2251-2260. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0499-8>
45. JENNIFER, Enyadike Chiobuoma; IFEDI, Okoye Peter. Modification of natural bentonite clay using cetyl trimethyl-ammonium bromide and its adsorption capability on some petrochemical wastes. *Chemistry International*, 2019, vol. 5, no 4, p. 269-273. Disponible en: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3337899>
46. KREŻEL, Artur; MARET, Wolfgang. The functions of metamorphic metallothioneins in zinc and copper metabolism. *International journal of molecular sciences*, 2017, vol. 18, no 6, p. 1237. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijms18061237>
47. KUMAR, P. Kiran, et al. Biomass production from microalgae *Chlorella* grown in sewage, kitchen wastewater using industrial CO<sub>2</sub> emissions: comparative study. *Carbon Resources Conversion*, 2019, vol. 2, no 2, p. 126-133. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2019.06.002>
48. KUMAR, Ramesh; GHOSH, Alak Kumar; PAL, Parimal. Synergy of biofuel production with waste remediation along with value-added co-products recovery through microalgae cultivation: a review of membrane-integrated

- green approach. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 698, p. 134169. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134169>
49. KWAK, Hyo Won, et al. Preparation of bead-type biosorbent from water-soluble *Spirulina platensis* extracts for chromium (VI) removal. *Algal Research*, 2015, vol. 7, p. 92-99. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2014.12.006>
50. LANDIN-SANDOVAL, V. J., et al. Valorization of agri-food industry wastes to prepare adsorbents for heavy metal removal from water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, vol. 8, no 5, p. 104067. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104067>
51. LEIVA COLOS, Jhonatan. Aplicación de biomasa de microalga deshidratada para bioabsorción de Plomo en soluciones acuosas a escala laboratorio. 2020.
52. LI, Rui, et al. Salidroside ameliorates renal interstitial fibrosis by inhibiting the TLR4/NF- $\kappa$ B and MAPK signaling pathways. *International journal of molecular sciences*, 2019, vol. 20, no 5, p. 1103. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijfs.2019.116735>
53. MANAY, Roger, et al. Bioaccumulation of heavy metals in *Donax obesulus* from the Lambayeque littoral, Peru. En *Bioaccumulation of heavy metals in Donax obesulus from the Lambayeque littoral, Peru*. 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/SciELOPreprints.828>
54. MÉNDEZ ANCCA, Sheda, et al. Concentración celular y biomasa seca en tres especies de microalgas marinas: *Chlorella vulgaris*, *Nannochloropsis oculata* y *Tetraselmis striata*. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 2020, vol. 22, no 2, p. 155-160. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2020.603>
55. MOLAZADEH, Parvin, et al. Adsorption of lead by microalgae *Chaetoceros* sp. and *Chlorella* sp. from aqueous solution. *Journal of Community Health Research*, 2015, vol. 4, no 2, p. 114-127.
56. MONDAL, Madhumanti, et al. Bioremediation of organic and inorganic pollutants using microalgae. En *New and future developments in microbial biotechnology and bioengineering*. Elsevier, 2019. p. 223-235. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63504-4.00017-7>

