



# UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Evaluación de biosensores ambientales para la detección de  
metales pesados en aguas superficiales**

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

Ingeniero Ambiental

**AUTORES:**

Luis Quiñones, José Alfredo ([orcid.org/0000-0002-7820-9336](https://orcid.org/0000-0002-7820-9336))

Ticlia Sigüenza, Ingrid Abigail ([orcid.org/0000-0002-0765-9962](https://orcid.org/0000-0002-0765-9962))

**ASESOR:**

Dr. Cruz Monzón, José Alfredo ([orcid.org/0000-0001-9146-7615](https://orcid.org/0000-0001-9146-7615))

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:**

Calidad y Gestión de los Recursos Naturales

**LÍNEA DE RESPONSABILIDAD SOCIAL UNIVERSITARIA:**

Desarrollo sostenible y adaptación al cambio climático

TRUJILLO - PERÚ

2022

### Dedicatoria

En primer lugar, le dedicamos el presente trabajo de investigación a Dios por cuidarnos, guiarnos y darnos la fuerza necesaria durante todo el proceso universitario hasta el día de hoy.

En segundo lugar a nuestros padres por apoyarnos de manera incondicional y confiar en nosotros, siendo esto último de carácter fundamental ya que nos sirvió de motivación y como fortaleza.

## Agradecimiento

En primer lugar un agradecimiento a nuestro Dios Padre por cuidar nuestra salud durante toda la pandemia y guiarnos con sabiduría, calma y fortaleza.

En segundo lugar un agradecimiento a nuestros Padres por su sacrificio, dedicación y apoyo incondicional brindado hacia nosotros, esto nos dió mucha inspiración para seguir esforzándonos y superarnos día a día.

También queremos agradecer a nuestra Universidad César Vallejo , a la Dra. Magda Rodríguez Yupanqui, nuestra directora de escuela quién nos inculcó la vocación de la investigación y el cuidado del medio ambiente, queremos agradecer también a la plana docente de la escuela de Ingeniería Ambiental quienes nos forjaron como buenos estudiantes resolutivos y competitivos.

Finalmente, agradecer a nuestro asesor el Dr. José Alfredo Cruz Monzón por apoyarnos, orientarnos y brindarnos los conocimientos necesarios durante el proyecto y el desarrollo de tesis siendo de carácter indispensable para nuestro proceso formativo como futuros ingenieros egresados de la carrera de ingeniería ambiental.

## Índice de contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de contenido	iv
Índice de tablas	vi
Índice de figuras	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
I. INTRODUCCIÓN	8
II. MARCO TEÓRICO	11
III. METODOLOGÍA	16
3.1. Tipo y diseño de investigación	16
3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización	16
3.3. Escenario de estudio	16
3.4. Participantes	16
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	17
3.6. Procedimiento	17
3.7. Rigor científico	19
3.8. Método de análisis de datos	19
3.9. Aspectos éticos	19
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20

V. CONCLUSIONES	34
VI. RECOMENDACIONES	35
REFERENCIAS	36
ANEXOS	41

## Índice de tablas

<b>Tabla 1:</b> Bases de datos y sus palabras claves.....	21
<b>Tabla 2:</b> Evaluación de la eficacia de los biosensores en la detección de metales pesados según el tipo de agua.....	22
<b>Tabla 3:</b> Evaluación de la eficiencia de los biosensores en la detección de metales pesados según el tipo de agua superficial.....	25
<b>Tabla 4:</b> Evaluación de la sensibilidad de los transductores empleados en aguas superficiales para la detección de metales pesados.....	29
<b>Tabla 5:</b> Evaluación de la sensibilidad de los transductores empleados en aguas superficiales para la detección de metales pesados.....	32
<b>Tabla 6:</b> Evaluación de la eficacia y tiempo de detección de los biosensores en aguas superficiales según el derivado del elemento vivo.....	37
<b>Tabla 7:</b> Evaluación de la eficacia y tiempo de detección de los biosensores en aguas superficiales según el derivado del elemento vivo.....	39

## Índice de figuras

<b>Figura 1:</b> Diagrama de flujo para la búsqueda de artículos.....	20
<b>Figura 2:</b> Tipos de aguas superficiales con método in situ.....	23
<b>Figura 3:</b> Tiempo de detección en aguas superficiales con método in situ.....	24
<b>Figura 4:</b> Tipos de aguas superficiales con método ex situ.....	26
<b>Figura 5:</b> Tiempo de detección en aguas superficiales con método ex situ.....	26
<b>Figura 6:</b> Tipos de transductores empleados en la detección de metales pesados con método in situ.....	30
<b>Figura 7:</b> Composición electrónica del transductor con método in situ.....	31
<b>Figura 8:</b> Tipos de transductores empleados en la detección de metales pesados con método ex situ.....	34
<b>Figura 9:</b> Composición electrónica del transductor con método ex situ.....	34
<b>Figura 10:</b> Composición electrónica de los transductores con método in situ.....	36
<b>Figura 11:</b> Derivado del elemento vivo con método in situ.....	38
<b>Figura 12:</b> Derivado del elemento vivo con método ex situ.....	41

## RESUMEN

La contaminación de las aguas superficiales por la presencia de metales pesados ha forzado el desarrollo de diversos tipos de biosensores con distintas características de funcionamiento. Es por ello que la presente investigación se propuso evaluar ciertos biosensores, puesto que a nivel global las acciones realizadas por los seres humanos han aportado a la crecida de metales pesados, viéndose afectada las aguas superficiales por ser punto de descarga, siendo un problema ambiental elevado producto de sus proporciones altas de toxicidad para los organismos que se relacionan. Este trabajo efectuó una revisión sistemática acerca de evaluar la eficacia de detección de los biosensores para detectar metales pesados en aguas superficiales. Como fundamento para este estudio se utilizaron artículos que fueron reunidos de las bases de datos por MDPI, Scopus, Proquest, Pubmed, Science Direct. Se emplearon métodos de inclusión, de los cuales 30 artículos cumplían con la caracterización solicitada. Se pudo demostrar que los biosensores son elementos compuestos muy versátiles y combinables que al interactuar el derivado del elemento vivo con el transductor pueden obtenerse resultados muy precisos, eficaces y selectivos. Se logró establecer una relación entre el derivado de elemento vivo y el tipo de transductor donde para el caso de emplearse el ADN y un transductor electroquímico este detecta al analito en tiempos de detección muy cortos, haciéndose muy eficiente, ya que en su composición lleva hilos de oro que lo hacen muy selectivo.

**Palabras clave:** Biosensores, metales pesados, agua contaminada, agua superficial, detección, transductores.



## **ABSTRACT**

This thesis is aimed at evaluating certain biosensors, since at a global level the actions carried out by human beings have contributed to the rise of heavy materials, with surface water being affected as it is a discharge point, being a high environmental problem as a result of its high toxicity rates for related organisms. This work carried out a systematic review about evaluating the efficacy of biosensors in surface waters, according to the sensitivity of the transducer to detect heavy metals in surface waters. As a basis for this study, articles that were gathered from the databases by MDPI, Scopus, Proquest, Pubmed, Science Direct were used. Inclusion methods were used, of which 30 articles met the requested characterization. It was possible to demonstrate that biosensors are very versatile and combinable composite elements that, by interacting the derivative of the living element with the transducer, can obtain very precise, efficient and selective results. A relationship will be established between the derivative of the living element and the type of transducer where, in the case of using DNA and an electrochemical transducer, it detects the analyte in very short detection times, becoming very efficient, since its composition has threads of gold that make it very selective.

**Keywords:** Biosensors, heavy metals, water pollution, surface water, detection, transducers.

## I. INTRODUCCIÓN

A nivel global, se han venido desarrollando diferentes técnicas para la detección de metales pesados las cuales permiten la detección específica y mediciones rápidas de sus concentraciones, asimismo es importante para conocer los problemas que genera la contaminación del agua a nivel mundial (Ledezma et al., 2021, p. 6). En ese mismo orden Odošević, Šestan y Begić (2019) indican que existe cierta dificultad para proteger las aguas superficiales de la contaminación con metales pesados, por lo tanto es necesario la búsqueda de nuevos métodos analíticos ya que las técnicas convencionales no cumplen con el requerimiento de monitoreos continuos (p. 14).

Por eso se presenta esta nueva tecnología, que puede hacerle frente a los problemas de las técnicas convencionales, actualmente se vienen desarrollando una elevada cantidad de biosensores que detectan de forma cuantitativa a un analito mediante un elemento biológico (Salouti y Derakhshan, 2020, p. 515). Aunque según Mau et al. (2021) menciona que los biosensores presentan moléculas usadas como elementos de reconocimiento, el cual debe llegar a ser de alta sensibilidad y buena estabilidad para ser almacenado durante periodos largos (p. 10). Enfocarlo desde el punto de vista de las técnicas de los biosensores,

Sin embargo, según Duan et al. (2019) indica que los biosensores son un dispositivo con un gran potencial para el monitoreo ambiental (p. 6073), por ello se considera para hacer frente a la contaminación por metales pesados ya que por su permanencia y traslado a largas extensiones llegan a los cuerpos de aguas superficiales, poniendo en riesgo a la biota (Flores et al. 2018, p. 42), de esta manera pueden provocar graves consecuencias a los recurso hídrico, la salud población y al ecosistema (WWAP, 2017, p. 61 - 63), por ello es fundamental el enfoque de novedosas técnicas para la detección de metales pesados como los biosensores que son instrumentos es de gran escala, alta sensibilidad y especificidad biológica, que facilita la detección en línea mediante la incorporación inteligente y rápida obtención de señales (Chen et al., 2021,| p. 1).

Los metales pesados representan un reto en la detección, ya que estos contaminantes se encuentran en varios estados como en aguas superficiales, que pueden encontrarse en suspensión o solución, llegando a transportarse a largas distancias por medio del agua viéndose encontrados los metales pesados en el fondo. En los ríos pueden afectarse dependiendo de la estabilidad, las grosellas y las características físicas del contaminante. Asimismo, se pueden transportar mediante los vientos y las corrientes hasta los mares y océanos (Briffaa et al., 2020, p. 6).

Los biosensores se presentan como un dispositivo analítico que relaciona un elemento biológico con un transductor físico-químico, obteniendo una detección rápida, detallada y sensible de elementos individuales o agrupados (Guambo et al., 2017, p. 23), pero que la mayoría de los biosensores son elaborados con sistemas complejos y estos influyen en sus resultados analíticos (Benedetto et al., 2019, p. 2).

Sin embargo, Singh (2020) indica que los biosensores tienen aplicaciones para varios campos entre ellos el biocontrol de contaminantes (p. 318), además Odošašić et al. (2019) hace referencia a bastantes estudios que han encontrado de biosensores de células completas, se utilizaron transductores electroquímicos y ópticos, por lo que existe mayor auge para estos tipos de transductores (p. 13), de acuerdo a su elemento biológico los biosensores de ADN, enzimas y proteínas unidos a los metales, son herramientas óptimas para la obtención de datos in situ frente a metales pesados (Gordon et al., 2017, p. 2).

Es por ello, que la investigación se realizará en base a los biosensores debido a que son confiables y rápidos para el monitoreo del agua para diferentes metales pesados, asimismo algunos son portátiles y medibles en corto plazo (Odošašić et al., 2019, p. 1), además se presentan como un dispositivo analítico que relaciona un elemento biológico con un transductor físico-químico, obteniendo una detección rápida, detallada y sensible de elementos individuales o agrupados (Guambo et al., 2017, p. 23).

