



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
VINCULACIÓN Y POSGRADO**

DIRECCIÓN DE POSGRADO

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE:

**MAGÍSTER EN INGENIERIA AMBIENTAL CON MENCIÓN EN
RECURSOS HIDRICOS**

TEMA:

**“EVALUACIÓN DE LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN AGUAS
RESIDUALES MINERAS UTILIZANDO CELDAS DE COMBUSTIBLE
MICROBIANAS CON CÁTODOS ASISTIDOS POR MICROALGAS,
PARA LA PRODUCCIÓN SIMULTÁNEA DE BIOENERGÍA”**

AUTOR:

Ing. Joana Fernanda Iza Guaman

TUTOR:

Ing. María Rafaela Viteri Uzcátegui, Msc

Riobamba – Ecuador

2024

Certificación del Tutor

Certifico que el presente trabajo de titulación denominado: **“Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales mineras utilizando celdas de combustible microbianas con cátodos asistidos por microalgas, para la producción simultánea de bioenergía.”**, ha sido elaborado por el Ingeniero Joana Fernanda Iza Guaman, el mismo que ha sido orientado y revisado con el asesoramiento permanente de mi persona en calidad de Tutor. Así mismo, refrendo que dicho trabajo de titulación ha sido revisado por la herramienta antiplagio institucional; por lo que certifico que se encuentra apto para su presentación y defensa respectiva.

Es todo cuanto puedo informar en honor a la verdad.

Riobamba, 27 de noviembre de 2024

Ing. María Rafaela Viteri Uzcátegui, Msc
TUTOR

Declaración de Autoría y Cesión de Derechos

Yo, **Joana Fernanda Iza Guaman**, con número único de identificación **060551797-8**, declaro y acepto ser responsable de las ideas, doctrinas, resultados y lineamientos alternativos realizados en el presente trabajo de titulación denominado: “Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales mineras utilizando celdas de combustible microbianas con cátodos asistidos por microalgas, para la producción simultánea de bioenergía.” previo a la obtención del grado de Magíster en Ingeniería Ambiental con mención en Recursos Hídricos.

- Declaro que mi trabajo investigativo pertenece al patrimonio de la Universidad Nacional de Chimborazo de conformidad con lo establecido en el artículo 20 literal j) de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.
- Autorizo a la Universidad Nacional de Chimborazo que pueda hacer uso del referido trabajo de titulación y a difundirlo como estime conveniente por cualquier medio conocido, y para que sea integrado en formato digital al Sistema de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor, dando cumplimiento de esta manera a lo estipulado en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior LOES.

Riobamba, 27 de noviembre de 2024

Ing. Joana Fernanda Iza Guaman

N.U.I. 060551797-8

Agradecimiento

A Dios por su amor y bondad. Gracias a mi madre por ser un gran ejemplo de constancia y superación. A toda mi familia por haberme apoyado y guiado a lo largo de toda mi carrera universitaria, por brindarme su confianza y su motivación. A mi directora de Tesis Rafaela Viteri, por ser una excelente persona y brindarme su apoyo incondicional para la elaboración del presente trabajo, también un sincero agradecimiento al Dr. Celso Recalde por su guía en el desarrollo de mi investigación. A Henry Cando por apoyarme cuando más lo he necesitado por extenderme su mano en los momentos difíciles y de manera desinteresada. Gracias a todos y quienes de una u otra manera me han brindado su apoyo y motivación para desarrollar mi trabajo de titulación y lograr cumplir con este objetivo tan anhelado.

Joana

Dedicatoria

A Dios por bendecirme en cada día de mi vida y por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. A mi madre Cecilia por su apoyo incondicional en cada momento, gracias por ser la mejor guía y por inculcar en mí el ejemplo del esfuerzo y el sacrificio. A mis hermanos Cristian y David por compartir conmigo buenos momentos. A mis abuelitos Manuel y Leonor por ser un pilar fundamental en mi vida diaria. A mis pequeños por estar siempre presentes en cada momento Oso, Tony y Princesa. A mi familia en general por confiar y creer en mis capacidades y sobre todo por el apoyo brindado durante esta etapa. Para todos ustedes con amor y cariño.