57. MORENO-RIVAS, Silvia Carolina; RAMOS-CLAMONT MONTFORT, Gabriela. Descontaminación de arsénico, cadmio y plomo en agua por biosorción con *Saccharomyces cerevisiae*. TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas, 2018, vol. 21. Disponible en: <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2018.0.155>
58. MUJTABA, Ghulam; LEE, Kisay. Treatment of real wastewater using co-culture of immobilized *Chlorella vulgaris* and suspended activated sludge. Water research, 2017, vol. 120, p. 174-184. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.078>
59. MUSTAFA, Shazia, et al. Microalgae biosorption, bioaccumulation and biodegradation efficiency for the remediation of wastewater and carbon dioxide mitigation: Prospects, challenges and opportunities. Journal of Water Process Engineering, 2021, vol. 41, p. 102009. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102009>
60. MWANDIRA, Wilson, et al. Cellulose-metallothionein biosorbent for removal of Pb (II) and Zn (II) from polluted water. Chemosphere, 2020, vol. 246, p. 125733. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125733>
61. NITHYA, K., et al. Algal biomass waste residues of *Spirulina platensis* for chromium adsorption and modeling studies. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019, vol. 7, no 5, p. 103273. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103273>
62. Noli, F., Kapashi, E., & Kapnisti, M. (2019). Biosorption of uranium and cadmium using sorbents based on Aloe vera wastes. Journal of Environmental Chemical Engineering, 7(2), 102985. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102985>
63. OLSSON, Sanna, et al. Horizontal gene transfer of phytochelatin synthases from bacteria to extremophilic green algae. Microbial ecology, 2017, vol. 73, no 1, p. 50-60. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00248-016-0848-z>
64. PENEN, F., et al. Pools of cadmium in *Chlamydomonas reinhardtii* revealed by chemical imaging and XAS spectroscopy. Metallomics, 2017, vol. 9, no 7, p. 910-923. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/c7mt00029d>

65. PÉREZ BOU, Lizandra, et al. Biosorción microbiana de metales pesados: características del proceso. Cuban Journal of Biological Sciences/Revista Cubana de Ciencias Biológicas, 2018, vol. 6, no 1.
66. RAO, Zhuang, et al. Surface decoration of amino-functionalized metal–organic framework/graphene oxide composite onto polydopamine-coated membrane substrate for highly efficient heavy metal removal. ACS applied materials & interfaces, 2017, vol. 9, no 3, p. 2594-2605. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b15873>
67. SAAVEDRA, Ricardo, et al. Comparative uptake study of arsenic, boron, copper, manganese and zinc from water by different green microalgae. Bioresource Technology, 2018, vol. 263, p. 49-57. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.101>
68. SAYADI, Mohammad Hossein; RASHKI, Omolbanin; SHAHRI, Elham. Application of modified Spirulina platensis and Chlorella vulgaris powder on the adsorption of heavy metals from aqueous solutions. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019, vol. 7, no 3, p. 103169. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103169>
69. SHEN, Ying, et al. Enhancing cadmium bioremediation by a complex of water-hyacinth derived pellets immobilized with Chlorella sp. Bioresource technology, 2018, vol. 257, p. 157-163. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.060>
70. SHOKRI KHOUBESTANI, Roghayeh; MIRGHAFARI, Nourollah; FARHADIAN, Omidvar. Removal of three and hexavalent chromium from aqueous solutions using a microalgae biomass-derived biosorbent. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2015, vol. 34, no 4, p. 949-956. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/ep.12071>
71. SIBI, G. Biosorption of chromium from electroplating and galvanizing industrial effluents under extreme conditions using Chlorella vulgaris. Green Energy & Environment, 2016, vol. 1, no 2, p. 172-177. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.gee.2016.08.002>

72. SÖLDNER, Christian A., et al. A survey of biological building blocks for synthetic molecular communication systems. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, vol. 22, no 4, p. 2765-2800. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32903-1\\_217-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32903-1_217-1)
73. SOLISIO, Carlo; AL ARNI, Saleh; CONVERTI, Attilio. Adsorption of inorganic mercury from aqueous solutions onto dry biomass of *Chlorella vulgaris*: kinetic and isotherm study. *Environmental technology*, 2019, vol. 40, no 5, p. 664-672. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/09593330.2017.1400114>
74. SUGANYA, S., et al. Sequestration of Pb (II) and Ni (II) ions from aqueous solution using microalga *Rhizoclonium hookeri*: adsorption thermodynamics, kinetics, and equilibrium studies. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2017, vol. 7, no 2, p. 214-227. Disponible en: <https://doi.org/10.2166/wrd.2016.200>
75. SUMMERMATTER, Serge, et al. Blockade of metallothioneins 1 and 2 increases skeletal muscle mass and strength. *Molecular and cellular biology*, 2017, vol. 37, no 5, p. e00305-16.
76. THASNEEMA, K. K., et al. Removal of toxic heavy metals, phenolic compounds and textile dyes from industrial waste water using phosphonium based ionic liquids. *Journal of Molecular Liquids*, 2021, vol. 323, p. 114645. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114645>
77. TOMÀS GINER, Mireia, et al. Analysis of the soybean metallothionein system under free radical stress: protein modification connected to lipid membrane damage. *Metallomics*, 2018, vol. 10, no 12, p. 1792-1804. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/c8mt00164b>
78. UMMALYMA, Sabeela Beevi; SINGH, Anamika. Importance of algae and bacteria in the bioremediation of heavy metals from wastewater treatment plants. *En New Trends in Removal of Heavy Metals from Industrial Wastewater*. Elsevier, 2021. p. 343-357. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822965-1.00014-3>