De este modo de acuerdo a la realidad problemática, se propuso el problema general: ¿Qué biosensores ambientales permiten la detección de metales

pesados en aguas superficiales?, además la investigación está enfocada en evaluar dichos biosensores, ya que según Hairom et al. (2021) indica que a nivel mundial las actividades humanas han contribuido al aumento de metales pesados, siendo las aguas superficiales los lugares de descarga (p. 1). De esta manera la investigación se justifica en la necesidad de evaluar los dispositivos analíticos (biosensores) para la detección de metales pesados en diferentes aguas superficiales, ya que estos pueden detectar metales pesados en condiciones de laboratorio así como in situ, siendo esto último, muy importante debido a que los métodos convencionales en su mayoría se realizan en laboratorio y deben seguir los protocolos de muestreo correctamente, para obtener un resultado confiable. Por esta razón, esta investigación nos brindará un aporte notable que presentan los biosensores para el control y monitorización ambiental (Salouti et al., 2020, p. 517), por lo que sirve como contribución para el monitoreo en futuras investigaciones y se logre biodetectar a tiempo evitando mayor contaminación por metales pesados en aguas superficiales, siendo perjudicial si se encuentra en gran cantidad en el medio ambiente y los seres vivos, ya que estos no son biodegradables y tienden a bioacumularse en organismos vivos a través de la cadena trófica (Naseri et al., 2020, p. 6). Así mismo la justificación social se respalda en promover un uso más sostenible del recurso agua ya que de esta manera al aplicarse la tecnología de los biosensores nos permitiría llevar a cabo un monitoreo ambiental de una manera fácil, rápida y precisa.

Como objetivo general tenemos, evaluar la eficacia de los biosensores en aguas superficiales, según la sensibilidad del transductor para detectar metales pesados en aguas superficiales. Consideramos los siguientes objetivos específicos.

Evaluar la eficacia de los biosensores en la detección de metales pesados según el tipo de agua superficial, evaluar la sensibilidad de los transductores empleados en aguas superficiales para la detección de metales pesados, evaluar la eficacia y tiempo de detección de los biosensores en aguas superficiales según el tipo de elemento vivo.

## II. MARCO TEÓRICO

Para los antecedentes internacionales se citó a Sciuto et al. (2019), en su investigación titulada “Biosensors in water quality and safety monitoring an example of a whole cell based miniaturizable sensor for optical detection of  $\text{Hg}^{2+}$  in water”, tuvo como objetivo plantear una estrategia para la detección frente a la evaluación del mercurio en el agua. Los resultados mostraron que el dispositivo de detección se caracterizó por ser miniaturizado, con el uso de células enteras asimismo es capaz de medir concentraciones de mercurio en el agua con un límite de detección de 0.25 mg / L, cabe recalcar que este dispositivo detecta concentraciones menores a los umbrales establecidos a nivel mundial para concentraciones de mercurio en el agua. Se concluyó que el dispositivo tiene base para más estudios de este modo lograr desarrollarse como una tecnología portátil y rápida con la finalidad de aplicarse de manera in situ (p. 11).

De igual manera, se citaron a Gordon, Tan y Stillman (2017), en su investigación titulada “A simple metallothionein biosensor for improved detection of arsenic and mercury”, lo realizó para describir la capacidad que tiene la proteína metalotiónéina con la unión a metales para obtener mayor eficacia en un sensor sencillo asimismo económico. Los resultados muestran que el uso de metalotiónéina mejoró el sistema llegando a captar concentraciones bajas llegando a ser útil para el monitoreo en el medio ambiente ya que se probaron en fuentes de agua contaminada. Finalmente llegaron a la conclusión que la metalotiónéina proporcionaba un sensor sencillo, específico, de bajo costo y sensible presentado para los metales tóxicos  $\text{As}^{3+}$  y  $\text{Hg}^{2+}$ . Aunque sus límites tienen dificultad para afrontar las necesidades para el monitoreo en agua potable (p. 8). Asimismo, se citaron a Pandey, Sachan y Singh (2018), en su investigación titulada “Electrochemically modified reduced graphene oxide with electrodeposited thionine and horseradish peroxidase for hydrogen peroxide detection and chromium inhibitory measurement”, menciona como objetivo fabricar un biosensor para la detectar la concentración de  $\text{Cr}^{6+}$  mediante la enzima peroxidasa de rábano picante. Los resultados del límite de detección del biosensor para medir las concentraciones de  $\text{Cr}^{6+}$  llegaron a ser 0,2  $\mu\text{M}$ . Y se concluyó que el sensor elaborado presenta una buena reproducibilidad, siendo

fundamental para la elaboración de nuevos dispositivos para los análisis del agua (p. 684).

Por consiguiente, se citaron a Wang et al. (2020), en su investigación titulada “A signal amplified whole cell biosensor for sensitive detection of  $Hg^{2+}$  based on the enhanced  $Hg^{2+}$  reporter module”, en ella se desarrolló un dispositivo para una detectar mercurio mediante una señal del mutante de proteína fluorescente verde (GFP). Se obtuvieron como resultados un óptimo rango de 1 a 10,000 nmol / L y un límite de detección de 1.3 nmol / L asimismo se evaluó en aguas de lago y de grifo. De lo que se concluye que el biosensor con una amplia señal que llegó a tener un límite de detección menor a la mayoría de los biosensores elaborados (p. 98).

Del mismo modo se citaron a Adekunle, Raghavana y Tartakovsky (2019), en su investigación titulada “Online monitoring of heavy metal-related toxicity with a microbial fuel cell biosensor”, en la cual se evaluó la aplicabilidad del biosensor del tipo MFC (pila de combustible microbiana) en el monitoreo en línea en períodos. Se tuvo como resultado que el biosensor es altamente sensible para la detección del cadmio llegando a tener un límite de detección de 0.001 mg/L Los autores concluyen que el biosensor puede realizar el control en línea de la concentración de metales pesados en cortos períodos (5 minutos) empleando el biosensor del tipo MFC. También, las respuestas del biosensor presentaban alta correlación ( $R^2= 0.92$ ) (p. 383). También se citaron a Liu, Wang y Yu (2021), en su trabajo de investigación titulada “Visually multiplexed quantification of heavy metal ions in water using a volumetric bar graph chip”, se planteó desarrollar un biosensor de laboratorio dentro de un chip para el monitoreo in situ para mediciones en tiempo real a los metales pesados dentro del agua. Como conclusión se logró evaluar la viabilidad que usa el biosensor mediante las células completas en la detección de arsénico en agua potable, muestras artificiales y vertederos previamente tratados (p. 7).

Además, se citó a Hui (2021) en su trabajo de investigación titulada “A disposable electrochemical biosensor based on silver / HPMC / chitosan / urease modified screen-printed carbon electrodes for the detection of  $Hg^{2+}$  in water”, tuvo como

objetivo describir la elaboración de un biosensor electroquímico que sea desechable para detectar  $\text{Hg}^{2+}$  dentro del agua. En conclusión, se demostró que el dispositivo mostró eficacia en la aplicación en temperatura ambiente, no es tóxico y es de bajo costo asimismo presenta un rango lineal entre 5 a 25  $\mu\text{M}$  en la detección de  $\text{Hg}^{2+}$  (p. 13). Por consiguiente, para la presente investigación se considera estudiar y conocer, los siguientes términos.

La clasificación de las aguas superficiales según Hayati et al. (2021, p. 6) se presenta en tres grupos que son aguas perennes, este es el tipo de agua superficial que continúa permanentemente durante todo el año. Las aguas superficiales efímeras también conocidas como semi permanentes, este tipo de aguas incluyen pequeñas fuentes de agua, como pozos de agua, pequeños arroyos y lagunas. Finalmente, los tipos de aguas artificiales que existen únicamente en ciertos periodos del año que pueden ser estructuras artificiales como canales, embalses, pozos, humedales, y presas. Cabe recalcar que este último tipo de agua se usa mayormente como riego y consumo en agua potable.

Los metales pesados según Jayamurali et al. (2021, p. 324) Los metales son componentes que se originan en la naturaleza y están presentes en la corteza terrestre, están clasificados como metales alcalinos, básico y de transición, que tienen propiedades como la conductividad eléctrica, maleabilidad, ductilidad, etc. Tienen la capacidad de resiliencia de estos metales en distintas áreas de la ciencia y la tecnología. Tienen diversas aplicaciones industriales, agrícolas, domésticas, médicas y tecnológicas convirtiéndose en un contaminante ambiental, donde la fauna y la flora de los ecosistemas quedan expuestas y vulnerables ante estas toxinas que generan efectos perjudiciales y riesgos nocivos. La toxicidad es un fenómeno de solubilidad de estos metales que tiene una variación en función de la dosis, duración, solubilidad, vía de exposición. Por eso es necesario y muy importante entender el mecanismo detrás de la toxicidad del metal para que posteriormente se pueda tomar las medidas correctivas para que sea tratado con unas condiciones clínicas. Asimismo, según Masindi et al. (2018, p. 118) algunos metales son bastante tóxicos en pocas cantidades como el Zinc (Zn), Plomo (Pb), cromo (Cr), Níquel (Ni), Cadmio (Cd), Zinc (Zn) y selenio (Se).

Los biosensores son dispositivos que convierten una respuesta en señal eléctrica. Además, para que sea específico no debe depender de parámetros físicos como temperatura, pH entre otros además puede ser reutilizable (Bollela y Katz, 2020, p. 1). Los biosensores los componen principalmente dos elementos, un receptor biológico que consigue interactuar con una molécula diana y un componente inerte llamado transductor que tiene una influencia en los sensores eléctricos o electroquímicos, ópticos y de masa mediante esta interacción. Esta unión de los dos elementos produce un reconocimiento del analito, donde los resultados son transformados mediante una señal cuantificable, para que el biosensor tenga éxito al momento del monitoreo, dicha molécula empleada tiene un papel muy importante y crucial ya que la sensibilidad, especificidad y detección sobre el analito depende de la molécula antes mencionada. (Dhiman et al., 2019, p. 3).

Los biosensores se clasifican según el tipo de transductor, donde Leboukh et al. (2018, p. 2) menciona que se pueden clasificar en electroquímicos, térmicos, piezoeléctricos, ópticos en base al transductor. Asimismo, se le da una clasificación en base al principio de reconocimiento donde se encuentran los enzimáticos, de células completas, receptores no enzimáticos y de ADN. De este modo, los biosensores electroquímicos se definieron como un dispositivo donde la energía circula por medio del sistema para obtener la cuantificación de un ejemplar, donde se produce la reacción redox involucrando al analito, se caracterizan por ser en su mayoría estables, cuantificación rápida, bastantes sensibles y son resistentes a interferencias. (Tetyana et al., 2021, p. 8). Por consiguiente, se tiene a los biosensores ópticos que según la Chen y Wang (2020) indican que tienen alta sensibilidad, confiabilidad, durabilidad además pueden ser parte de un chip. A continuación, se tiene a los biosensores piezoeléctricos donde Malhotra y Pandey (2017, p. 14) su transductor está hecho de material piezoeléctrico como el cuarzo en conjunto con el material biosensor o biorreceptor que se adhiere al material piezoeléctrico que vibra con repeticiones. La repetición es controlada por una bandera eléctrica externa que ofrece una estimación de corriente y cuando el analito objetivo se combina con el material de detección, la respuesta producirá un movimiento recurrente donde originará alteraciones en la lectura de la corriente que se pueden analizar a la masa.



Entre sus aplicaciones tienen diversas tales como las mediciones de actividad enzimática, parámetros no acuosos, clínicos e híbridos y monitoreo de procesos. (Vasuki et al., 2019, p. 262). Los biosensores se clasifican según su elemento de biorreconocimiento donde, los biosensores enzimáticos son los que tienen enzimas que se llegan a inmovilizar de forma cercana al transductor, de esta manera al mezclarse producen una señal que mide la concentración de algún analito. (Kaur et al., 2019, p. 215). Para biosensores de células enteras, según Gui et al. (2017, p. 2) menciona que estos llegan a detectar una amplia magnitud de sustancias, de este modo son sensibles en una variación de estado electroquímico para la muestra del medio ambiente, células o tejido. Para los biosensores de ADN según Saidur, Aziz y Basirun (2017, p. 127) indican que los biosensores de ADN se usan en forma de elemento de reconocimiento de la diana asimismo se le denomina sonda ss-DNA, donde el principio se fundamenta en la hibridación que viene a tener la sonda ss-DNA junta a la diana complementaria ss-DNA o mediante la alteración de la estructura que tiene la sonda ss-DNA mediante moléculas del analito. De este modo se produce la variación en el biosensor, de este modo da resultado una señal. Para los no enzimáticos según Sadasivuni y Dayakar (2020, p. 1) se basan en nanomateriales para la detección de analitos de manera individual. Las características de los biosensores según Naresh y Lee (2021, p. 6) son la selectividad es la característica más importante que debe de considerar al momento de elegir un biorreceptor para un biosensor, ya que un biorreceptor puede biodetectar a una molécula del analito diana en particular en una muestra que esté compuesto de mezclas con especias y con contaminantes no deseados; la sensibilidad, es la cantidad mínima de analito que se detecta o identifica adecuadamente con un número mínimo de pasos y con una concentración muy baja, de este modo la respuesta que envía el biosensor puede variar linealmente de acuerdo a la concentración (Bhalla et al., 2016)

### III. **METODOLOGÍA**

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

La investigación de acuerdo a su propósito es básico ya que se desarrolló en base a otros artículos de investigación, de acuerdo a su nivel es de tipo descriptivo, según la naturaleza de sus datos es cualitativa, según su medio de obtención de datos es documental de tipo revisión sistemática, en cuanto al tipo de diseño es no experimental de corte descriptivo ya que se realizó la observación de la información sin alguna manipulación de las variables de donde se podrá observar las características de estos, asimismo la información que se recopiló fue en un período no mayor a 6 años.

#### **3.2 Categorías, Subcategorías y matriz de categorización**

Para la matriz se tomó en cuenta los tipos, características que deben tener los biosensores, en la tabla 1 se detalló la matriz de categorización que señala el título, problemas de investigación, preguntas de investigación, objetivo general, objetivo específico, las categorías y subcategorías que van acorde a las áreas de interés de la investigación. Dentro de las categorías se consideró a los tipos de transductores, tipos de aguas superficiales, tipos de biosensores según su elemento vivo. Que se muestra en la tabla de anexos.

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

El escenario de estudio lo conformaron las bases de datos de donde se recopiló los artículos, las bases de datos son las siguientes plataformas: Pubmed, Sciencedirect, EBSCO host, Scopus, Proquest, Multidisciplinary Digital Publishing Academy de donde se realizó la recopilación de información.

#### **3.4 Participantes**

Lo conformaron los artículos obtenidos de las plataformas digitales que corresponden al escenario de estudio de donde se realizó la recopilación

de información. Y se consideró que tengan relevancia y que cumplan con los criterios de selección.

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

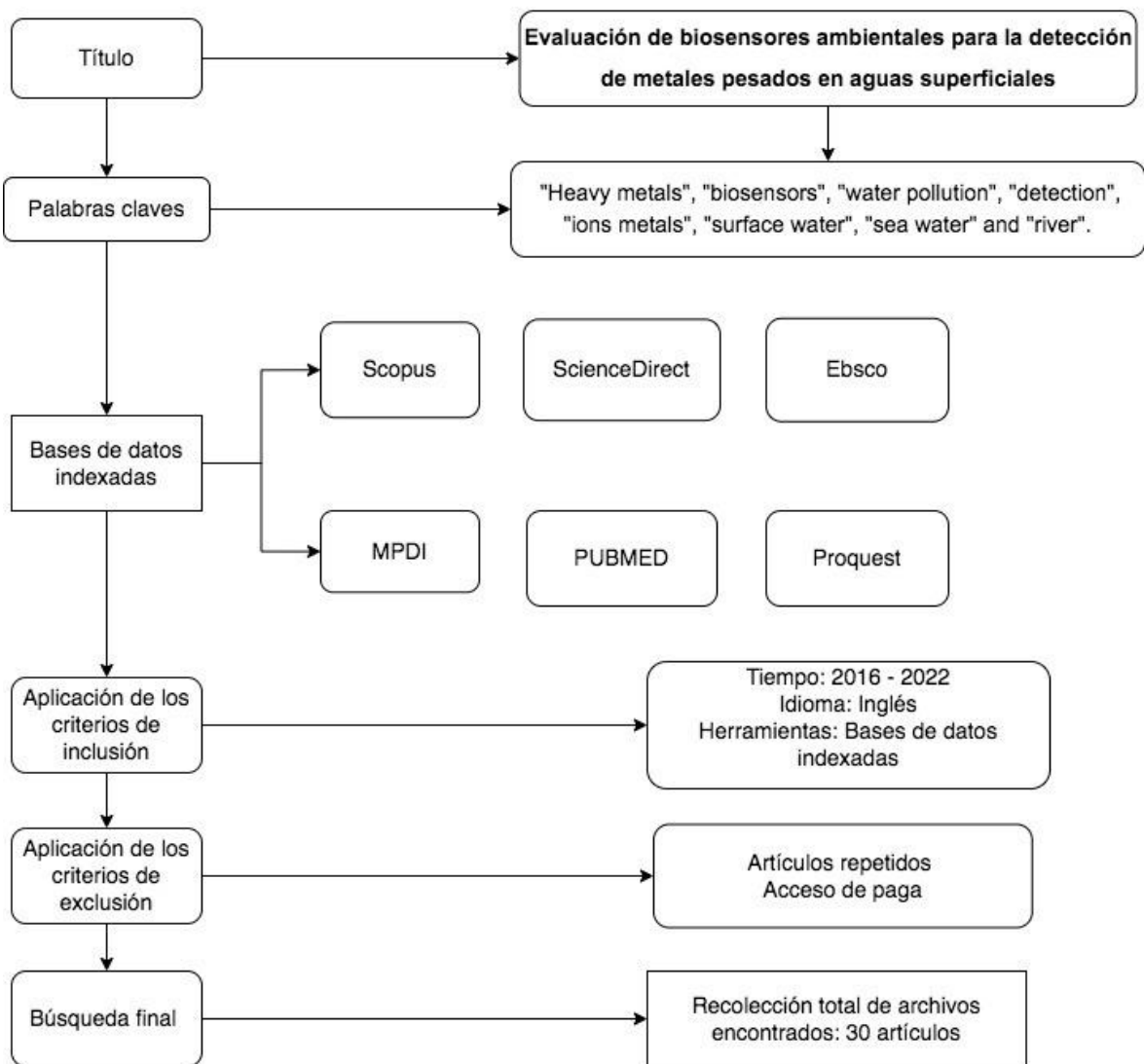
La técnica que se empleó es el análisis documental ya que se elaboró una revisión de la literatura mediante artículos recopilados de bases de datos indexadas. El instrumento que se empleó fue el software de Microsoft Office Excel, para la búsqueda de información, se usó las palabras claves que estén relacionadas con el tema central, es decir con la evaluación de los biosensores en la detección de metales pesados en aguas superficiales.

### **3.6 Procedimiento**

Para el proceso de recolección de la información se tuvo que seguir los pasos de la figura 1. Donde se fijó el tema de investigación posteriormente se definieron las palabras claves representativas y las bases de datos indexadas para recopilar la información para hacer la búsqueda de los artículos del tema de interés. Asimismo se consideró como actividades previas el planteamiento de los métodos de exclusión e inclusión y las palabras correspondientes para la búsqueda de los documentos. Los artículos fueron seleccionados con acceso libre, en un período no mayor a 6 años, de carácter científico y en idioma inglés. De este modo sólo se recolectaron aquellos que se enfoquen en el concepto de biosensores empleados en la detección de metales pesados en aguas superficiales. Para la recolección mediante la base de datos se utilizaron las siguientes palabras claves en idioma inglés: "Heavy metals", "biosensors", "water pollution", "detection", "surface water", "transducer" y los conectores como "AND", "OR" para unir las palabras claves y de esta manera se filtre mejor la información. De acuerdo a ello, se realizó un diagrama de flujo para la búsqueda de los artículos. Posteriormente de la recopilación se llegó a analizar 30 artículos y se organizó mediante el programa de Microsoft Excel a través de columnas para que posteriormente se extraiga los valores como autores, analito, sensibilidad, tiempo de detección, derivado

del elemento vivo, tipo de transductor, tipo de agua. Finalmente los resultados se logró reagrupar mediante tablas acorde a los objetivos específicos, hasta llegar con la discusiones donde se pudo contrastar la información obtenida con la de otros autores, posteriormente se obtuvo las conclusiones que respondieron cada uno de los objetivos específicos y finalmente en el apartado de las recomendaciones se precisó sugerencias para futuras investigaciones.

Figura 1. Diagrama de flujo para la búsqueda de artículos.



Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 1. Bases de datos y sus palabras claves**

Bases de datos	Palabras clave
MDPI	"Heavy metals" AND "biosensors" AND "water pollution" AND "detection" AND "transducers".
Scopus	"Heavy metals" AND "biosensors" AND "water pollution" AND "detection" AND "transducers".
Proquest	"Heavy metals" AND "biosensors" AND "water pollution" AND "detection" AND "transducers".
Pubmed	"Heavy metals" AND "biosensors" AND "water pollution" AND "detection" AND "transducers".
Science Direct	"Heavy metals" AND "biosensors" AND "water pollution" AND "detection" AND "transducers".
EBSCO host	"Heavy metals" AND "biosensors" AND "water pollution" AND "detection" AND "transducers" AND "surface water" OR "sea water".

Fuente: Elaboración propia.

### **3.7 Rigor científico**

Para esta investigación se empleó únicamente información artículos, que estén acreditados para que así se garantice el rigor científico, la fiabilidad y confianza. Toda la información que fue seleccionada para realizar las descripciones teóricas.

### **3.8 Método de análisis de datos**

La información se agrupó acorde a las categorías y subcategorías, el método comprende la revisión sistemática de todos los documentos que aparecen en la base de datos que se consideró. Para organizar los artículos encontrados se empleó el programa de Microsoft Office Excel el cual creó distintas hojas de cálculo para ordenarlo de acuerdo a los objetivos específicos.

### **3.9 Aspectos éticos**

Para la presente investigación se garantiza honestidad durante el manejo en la recopilación y tabulación de los datos, así como en los antecedentes donde se realizó de manera objetiva respetando los derechos de autor de cada una de las publicaciones que fueron seleccionadas y que formaron parte de la investigación.

#### IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

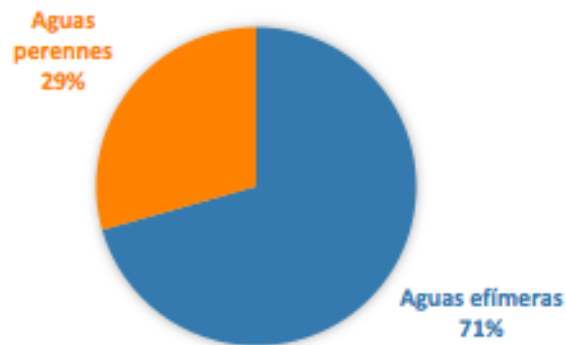
A continuación se muestra en la tabla 2 los resultados ordenados según la clasificación de aguas superficiales, tipos de agua y en base al primer objetivo específico, con método in situ y diseño pre experimental.

**Tabla 2.** *Evaluación de la eficiencia de los biosensores en la detección de metales pesados según el tipo de agua superficial*

Clasificación de aguas superficiales	Tipos de agua	Sensibilidad (mg/L)	Tiempo de detección de biosensor (min)	Analito	Autor(es)
Aguas efímeras	Agua de río	0.2000	18	Cr <sup>6+</sup>	Shuai Zhao et al.
Aguas efímeras	Agua de río	0.9900	30	Cr <sup>6+</sup>	Li-Chun Wu et al.
Aguas efímeras	Agua de río	0.0800	2	Cr <sup>6+</sup>	Sedky HA Hassan et al.
Aguas efímeras	Agua de río	0.0041	5	Pb <sup>2+</sup>	Juyeol Bae et al.
Aguas efímeras	Agua de río	0.0250	1	Hg <sup>2+</sup>	Emanuele Luigi Sciuto et al.
Aguas efímeras	Agua de río	0.0079	60	Cu <sup>2+</sup>	Cregut, Mickael et al.
Aguas efímeras	Agua de río	0.5000	20	Cr <sup>6+</sup>	Li Chun Wu1 et al.
Aguas efímeras	Agua de río	3.5000	30	Pb <sup>2+</sup>	Mohanraj P. et al.
Aguas efímeras	Agua de río	0.0352	30	Pb <sup>2+</sup>	Junping mamá et al.
Aguas efímeras	Agua de río	0.4012	5	Hg <sup>2+</sup>	Guo, Zizhanga et al.
Aguas efímeras	Agua de río	0.9900	2	Cu <sup>2+</sup>	Zahra Tabibi et al.
Aguas efímeras	Agua de río	0.0063	15	Hg <sup>2+</sup>	Shunbi Xie
Aguas perennes	Agua de mar	0.0013	10	Zn <sup>2+</sup>	Aman Khan et al.
Aguas perennes	Agua de mar	0.0270	30	Hg <sup>2+</sup>	kapil sadani et al.

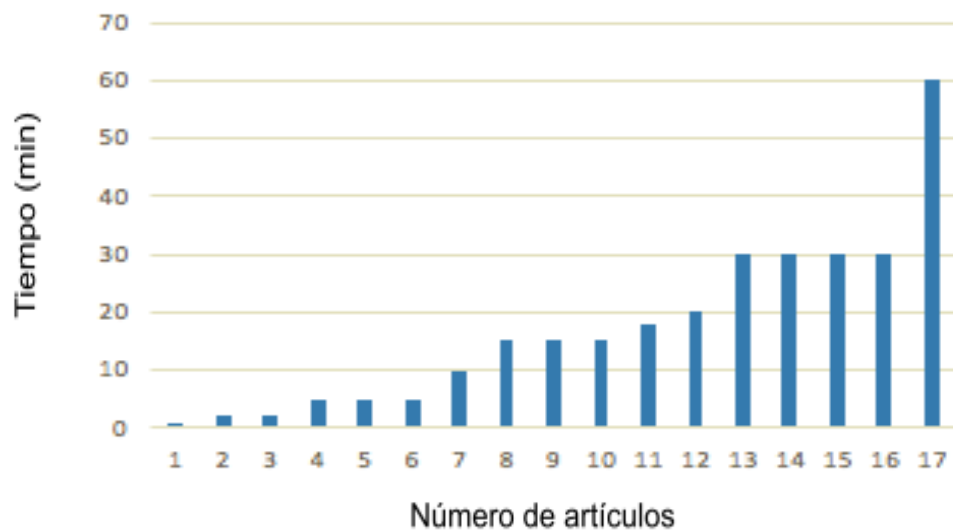
Aguas perennes	Agua de mar	0.9700	15	Zn <sup>2+</sup>	Mojtaba Mohseni et al.
Aguas perennes	Agua de mar	0.0005	15	Hg <sup>2+</sup>	Kandasamy et al.
Aguas perennes	Agua de mar	0.0274	5	Hg <sup>2+</sup>	Yunpeng Xing et al.

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 2.* Tipos de aguas superficiales con método in situ.

De la figura 2 se puede observar que existe una mayor cantidad de aguas efimeras con un 71% y un 29% de aguas perennes, de los cuales todos estos artículos analizados son con método in situ, siendo un total de 17 artículos, precisados con mayor detalle en la figura 3.



*Figura 3.* Tiempo de detección en aguas superficiales con método in situ.

De la figura 3 se puede apreciar el tiempo de detección en minutos en la parte superior izquierda y en la parte inferior horizontal el número de artículos analizados.



A continuación se muestran los resultados de la tabla 3 ordenados según la clasificación de aguas superficiales, tipos de agua y base al primer objetivo específico, con método ex situ y diseño pre experimental.

**Tabla 3.** *Evaluación de la eficiencia de los biosensores en la detección de metales pesados según el tipo de agua superficial*

Clasificación de aguas superficiales	Tipos de agua	Sensibilidad (mg/L)	Tiempo de detección de biosensor (min)	Analito	Autor (es)
Aguas efímeras	Agua de río	0.9800	1	Cd <sup>2+</sup>	Jingting Wang
Aguas efímeras	Agua de río	10	15	Cu <sup>2+</sup>	Naik et al.
Aguas efímeras	Agua de río	1	5	Cu <sup>2+</sup>	Minh Hang Do et al.
Aguas efímeras	agua de río	2.6700	30	Cd <sup>2+</sup>	Chang Ye Hui
Aguas efímeras	Agua de río	1.0360	10	Pb <sup>2+</sup>	Luisa et al.
Aguas efímeras	Agua de río	6.6600	4	Cu <sup>2+</sup>	Dengbin Yu et al.
Aguas efímeras	Agua de río	0.0005	20	Pb <sup>2+</sup>	Kumar et al.
Aguas efímeras	Agua de río	0.0001	4	Hg <sup>2+</sup>	Hisham Abu Ali et al.
Aguas perennes	Agua de río	0.0004	30	Cr <sup>2+</sup>	CPN Ramley et. al.
Aguas perennes	Agua de mar	0.6800	15	Cu <sup>2+</sup>	Zhisong Cui et al.
Aguas perennes	Agua de mar	0.6018	15	Hg <sup>2+</sup>	Pennacchio et al
Aguas perennes	Agua de mar	0.0003	5	Pb <sup>2+</sup>	Noemí et al.
Aguas perennes	Agua de mar	0.2808	35	Hg <sup>2+</sup>	Yang Mei et al.

Fuente: Elaboración propia.

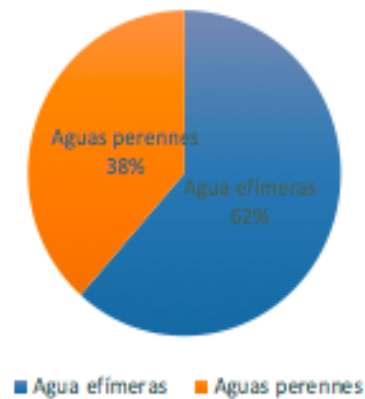


Figura 4. Tipos de aguas superficiales con método ex situ.

De la anterior figura 4 se puede observar que se analizó 13 artículos correspondientes a método ex situ, en donde le corresponde el 62% a aguas efímeras representadas por aguas de ríos y un 38% correspondientes a aguas perennes representadas por agua de mar. Además de la tabla 3 se observa que el valor de mayor sensibilidad fue de 0.0001 mg/L, su tiempo de detección fue de 4 minutos y el analito encontrado fue  $Hg^{2+}$ .

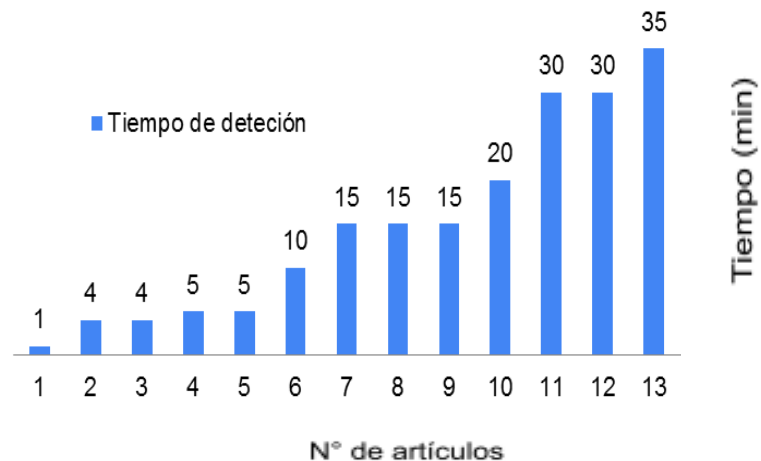


Figura 5. Tiempo de detección en aguas superficiales con método ex situ.

De acuerdo con los valores obtenidos según la tabla 2 y como resultados para el primer objetivo específico se evaluó la eficiencia de los biosensores mediante el

tiempo de detección y la sensibilidad para medir el analito, según el tipo de agua superficial. Así mismo en la tabla 2 con método in situ, el valor de mayor sensibilidad fue de 0.025 mg/L, y su tiempo de detección tuvo un valor de 1 minuto y el analito que se identificó fue  $Hg^{2+}$ . Estos resultados indican que existe una mayor cantidad en aguas efímeras correspondientes a aguas de río, según Zamora et al. (2021) indicaron que existe una mayor presencia de metales pesados en aguas efímeras de río debido a que existe un gran número de actividades antrópicas que desembocan en estos ambientes acuáticos, así mismo menciona a esta técnica de detección mediante los biosensores como una novedosa y eficiente tecnología que se puede emplear para monitoreos in situ.

Así mismo los valores obtenidos en la tabla 3 y como resultados para el primer objetivo específico donde se evaluó la eficiencia de los biosensores mediante el tiempo de detección y la sensibilidad para medir el analito, pero según el tipo de método ex situ. Tenemos el valor de mayor sensibilidad de 0.0001 mg/L presentes en aguas efímeras correspondientes a aguas de río, con un tiempo de detección de 4 minutos y el analito encontrado fue  $Hg^{2+}$  obteniendo resultados de manera rápida y precisa, de igual forma (Pennacchio et. al. 2022) diseñaron un biosensor para detectar mercurio obteniendo los valores de sensibilidad de 0.0005 mg/L y un tiempo de detección de 15 minutos en agua de río. donde demuestra que este biosensor es ideal para aguas superficiales principalmente en aguas de río debido a sus cualidades selectivas para la detección en analitos de  $Hg^{2+}$ .