79. WANG, Luyun, et al. Biosorption and biodegradation of the environmental hormone nonylphenol by four marine microalgae. *Scientific reports*, 2019, vol. 9, no 1, p. 1-11. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41808-8>
80. Wei, R., Li, H., Chen, Y., Hu, Y., Long, H., Li, J., & Xu, C. C. (2020). Environmental Issues Related to Bioenergy. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819727-1.00011-x>
81. YAN, Chicheng, et al. Microalgal bioremediation of heavy metal pollution in water: Recent advances, challenges, and prospects. *Chemosphere*, 2021, p. 131870. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131870>
82. YANG, JinShui, et al. Lipid production combined with biosorption and bioaccumulation of cadmium, copper, manganese and zinc by oleaginous microalgae *Chlorella minutissima* UTEX2341. *Bioresource technology*, 2015, vol. 175, p. 537-544. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.124>
83. ZAINITH, Surabhi, et al. Application of microalgae in industrial effluent treatment, contaminants removal, and biodiesel production: Opportunities, challenges, and future prospects. En *Bioremediation for Environmental Sustainability*. Elsevier, 2021. p. 481-517. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820524-2.00020-1>
84. ZAPATA, Fernán Cosme Chanamé, et al. Bioaccumulation of heavy metals in *Oncorhynchus mykiss* for export at production centers in the Peruvian Central Highlands. *Revista Ambiente & Agua*, 2017, vol. 12, p. 527-542. Disponible en: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2100>
85. ZERAATKAR, Amin Keyvan, et al. Potential use of algae for heavy metal bioremediation, a critical review. *Journal of environmental management*, 2016, vol. 181, p. 817-831. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.059>

86. ZHENG, Heshan, et al. Biosorption of cadmium by a lipid extraction residue of lipid-rich microalgae. RSC advances, 2016, vol. 6, no 24, p. 20051-20057. Disponible en: <https://doi.org/10.1039/C5RA27264E>

## ANEXOS

Anexos N° 1:

		<h3>FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO</h3>
<b>DATOS DEL AUTOR:</b> Saavedra Ricardo et al., 2018		
<b>PAGINAS UTILIZADAS:</b>	<b>AÑO DE PUBLICACION:</b> Mayor al 2018	<b>LUGAR DE PUBLICACION:</b> Internacional
<b>TIPO DE INVESTIGACION:</b> Experimental		
<b>CÓDIGO:</b>	<a href="https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.101">https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.101</a>	
<b>PALABRAS CLAVES :</b>	Marine microalgae, metal ions, wastewater, adsorption, pollution.	
<b>MICROALGAS MARINAS BIOACUMULADORAS:</b>	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> <i>Chlorella vulgaris</i> <i>Scenedesmus almeriensis</i> <i>Chlorophyceae spp.</i>	
<b>MECANISMO DE BIOSORCIÓN DE IONES METÁLICOS:</b>	Asociados con el sitio celular donde ocurre la biosorción - Adsorción / precipitación en la superficie celular	
<b>PORCENTAJE DE REMOCIÓN</b>	41.7 %	
<b>RESULTADOS :</b>	Las eficiencias de eliminación de B disminuyeron notablemente en soluciones multimetálicas (hasta 0,2 % en <i>C. reinhardtii</i> ), a excepción de <i>Chlorophyceae spp.</i> , la única especie aislada de un ambiente contaminado. Los espectros FTIR mostraron las interacciones más altas para As (1150-1300 cm <sup>-1</sup> ) y Cu (3300, 1741, 1535, 1350-1400 cm <sup>-1</sup> ).	
<b>CONCLUSIONES:</b>	Que la biomasa de microalgas es un biosorbente potencial para elementos tóxicos.	

Elaboración propia

Anexos N° 2:

	<b>FICHA DE ANÁLISIS DE CONTENIDO</b>	
<b>DATOS DEL AUTOR:</b> Dirbaz M. y Roosta A., 2018		
<b>PAGINAS UTILIZADAS:</b>	<b>AÑO DE PUBLICACION:</b> Mayor al 2018	<b>LUGAR DE PUBLICACION:</b> Internacional
<b>TIPO DE INVESTIGACION:</b> Experimental		
<b>CÓDIGO:</b>	<a href="https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.039">https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.039</a>	
<b>PALABRAS CLAVES :</b>	Marine microalgae, metal ions, wastewater, adsorption, pollution.	
<b>MICROALGAS MARINAS BIOACUMULADORAS:</b>	<i>Parachlorella sp.</i>	
<b>MECANISMO DE BIOSORCIÓN DE IONES METÁLICOS:</b>	Asociados con el sitio celular donde ocurre la biosorción - Adsorción / precipitación en la superficie celular	
<b>PORCENTAJE DE REMOCIÓN</b>	90%	
<b>RESULTADOS :</b>	La máxima absorción experimental ocurrió a 96,20 mg/g a un pH de 7 y 35 °C, que es superior a la absorción de los otros biosorbentes informados en la literatura. También se calcularon algunos parámetros termodinámicos relevantes. El valor negativo de la energía libre de Gibbs (-30,81 a -25,13 kJ/mol) y los valores positivos del cambio de entalpía (+77,01 a +91,86 kJ/mol) y también el cambio de entropía (+349,01 a +393,71 J/mol K) indicar la espontaneidad, endotermia y deseabilidad del proceso de interés.	
<b>CONCLUSIONES:</b>	El aumento de la velocidad de mezcla a 250 rpm o más disminuyó la absorción en menos de la mitad y las propiedades termodinámicas muestran la espontaneidad del proceso.	

Elaboración propia

Anexo N°3: Microalgas marinas bioacumuladoras con mayor porcentaje

Microalgas marinas	Orden	Porcentaje de remoción	N° de artículos
<b>Chlorella sp</b>	Chlorellales	78%	43%
<b>Chlorella vulgaris</b>	Chlorellales	72.90%	
<b>Chlorella vulgaris</b>	Chlorellales	95% y 100%	
<b>Chlorella</b>	Chlorellales	88% y 67%	
<b>Chlorella pyrenoidosa</b>	Chlorellales	90%	
<b>Chlorella vulgaris</b>	Chlorellales	43%	
<b>Chlorella minutissima</b>	Chlorellales	97%	
<b>Chlorella sp inmovilizada</b>	Chlorellales	93%	
<b>Parachlorella sp.</b>	Chlorellales	90%	
<b>Scenedesmus quadricauda</b>	Chlorococcales	98.30%	24%
<b>Scenedesmus quadricauda</b>	Chlorococcales	100%	
<b>Scenedesmus obtusus</b>	Chlorococcales	78%	
<b>Scenedesmus-24</b>	Chlorococcales	60.50%	
<b>Scenedesmus almeriensis</b>	Chlorococcales	41.70%	
<b>Spirulina platensis</b>	Chroococcales	83%	14%
<b>Spirulina platensis extraída de lípidos</b>	Chroococcales	97%	
<b>Spirulina platensis inmovilizada</b>	Chroococcales	19.60%	
<b>Coelastrum</b>	Sphaeropleales	98%	19%
<b>Saccharomyces cerevisiae</b>	Saccharomycetales	78%	
<b>Phormidium sp</b>	Oscillatoriales	92.20%	
<b>Rhizoclonium hookeri</b>	Cladophorales	98.8%	

Elaboración propia