En la figura 2 y 4, se observa los tipos de aguas superficiales según su método in situ y ex situ. Podemos observar que para el caso de la figura 2 con método in situ existe un mayor porcentaje de aguas superficiales efímeras, con 71% contrastando esta información con la de la figura 4 se puede observar un porcentaje de 62% representadas por las aguas superficiales efímeras. Según Fatemeh Ejeian et al. (2018) indica que existe una mayor presencia de agua contaminada de río por metales pesados que va en aumento, esto ha generado que exista una menor disponibilidad de agua de río empleada para el consumo humano.

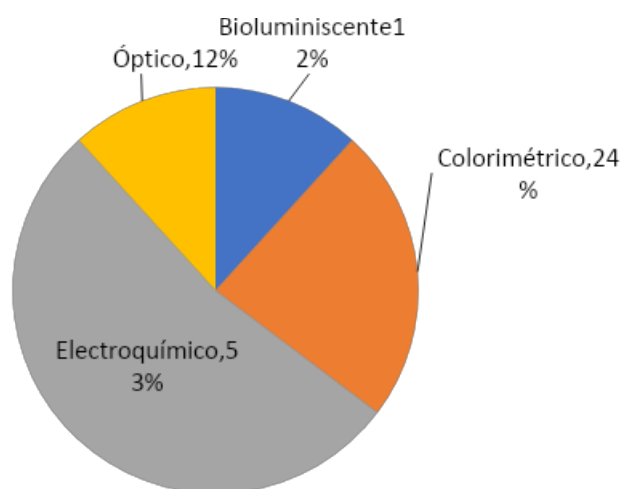
A continuación se muestran los resultados de la tabla 4 en base al segundo objetivo específico, con método in situ y diseño pre experimental.

**Tabla 4.** *Evaluación de la sensibilidad de los transductores empleados en aguas superficiales para la detección de metales pesados*

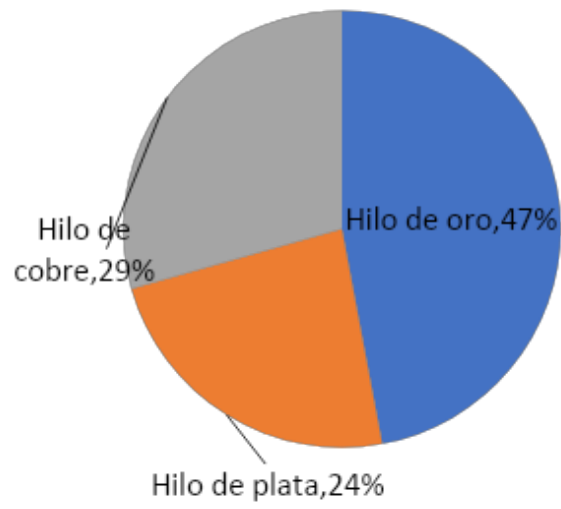
Tipo de transductor	Composición electrónica del transductor	Sensibilidad (mg/L)	Tiempo de detección de biosensor (min)	Analito	Autor(es)
Bioluminiscente	Hilo de plata	0.9700	15	Zn <sup>2+</sup>	Mojtaba et al.
Bioluminiscente	Hilo de oro	0.0274	5	Hg <sup>2+</sup>	Yunpeng et al.
Colorimétrico	Hilo de cobre	0.9900	30	Cr <sup>6+</sup>	Li-Chun et al.
Colorimétrico	hilo de oro	0.0041	5	Pb <sup>2+</sup>	Juyeol et al.
Colorimétrico	Hilo de oro	0.9900	2	Cu <sup>2+</sup>	Zahra et al.
Colorimétrico	Hilo de plata	0.0005	15	Hg <sup>2+</sup>	Kandasamy et al.
Electroquímico	Hilo de oro	0.0800	2	Cr <sup>6+</sup>	Sedky HA et al.
Electroquímico	Hilo de cobre	0.0079	60	Cu <sup>2+</sup>	Cregutl et al.
Electroquímico	Hilo de oro	0.0013	10	Zn <sup>2+</sup>	Aman Khan et al.
Electroquímico	Hilo de plata	0.5000	20	Cr <sup>6+</sup>	Li Chun Wu1 et al.
Electroquímico	Hilo de cobre	0.2000	18	Cr <sup>6+</sup>	Shuai Zhao et al.
Electroquímico	Hilo de plata	3.5000	30	Pb <sup>2+</sup>	Mohanraj P. et al.
Electroquímico	Hilo de cobre	0.0352	30	Pb <sup>2+</sup>	Junping et al.
Electroquímico	Hilo de oro	0.4012	5	Hg <sup>2+</sup>	Guo et al.
Electroquímico	Hilo de oro	0.0063	15	Hg <sup>2+</sup>	Shunbi Xie
Óptico	Hilo de oro	0.0250	1	Hg <sup>2+</sup>	Emanuele et al.
Óptico	Hilo de cobre	2.7000	30	Hg <sup>2+</sup>	kapil sadani et al.

Fuente: Elaboración propia.

De la anterior tabla 4 se puede visualizar que el transductor colorimétrico con hilos de plata logró obtener una sensibilidad de 0.0005 mg/L sobre el analito de  $Hg^{2+}$ , sin embargo el tiempo de detección fue de 15 minutos y el cuerpo de agua monitoreado fue en aguas perennes (agua de mar). Por otro lado, el transductor de tipo óptico con una composición de hilo de oro, obtuvo una sensibilidad de 0.025 mg/L empleado para la detección de  $Hg^{2+}$  en aguas efímeras correspondientes a las aguas de río. En el figura 6 se pueden observar los transductores que se encontraron en mayor cantidad fueron los electroquímicos con un 53%, seguido de los transductores colorimétricos con un 23%, así mismo los ópticos y bioluminiscentes se encontraron en el mismo porcentaje con un 12%. Finalmente en la figura 7 se puede apreciar a los transductores según la composición electrónica, donde se encontró con un 47% a la composición de hilos de oro, seguido con un 29% conformado por los hilos de cobre y por último con un 24% por los hilos de plata.



*Figura 6.* Tipos de transductores empleados en la detección de metales pesados con método in situ.



*Figura 7.* Composición electrónica del transductor con método in situ.

A continuación se muestran los resultados de la tabla 5 en base al segundo objetivo específico, con método ex situ y diseño pre experimental.

**Tabla 5.** *Evaluación de la sensibilidad de los transductores empleados en aguas superficiales para la detección de metales pesados*

Tipo de transductor	Composición electrónica del transductor	Sensibilidad (mg/L)	Tiempo de detección de biosensor (min)	Analito	Autor(es)
Bioluminiscente	Hilo de plata	0.0004	30	Cr <sup>2+</sup>	CPN Ramley et al.
Bioluminiscente	Hilo de plata	0.2808	35	Hg <sup>2+</sup>	Yang Mei et al.
Colorimétrico	Hilo de cobre	2.6700	30	Cd <sup>2+</sup>	Chang Ye Hui
Electroquímico	Hilo de plata	0.0003	5	Pb <sup>2+</sup>	Noemí et al.
Electroquímico	Hilo de oro	1	5	Cu <sup>2+</sup>	Minh Hang et al.
Electroquímico	Hilo de plata	0.6800	15	Cu <sup>2+</sup>	Zhisong Cui et al.
Electroquímico	Hilo de Oro	0.9800	1	Cd <sup>2+</sup>	Jingting Wang
Electroquímico	Hilo de cobre	10	15	Cu <sup>2+</sup>	Naik et al.
Electroquímico	Hilo de cobre	0.6018	15	Hg <sup>2+</sup>	Pennacchio et al

Electroquímico	Hilo de oro	1.0360	10	Pb <sup>2+</sup>	Luisa et al.
Electroquímico	Hilo de cobre	6.6600	4	Cu <sup>2+</sup>	Dengbin Yu et al.
Electroquímico	Hilo de oro	0.0001	4	Hg <sup>2+</sup>	Hisham et al.
Óptico	Hilo de oro	0.0005	20	Pb <sup>2+</sup>	Kumar et al.

Fuente: Elaboración propia.

De la anterior tabla 5 se puede apreciar que el transductor electroquímico con hilos de oro logró obtener una sensibilidad de 0.0001 mg/L sobre el analito de Hg<sup>2+</sup>, con un tiempo de detección fue de 4 minutos, monitoreado en aguas efímeras (agua de río). Por otro lado, el transductor fue de tipo electroquímico. A continuación en la figura 8 se puede apreciar a los tipos de transductores que se emplearon para aguas superficiales según el método ex situ, se observó que los encontrados en su mayoría fueron los electroquímicos con 69%, los bioluminiscentes presentes con un 15% y finalmente los transductores colorimétricos y ópticos igualados con un 8%. Por otro lado en la figura 9 se puede observar la composición electrónica del transductor donde se encontró que en su mayoría de los artículos analizados fueron correspondientes a hilos de oro con un 38%, por último los hilos de plata y cobre representan un 31%.



■ Bioluminisense ■ Colorimétrico ■ Electroquímico ■ Óptico

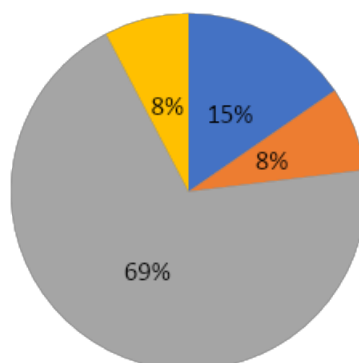


Figura 8. Tipos de transductores empleados en la detección de metales pesados con método ex situ.

■ Hilo de cobre ■ Hilo de plata ■ Hilo de oro

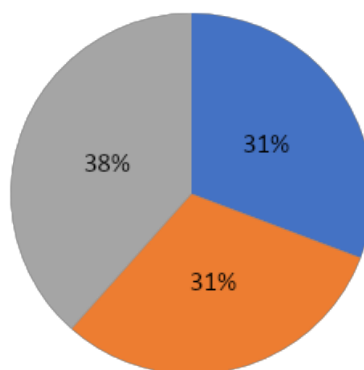
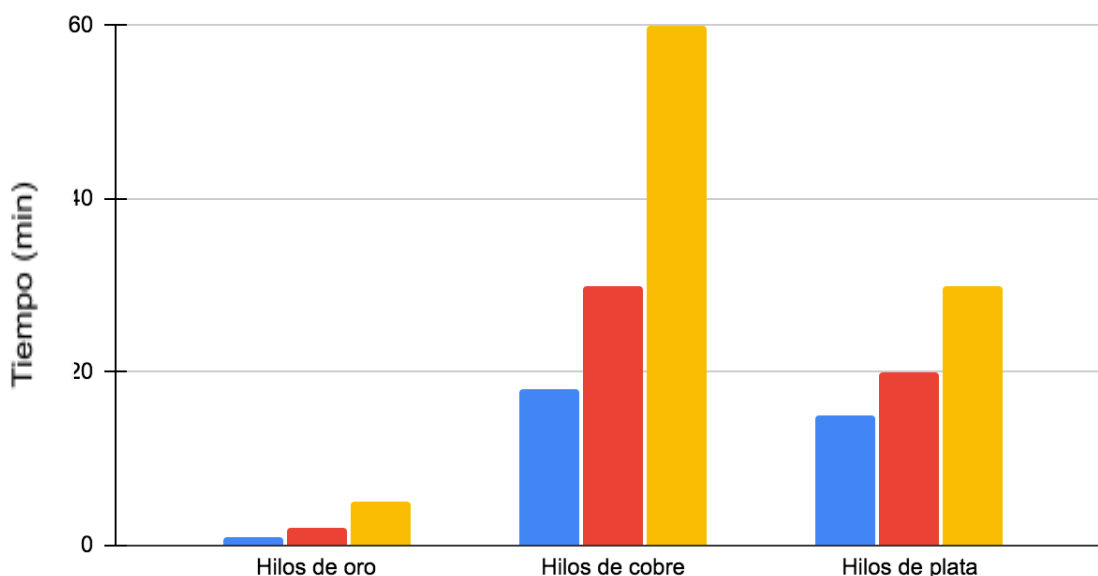


Figura 9: Composición electrónica del transductor con método ex situ.



*Figura 10.* Composición electrónica de los transductores.

De la figura 10 los colores rojo, azul y amarillo representan a tiempos de detección del biosensor, donde para el caso de los hilos de oro los tiempos encontrados fueron de 1, 2, 5, 10 minutos respectivamente, para el caso de los hilos de plata los tiempos encontrados fueron de 15, 20, 30 minutos respectivamente, finalmente para la composición electrónica de hilos de cobre los tiempos encontrados fueron de 18, 30, 60 minutos respectivamente. Se consideró estos tiempos porque se repiten en distintos monitoreos ambientales quedando solamente 3 y se consideró debido a que son los más representativos de la tabla 2. Donde el tiempo mínimo de detección fue de 1 minuto correspondiente al transductor de hilo de oro, el tiempo máximo que tardó un biosensor en la detección del analito fue de 60 minutos correspondiente a un transductor de tipo electroquímico con una composición electrónica de hilo de cobre.

De la tabla 4 se observa que el valor de mayor sensibilidad fue 0.0005 mg/L con un tiempo de detección de 15 minutos cuyo analito fue  $Hg^{2+}$  con un transductor colorimétrico y con hilos de plata, este transductor es muy efectivo para monitorear aguas superficiales contaminadas por metales pesados, sin embargo Kumar, D. Nanda (2022) presentó un biosensor con transductor óptico y elemento derivado vivo ADN con algunas especificidades como ser muy sensible, lo empleó

para un monitoreo ex situ y en tiempo real, para detectar agua contaminada por  $Pb^{2+}$  , el tiempo de detección fue de 20 minutos y su sensibilidad fue de 0.00049 mg/L.

A continuación se muestran los resultados de la tabla 6 en base al tercer objetivo específico, con método in situ y diseño pre experimental.

**Tabla 6.** Evaluación de la eficacia y tiempo de detección de los biosensores en aguas superficiales según el derivado del elemento vivo.

Tipos de derivados del elemento vivos	Especie del elemento vivo	Analito	Sensibilidad (mg/L)	Tiempo de detección de biosensor	Autor(es)
Enzimático	<i>Chromatiales</i>	Cr <sup>6+</sup>	0.0800	2	Sedky HA et al.
Enzimático	<i>E. aestuaril</i>	Cr <sup>6+</sup>	0.9900	30	Li-Chun Wu et al.
Enzimático	<i>E. Coli</i>	Pb <sup>2+</sup>	0.0041	5	Juyeol Bae et al.
Enzimático	<i>E. Coli</i>	Hg <sup>2+</sup>	0.0250	1	Emanuel et al.
Enzimático	<i>E. Coli</i>	Cu <sup>2+</sup>	0.0079	2	Cregut et al.
Enzimático	<i>E. Coli</i>	Zn <sup>2+</sup>	0.0013	10	Aman Khan et al.
Enzimático	<i>Exiguobacterium aestuarii</i>	Cr <sup>6+</sup>	0.5000	20	Li Chun Wu1 et al.
Enzimático	<i>Pseudomona aeruginosa</i>	Cr <sup>6+</sup>	0.2000	18	Shuai Zhao et al.
Enzimático	<i>Pseudomona aeruginosa</i>	Pb <sup>2+</sup>	3.5000	30	Mohanraj P. et al.
Enzimático	Quitosano en BSA	Hg <sup>2+</sup>	2.7000	30	kapil sadani et al.
Enzimático	<i>Vibrio sp.</i>	Zn <sup>2+</sup>	0.9700	15	Mojtaba Mohseni et al.
ADN	G-quadruplex	Pb <sup>2+</sup>	0.0352	30	Junping et. al.
ADN	ADN biotinilado	Hg <sup>2+</sup>	0.4012	5	Guo et al.
ADN	Aptámeros	Cu <sup>2+</sup>	0.9900	2	Zahra Tabibi et. al.
ADN	Aptámeros	Hg <sup>2+</sup>	0.0005	15	Kandasamy et al.

ADN	Exo nucleasa II	Hg <sup>2+</sup>	0.0063	15	Shunbi Xie
ADN	Oligonucleótido	Hg <sup>2+</sup>	0.0274	5	Yunpeng Xing et al.

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura 11 se puede apreciar derivado del elemento vivo con método in situ, donde se observa un porcentaje mayor del elemento enzimático de 65% y un porcentaje menor para el elemento de ADN con un 35% empleados para monitorear en aguas superficiales con método in situ.

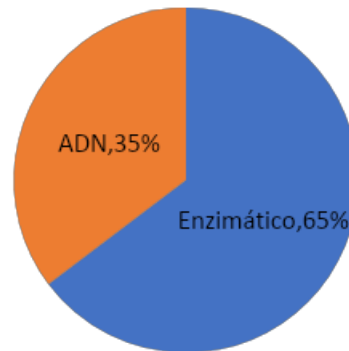


Figura 11. Derivado del elemento vivo con método in situ.

A continuación se muestran los resultados de la tabla 7 en base al tercer objetivo específico, con método ex situ y diseño pre experimental.

**Tabla 7.** Evaluar la eficacia y tiempo de detección de los biosensores en aguas superficiales según el derivado del elemento vivo.

Tipos de derivados de elementos vivos	Especie del elemento vivo	Analito	Sensibilidad (mg/L)	Tiempo de detección de biosensor	Autor(es)
Enzimático	<i>Acinetobacter baylyi</i>	Cr <sup>2+</sup>	0.0004	30	CPN Ramley et al.
Enzimático	Bacterias electrogénicas	Cu <sup>2+</sup>	1	5	Minh Hang Do et al.
Enzimático	<i>Acinetobacter baylyi</i>	Cu <sup>2+</sup>	0.6800	15	Zhisong Cui et al.
Enzimático	<i>E. coli</i>	Cd <sup>2+</sup>	2.6700	30	Chang Ye Hui
Enzimático	<i>Geobacter</i>	Cd <sup>2+</sup>	0.9800	1	Jingting Wang
Enzimático	<i>P. pastoris</i>	Cu <sup>2+</sup>	10	15	Naik et al.
Enzimático	<i>Pleurotus ostreatus</i>	Hg <sup>2+</sup>	0.6018	15	Pennacchio et al
Enzimático	Tirosinasa	Pb <sup>2+</sup>	1.0360	10	Luisa et al.
Enzimático	<i>Styela plicata</i>	Pb <sup>2+</sup>	0.0003	5	Noemí et al.
Enzimático	<i>Vibrio fischeri</i>	Cu <sup>2+</sup>	6.6600	4	Dengbin et al.
ADN	ADNzima	Pb <sup>2+</sup>	0.000	20	Kumar et al.
ADN	Aptámeros	Hg <sup>2+</sup>	0.0001	4	Hisham et al.
ADN	G-cuádruple	Hg <sup>2+</sup>	0.2808	35	Yang Mei et al.

De la anterior figura 12 se puede apreciar derivado del elemento vivo con método ex situ, donde se observa un porcentaje mayor del elemento enzimático de 77% y un porcentaje menor para el elemento de ADN con un 23% empleados para monitorear en aguas superficiales con método ex situ.

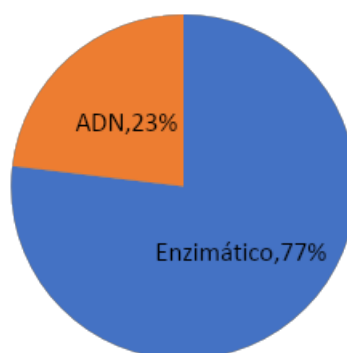


Figura 12. Derivado del elemento vivo con método ex situ.

Según los resultados mostrados en la tabla 6 y 7 se puede observar que la sensibilidad mayor fue de 0.0005 mg/L su derivado de elemento vivo fue ADN con métodos in situ y su analito fue  $Hg^{2+}$  y para la tabla 7 con método ex situ, su sensibilidad de 0.0001 mg/L, con tiempo de detección de 4 minutos y el analito fue  $Hg^{2+}$  en ambos casos sus derivados de elementos vivos fueron ADN obteniendo una alta sensibilidad. Sin embargo Mojtaba Mohseni et. al. (2018) nos indica que las bacterias bioluminiscentes tienen un más alto porcentaje en la detección de analitos en aguas de mar, este autor empleó a la bacteria *Vibrio sp*, con resultados óptimos teniendo resultados muy confiables y reales. Utilizó derivados de elementos vivos de ADN. Lo empleó para monitorear en el Mar Caspio y concluyó que es una gran opción para monitorear materiales tóxicos como mercurio y plomo. Así mismo Kandasamy Saravanakumar et. al. (2022) nos indica que para el muestreo en aguas marinas empleó aptámeros de ADN y su tiempo de detección fue de 15 minutos con un transductor electroquímico fue ideal emplear este derivado de elementos vivos ya que son resistentes al entorno y sobre todo selectivos con el analito de  $Hg^2$ , ya que en el mar también se encuentran toxinas que podrían alterar en los resultados. Por otra parte Jingting

Wang (2022) usó una bacteria bioluminiscente como derivado de elemento vivo y parte del biosensor lo usó para la detección de metales pesados en agua de mar obteniendo una sensibilidad de 0.0005 mg/L en aguas contaminadas por Hg<sup>2+</sup>.

Hisham Abu Ali (2019) desarrolló un biosensor que es altamente selectivo, empleo ADN como derivado de elemento vivo y como transductor electroquímico, el conjunto de estos dos elementos dió un biosensor eficiente y específico para los analitos de plomo y mercurio 0,0001 a 0.025 mg/L. De acuerdo a su elemento biológico los biosensores de ADN, enzimas y proteínas unidos a los metales, son herramientas óptimas para la obtención de datos in situ frente a metales pesados (Gordon et al., 2017, p. 2).



## V. CONCLUSIONES

- Se concluye que el biosensor más sensible encontrado fue del método ex situ con una sensibilidad 0.0001 mg/L presente en aguas superficiales con transductor electroquímico con hilos de oro y derivado de elemento tiempo de ADN, con una detección de 4 minutos.
- Se concluyó que para analitos de  $Hg^2$  en aguas superficiales de tipo perennes correspondientes a aguas de mar con método in situ los biosensores más eficientes fueron los compuestos por derivados de elementos vivos de ADN y transductor colorimétrico con hilos de plata obteniendo una sensibilidad de 0.0005 mg/L y un tiempo de detección de 15 minutos. Para aguas superficiales de tipo efímeras correspondientes a aguas de río, el más sensible 0.0063 mg/L
- Según los resultados tratados se logró establecer una relación entre derivado de elemento vivo y transductor donde para el caso de transductor es importante su composición y que ésta tenga elementos de buena calidad en su apartado electrónico, ya que esto permite recepcionar la señal medible y cuantificable en menos tiempo.
- Finalmente, se considera que la técnica de biodetección mediante biosensores sería de mucha ayuda en los monitoreos ambientales de aguas superficiales por su diversidad en los transductores como en los derivados de elementos vivos que lo hacen muy versátiles y eficientes.

## VI. RECOMENDACIONES

- Al momento de elaborar el biosensor es muy importante saber la finalidad ya que son muy combinables, que se emplean en diversas ocasiones para un fin específico.
- Para obtener un análisis más completo se debería usar bases de datos de acceso restringido o con membresía, ya que esta información podría servir para complementar conocimientos.
- En el Perú actualmente las tecnologías de monitoreo ambiental para agua son muy limitadas y en su mayoría están ligadas a procesos muy largos y tediosos, para ello se presenta a los biosensores como una técnica de biodetección muy novedosa, eficiente y práctica.

## REFERENCIAS

ADEKUNLE, Ademola, RAGHAVAN, Vijaya y TARTAKOVSKY, Boris, Monitoreo en línea de la toxicidad relacionada con metales pesados con un biosensor de celda de combustible microbiano, [en línea], Vol. 132, 1 de mayo de 2019, [Fecha de consulta: 18 de abril de 2022], Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566319302040?via%3Dihub> ISSN: 0956-5663

BHALLA, Nikhil [et al.] Introducción a los biosensores, [en línea], 2016, [Fecha de consulta: 18 de abril de 2022], Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4986445> ISSN: 4986445

BOLLELLA, Paolo y KATZ, Evgeny, Biosensores: avances recientes y desafíos futuros, [en línea], 18 de abril de 2022, [Fecha de consulta: 18 de octubre de 2021], Disponible en <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/22/6645/htm> ISSN: 1424-8220

BRIFFA, Jessica [et al.] Contaminación por metales pesados en el medio ambiente y sus efectos toxicológicos en los seres humanos, [en línea], 8 de septiembre de 2020, [Fecha de consulta: 18 de abril de 2022]. Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7490536/> ISSN: 10-1016

CHEN, Yangyang [et al.] Aptasensor reutilizable, fácil y rápido capaz de determinar en línea trazas de mercurio, [en línea], 19 de octubre de 2021, [Fecha de consulta: 18 de abril de 2022], Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016041202032136> ISSN: 106181

CHEN, Chen y Wang, Junsheng, Biosensores ópticos: una revisión exhaustiva y completa, [en línea], 2020, [Fecha de consulta: 18 de abril de 2022], Disponible en <file:///C:/Users/HP/AppData/Local/Temp/biosensorreview.pdf>

ISSN: 101039

DHIMAN, Abhijeet [et al.], Biosensor, [en línea], India, 2019, [Fecha de consulta: 18 de abril de 2022], Aplicaciones de los aptosensores en el cuidado de la salud, Disponible en <https://www.proquest.com/docview/2221379219/bookReader?accountid=37408>

ISBN: 5751612

DUAN, Rui [et al.] Detection of heavy metal ions using whispering gallery mode lasing in functionalized liquid crystal microdroplets, [en línea], Vol. 10, 2019, [Fecha de consulta: 23 de abril de 2022], Disponible en <https://www.osapublishing.org/boe/fulltext.cfm?uri=boe-10-12-6073&id=422897>

ISSN: 10006073

FLORES, Carmen [et al.] Evaluación de parámetros fisicoquímicos y metales pesados en agua y sedimentos superficiales de la Laguna de las Ilusiones, Tabasco, México, [en línea], 19 de octubre de 2021, [Fecha de consulta: 23 de abril de 2022], Disponible en file:///C:/Users/HP/AppData/Local/Temp/Revista%20IMTA%202018.pdf  
ISSN: 1024850

GORDON, Irvine [et al.] Un biosensor simple a base de metalotioneína para la detección mejorada de arsénico y mercurio, [en línea], Vol. 7, N° 1, 2017, [Fecha de consulta: 23 de abril de 2022], Disponible en <https://www.mdpi.com/2079-6374/7/1/14>  
ISSN: 2079-6374

GUAMBO, Alex [et al.] Potencial de biosensor ambiental de las pilas de combustible microbianas para la reducción de nitratos [en línea]. Vol 217, n° 11, diciembre de 2017. [Fecha de consulta: 30 de abril de 2022]. Disponible en: [https://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/november\\_2017/Vol\\_217/P\\_2958.pdf](https://www.sensorsportal.com/HTML/DIGEST/november_2017/Vol_217/P_2958.pdf)

GUI, Qingyuan [et al.] La aplicación de biosensores basados en células completas para su uso en análisis ambientales y en diagnóstico médico, [en línea], Vol. 17, 13 de julio de 2017, [Fecha de consulta: 30 de abril de 2022]. Disponible en <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/7/1623>  
ISSN: 1424-8220

HANIS, Nur [et al.] Una revisión de las aplicaciones nanotecnológicas para detectar y controlar la contaminación de las aguas superficiales, [en línea], 19 de octubre de 2021, [Fecha de consulta: 39 de abril de 2022], Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186421006805#b170>  
ISSN: 102032

HAIROM, Nur [et al.] Una revisión de las aplicaciones nanotecnológicas para detectar y controlar la contaminación de las aguas superficiales. Tecnología e innovación medioambiental. 19 de octubre de 2021. [Fecha de consulta: 7 de mayo de 2022], [en línea] Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186421006805#b170>  
ISSN: 2352-1864

JAYAMURALI, Dheepthi [et al.] Metal, óxidos metálicos y sulfuros metálicos para aplicaciones biomédicas, [en línea], enero 2021, [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2022], Una descripción general de la toxicidad de los metales pesados, [en línea]. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/348775670> [An Overview of Heavy Metal Toxicity](https://www.researchgate.net/publication/348775670)  
ISBN: 9783030564131

KAUR, Hardeep [et al.] Biosensores: Clasificación, Caracterización Fundamental y Nuevas Tendencias: Una revisión, [en línea], Vol. 8, 2018, [Fecha de consulta: 07 de mayo de 2022]. Disponible en

[https://www.researchgate.net/publication/339676977\\_Biosensors\\_Classification\\_Fundamental\\_Characterization\\_and\\_New\\_Trends\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/339676977_Biosensors_Classification_Fundamental_Characterization_and_New_Trends_A_Review)

ISSN: 2249-9571

KAUR, Jaspreet [et al.] Bioelectrónica y dispositivos médicos, [en línea], India, Serie de publicaciones Woodhead en materiales electrónicos y ópticos, 2019, [Fecha de consulta: 7 de mayo de 2022], 9 - Biosensores basados en enzimas. Disponible en

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081024201000133?via%3Dihub>

ISBN: 1000013

LEDEZMA, Camilo [et al.] Contaminación del agua por metales pesados: una mirada renovada a los peligros, métodos de remediación novedosos y convencionales [en línea], Vol. 22, 11 de diciembre del 2020, [Fecha de consulta: 14 de mayo de 2022]. Disponible en

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2352186421001528?token=E79398A6DFDDF379B6D7252557C80C563654DCD30F5CFB1956BFA0A51D331595260F61EF3B1BD6AC093A96E9E41017D3&originRegion=us-east-1&originCreation=2021022131642>

ISSN: 2352-186

LEBOUKH, S. [et al.] Desarrollo de un biosensor basado en enzimas para la monitorización medioambiental [en línea], 2018, [Fecha de consulta: 14 de mayo de 2022], Disponible en

[https://www.researchgate.net/publication/329972932\\_Development\\_of\\_Enzyme-Based\\_Biosensor\\_for\\_Environmental\\_Monitoring](https://www.researchgate.net/publication/329972932_Development_of_Enzyme-Based_Biosensor_for_Environmental_Monitoring)

ISSN: 329972932

LIU, Xinli [et al.] Cuantificación visualmente multiplexada de iones de metales pesados en agua utilizando un chip de gráfico de barras volumétrico, [en línea], Vol. 117, 15 de octubre 2018, [Fecha de consulta: 14 de mayo de 2022], Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566318304780?via%3Dihub>

ISSN: 0956-5663

MALHOTRA, Bansi y PANDEY, Chandra, Biosensores: fundamentos y aplicaciones, [en línea], Smithers Information Ltd., 2017, [Fecha de consulta: 21 de mayo de 2022]. Disponible en

[https://www.ecoli.sk/files/vedecke\\_okienko/biosensors%20fundamentals%20and%20applications.pdf](https://www.ecoli.sk/files/vedecke_okienko/biosensors%20fundamentals%20and%20applications.pdf)

ISBN: 978-1-91024-278-0

MASINDI, Vhahangwele y MUEDI, Khathtshelo. Metales pesados, 27 de junio 2018, [Fecha de consulta: 28 de mayo de 2022], Contaminación ambiental por metales pesados, [en línea]. Disponible en:

<https://www.intechopen.com/chapters/60680>

ISBN: 978-1-78923-361-2

MAO, Kang [et al.] Biosensores para epidemiología basada en aguas residuales para monitorear la salud pública, [en línea], Vol. 191, 2021, [Fecha de consulta: 28 de mayo de 2022], Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135420313208>

ISSN: 0043-1354

MOHSENI Mojtaba [et al.]. Heavy metals detection using biosensor cells of a novel marine luminescent bacterium *Vibrio* sp. MM1 isolated from the Caspian Sea. 2017. [Fecha de consulta: 28 de mayo de 2022], Disponible en:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29127817/>

NASERI, Maryam [et al.] 2020. El uso de aptámeros y polímeros impresos molecularmente en biosensores para el monitoreo ambiental: historia de dos receptores: A tale of two receptors. *Chemosensors* (Basel, Switzerland). 2020. Vol. 8, no. 2, p. 32; [Fecha de consulta: 28 de mayo de 2022], Disponible en:

<https://link.gale.com/apps/doc/A637860608/AONE?u=univcv&sid=bookmark-AONE&xid=0f2fd582>

NARESH, Varnakavi y LEE, Nohyun, Una revisión sobre biosensores y desarrollo reciente de Biosensores habilitados para materiales nanoestructurados, [en línea], Vol. 21, N° 4, [Fecha de consulta: 28 de mayo de 2022]. Disponible en:

<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1109>

ISSN: 1424-8220

ODOBAŠIĆ, Amra [et al.] Biosensores para la determinación de metales pesados en aguas, [en línea], 2019, [Fecha de consulta: 28 de mayo de 2022]. Biosensores para el monitoreo ambiental. Disponible en

<https://www.intechopen.com/chapters/66031>

ISBN: 978-1-78923-824-2

SAENCHOOPA, Apichart [et al.] Un biosensor electroquímico desechable basado en electrodos de carbono serigrafiados modificados con nanocables de plata / HPMC / quitosano / ureasa para la detección de mercurio (II) en agua, [en línea], Vol. 11, N° 10, 2021, [Fecha de consulta: 4 de junio de 2022], Disponible en:

<https://www.mdpi.com/2079-6374/11/10/351/htm>

ISSN: 11100351

SAIDUR, M. [et al.] Avances recientes en biosensores electroquímicos basados en ADN para la detección de iones de metales pesados: una revisión, Vol. 90, 15 de abril de 2017, [Fecha de consulta: 4 de junio de 2022], Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956566316311800?via%3Dihub>

ISSN: 0956-5663

SALOUTI, Mojtaba y DERAKHSHAN, Fateme. Biosensores y nanobiosensores en aplicaciones medioambientales, [en línea], 2020, [Fecha de consulta: 4 de junio de 2022], Disponible en:

[https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-15-2985-6\\_26](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-15-2985-6_26)

ISBN: 978-981-15-2984-9

SCIUTO, Emanuele [et al.] Biosensores en el monitoreo de la calidad y seguridad del agua: un ejemplo de un sensor miniaturizable basado en células enteras para la detección óptica de Hg 2+ en agua, [en línea], Vol. 11, N° 11, 2019, [Fecha de consulta: 4 de junio de 2022], Disponible en:

<https://www.mdpi.com/2073-4441/11/10/1986>

ISSN: 1996-2021

SINGH, Simranjeet [et al.] Biotecnología microbiana: investigación básica y aplicaciones, [en línea], India, Springer Nature Singapore, [Fecha de consulta: 11 de junio de 2022], Biosensores biológicos para seguimiento y diagnóstico, Disponible en <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7340096/>

ISBN: 9789811528163

PANDEY, Shailendra [et al.] Óxido de grafeno reducido electroquímicamente modificado con tionina electrodepositada y peroxidasa de rábano picante para detección de peróxido de hidrógeno y medición inhibidora de cromo, Vol. 2, diciembre 2019, [Fecha de consulta: 11 de junio de 2022], [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589299119300710>

ISSN: 2589-2991

THATIKAYALA [et al.] Progreso de nanomateriales avanzados en la detección electroquímica no enzimática de glucosa y H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, [en línea], Vol.10, n° 10, 2020, [Fecha de consulta: 18 de junio de 2022]. Disponible en:

<https://www.mdpi.com/2079-6374/10/11/151>

ISSN: 2079-6374

VASUKI, S. [et al.] Biosensores térmicos y sus aplicaciones, [en línea], 2021, [Fecha de consulta: 18 de junio de 2022]. Disponible en:

[https://www.researchgate.net/publication/338170504\\_THERMAL\\_BIOSENSORS\\_AND\\_THEIR\\_APPLICATIONS](https://www.researchgate.net/publication/338170504_THERMAL_BIOSENSORS_AND_THEIR_APPLICATIONS)

ISSN: 2328-3580

WANG, Dan [et al.] Un biosensor de células enteras con amplificación de señal para la detección sensible de Hg<sub>2+</sub> basado en Hg<sub>2+</sub>-módulo de reportero mejorado, [en línea], Vol. 96, octubre de 2020, [Fecha de consulta: 18 de junio de 2022], Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001074220301017?via%3Dihub>

ISSN: 1001-0742

WU, Lil [et al.] A Green Microbial Fuel Cell-Based Biosensor for In Situ Chromium (VI) Measurement in Electroplating Wastewater, [en línea], Vol. 27, octubre de 2017, [Fecha de consulta: 18 de mayo de 2022], Disponible en:

<https://www.mdpi.com/1424-8220/17/11/2461>

ZHAO, Shuai [et al.] A Novel Early Warning System Based on a Sediment Microbial Fuel Cell for In Situ and Real Time Hexavalent Chromium Detection in

Industrial Wastewater, [en línea], Vol. 18, octubre de 2018, [Fecha de consulta: 12 de mayo de 2022], Disponible en:  
<https://www.mdpi.com/1424-8220/18/2/642/htm>



## ANEXOS

### Anexo 1. Matriz de categorización apriorística.

Ámbito temático	Problema de investigación	Preguntas de investigación	Objetivo general	Objetivos específicos	Categorías	Subcategorías	
Evaluación de biosensores ambientales para la detección de metales pesados en aguas superficiales	¿Qué biosensores ambientales permiten la detección de metales pesados en aguas superficiales?	¿Cuál es la sensibilidad de los transductores empleados en aguas superficiales para la detección de metales pesados?	Evaluar la eficacia de detección de los biosensores en aguas superficiales.	Evaluar la eficiencia de los biosensores en la detección de metales pesados según el tipo de agua superficial.	Tipos de aguas superficiales.	Artificial, efímera y perenne.	
		¿Cuál es la eficacia de los biosensores en la detección de metales pesados según el tipo de agua superficial?		Evaluar la sensibilidad de los transductores empleados en aguas superficiales para la detección de metales pesados.		Tipos de transductores.	Ópticos, electroquímicos, colorimétricos, bioluminiscentes.
		¿Cuál es la eficacia y durabilidad de los biosensores en aguas superficiales según el tipo de elemento vivo?		Evaluar la eficacia y tiempo de detección de los biosensores en aguas superficiales según el derivado de elemento vivo.		Tipos de biosensores según el elemento derivado del ser vivo.	Enzimáticos, no enzimáticos, células completas y ADN.

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2: Base de datos de artículos recopilados

Autor(es)	Análisis	Sensibilidad (mg/L)	Tipos de derivado de elemento vivo	Especie del derivado del elemento vivo	Tiempo de detección de biosensor	Tipo de transductor	Composición electrónica del transductor	Clasificación de aguas superficiales	Tipos de agua	Método	Estudio/Diseño
Sedky HA Hassan et al.	Cr <sup>6+</sup>	0.0800	Enzimático	<i>Chromatiales</i>	2	Electroquímico	Hilo de oro	Aguas efímeras	Agu a de río	In situ	Pre experimental
Li-Chun Wu et. al.	Cr <sup>6+</sup>	0.9900	Enzimático	<i>E. aestuaril</i>	30	Colorimétrico	Hilo de cobre	Aguas efímeras	Agu a de río	In situ	Pre experimental
Juyeol Bae et. al.	Pb <sup>2+</sup>	0.0041	Enzimático	<i>E. Coli</i>	5	Colorimétrico	hilo de oro	Aguas efímeras	Agu a de río	In situ	Pre experimental
Emanuele Luigi Sciuto et. al.	Hg <sup>2+</sup>	0.0250	Enzimático	<i>E. Coli</i>	1	Óptico	Hilo de oro	Aguas efímeras	Agu a de río	In situ	Pre experimental
Cregut, Mickael et. al.	Cu <sup>2+</sup>	0.0079	Enzimático	<i>E. Coli</i>	2	Electroquímico	Hilo de cobre	Aguas efímeras	Agu a de río	In situ	Pre experimental
Aman Khan et al.	Zn <sup>2+</sup>	0.0013	Enzimático	<i>E. Coli</i>	10	Electroquímico	Hilo de oro	Aguas perennes	Agu a de mar	In situ	Pre experimental
Li Chun Wu1 et. al.	Cr <sup>6+</sup>	0.5000	Enzimático	<i>Exiguobacterium aestuarii</i>	20	Electroquímico	Hilo de plata	Aguas efímeras	Agu a de río	In situ	Pre experimental
Shuai Zhao Et. Al..	Cr <sup>6+</sup>	0.2000	Enzimático	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	18	Electroquímico	Hilo de cobre	Aguas artificiales	Agu a de río	In situ	Pre experimental

Mohanraj P. et. al.	Pb <sup>2+</sup>	3.5000	Enzimático	<i>Pseudomona aeruginosa</i>	30	Electroquímico	Hilo de plata	Aguas efímeras	Agu a de río	In situ	Pre experimental
kapil sadani et. al.	Hg <sup>2+</sup>	2.7000	Enzimático	Quitosano en BSA	30	Óptico	Hilo de cobre	Aguas perennes	Agu a de mar	In situ	Pre experimental
Mojtaba Mohseni et. al.	Zn <sup>2+</sup>	0.9700	Enzimático	<i>Vibrio sp.</i>	15	Bioluminiscente	Hilo de plata	Aguas perennes	Agu a de mar	In situ	Pre experimental
Junping mamá et. al.	Pb <sup>2+</sup>	0.0352	ADN	G-quadruplex	30	Electroquímico	Hilo de cobre	Aguas efímeras	Agu a de río	In situ	Pre experimental
Guo, Zizhanga et. al.	Hg <sup>2+</sup>	0.4012	ADN	ADN biotinilado	5	Electroquímico	Hilo de oro	Aguas efímeras	Agu a de río	In situ	Pre experimental
Zahra Tabibi et. al.	Cu <sup>2+</sup>	0.9900	ADN	Aptámeros	2	Colorimétrico	Hilo de oro	Aguas efímeras	Agu a de río	In situ	Pre experimental
Kandasamy Saravanakumar et. al.	Hg <sup>2+</sup>	0.0005	ADN	Aptámeros	15	Colorimétrico	Hilo de plata	Aguas perennes	Agu a de mar	In situ	Pre experimental
Shunbi Xie	Hg <sup>2+</sup>	0.0063	ADN	Exo nucleasa II	15	Electroquímico	Hilo de oro	Aguas efímeras	Agu a de río	In situ	Pre experimental
Yunpeng Xing et. al.	Hg <sup>2+</sup>	0.0273	ADN	Oligonucleótido	5	Bioluminiscente	Hilo de oro	Aguas perennes	Agu a de mar	In situ	Pre experimental
CPN Ramley et. al.	Cr <sup>2+</sup>	0.0004	Enzimático	<i>Acinetobacter baylyi</i>	30	Bioluminiscente	Hilo de plata	Aguas perennes	Agu a de río	Ex situ	Pre experimental
Minh Hang Do et. al.	Cu <sup>2+</sup>	1	Enzimático	Bacterias electrogénicas	5	Electroquímico	Hilo de oro	Aguas efímeras	Agu a de río	Ex situ	Pre experimental

Zhisong Cui et al.	Cu <sup>2+</sup>	0.6800	Enzimático	<i>Acinetobacter baylyi</i>	15	Electroquímico	Hilo de plata	Aguas perennes	Agu a de mar	Ex situ	Pre experimental
Chang Ye Hui	Cd <sup>2+</sup>	2.6700	Enzimático	<i>E. coli</i>	30	Colorimétrico	Hilo de cobre	Aguas efimeras	agu a de río	Ex situ	Pre experimental
Jingting Wang Naik, Sweta;Jujjavara pu, Satya Eswari	Cd <sup>2+</sup>	0.9800	Enzimático	<i>Geobacter</i>	1	Electroquímico	Hilo de Oro	Aguas artificiales	Agu a de río	Ex situ	Pre experimental
Pennacchio, Anna et. al	Hg <sup>2+</sup>	0.6018	Enzimático	<i>Pleurotus ostreatus</i>	15	Electroquímico	Hilo de cobre	Aguas perennes	Agu a de mar	Ex situ	Pre experimental
Luisa A. Mercante et. al.	Pb <sup>2+</sup>	1.0360	Enzimático	Tirosinasa	10	Electroquímico	Hilo de oro	Aguas efimeras	Agu a de río	Ex situ	Pre experimental
Noemí Colozza et. al.	Pb <sup>2+</sup>	0.0003	Enzimático	<i>Styela plicata</i>	5	Electroquímico	Hilo de plata	Aguas perennes	Agu a de mar	Ex situ	Pre experimental
Dengbin Yu et. al.	Cu <sup>2+</sup>	6.6600	Enzimático	<i>Vibrio fischeri</i>	4	Electroquímico	Hilo de cobre	Aguas efimeras	Agu a de río	Ex situ	Pre experimental
Kumar, D. Nanda et. al.	Pb <sup>2+</sup>	0.0005	ADN	ADNzima	20	Óptico	Hilo de oro	Aguas efimeras	Agu a de río	Ex situ	Pre experimental
Hisham Abu Ali et. al.	Hg <sup>2+</sup>	0.0001	ADN	Aptámeros	4	Electroquímico	Hilo de oro	Aguas efimeras	Agu a de río	Ex situ	Pre experimental
Yang Mei et. al.	Hg <sup>2+</sup>	0.2808	ADN	G-cuádruple	35	Bioluminiscente	Hilo de plata	Aguas perennes	Agu a de mar	Ex situ	Pre experimental

Fuente elaboración propia.