Joana

Índice General

Certificación del Tutor	ii
Declaración de Autoría y Cesión de Derechos	iii
Agradecimiento	iv
Dedicatoria	v
Índice General.....	vi
Índice de Tablas	ix
Índice de Figuras	x
Resumen	1
Abstract	1
Introducción	1
Capítulo 1 Generalidades.....	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Justificación de la Investigación.....	4
1.3 Objetivos.....	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Específicos	6
Capítulo 2 Estado del Arte y la Práctica	7
2.1 Antecedentes Investigativos	7
2.2 Fundamentación Legal	9
2.3 Fundamentación Teórica	10
2.3.1 Contaminación del agua	10
2.3.2 Tratamientos del agua residual minera.....	11
2.3.3 Celdas de combustible microbianas fotosintéticas.....	13

2.3.4	Aplicaciones de las celdas de combustible microbianas fotosintéticas.....	16
Capítulo 3 Diseño Metodológico.....		19
3.1	Enfoque de la Investigación	19
3.2	Diseño de la Investigación.....	19
3.3	Tipo de investigación	19
3.3.1	Por su alcance	19
3.3.2	Por su diseño.....	20
3.4	Área de estudio	20
3.5	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	20
3.5.1	Cultivo de microalgas.....	21
3.5.2	Análisis físico químico del agua residual	22
3.5.3	Pretratamiento de electrodos	24
3.5.4	Biocátodo de microalgas	25
3.5.5	Selección de la configuración de las CCM.....	25
3.5.6	Montaje experimental.....	26
3.5.7	Monitoreo de las CCM	27
3.5.8	Mediciones electroquímicas	27
3.6	Técnicas para el Procesamiento e Interpretación de.....	28
3.7	Población y Muestra	28
3.7.1	Población	28
3.7.2	Tamaño de la Muestra	28
Capítulo 4 Análisis y Discusión de los Resultados.....		29
4.1	Configuración de las celdas de combustible microbianas	29
4.2	Características fisicoquímicas y microbiológicos del agua residual minera.	31
4.2.1	Características fisicoquímicas	31
4.2.2	Características microbiológicas.....	35

4.3	Capacidad biocatalizadora de las microalgas en la producción de bioenergía en celdas de combustible microbianas.	37
4.3.1	Generación de voltaje por los sistemas CCM.....	37
4.3.2	Curvas de polarización	39
Capítulo 5	.....	42
Conclusiones	.....	42
Recomendaciones	.....	44
Referencias Bibliográficas	.....	45
Anexos	.....	53

Índice de Tablas

Tabla 1: Configuración de las CCM sumergidas reportadas en la literatura.....	26
Tabla 2: Caracterización fisicoquímica del agua residual minera antes y después del tratamiento.....	31
Tabla 3. Características microbiológicas del agua residual minera.....	36
Tabla 4. Resumen del análisis ANOVA.....	41
Tabla 5. Análisis de varianza.....	41

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de una CCM.....	12
Figura 2. CCM con microalgas.....	13
Figura 3. Planta de procesamiento Jesús del Gran Poder, Zaruma-Portovelo.....	21
Figura 4. Configuración de las CCM	30
Figura 5. Montaje de las CCM	30
Figura 6. Remoción de contaminantes del agua residual minera	32
Figura 7. Remoción de metales pesados del agua residual minera	35
Figura 8. Generación de voltaje por los sistemas CCM	37
Figura 10. Curvas de polarización.....	40

Resumen

El objetivo de la presente investigación fue evaluar la remoción de contaminantes en aguas residuales mineras utilizando celdas de combustible microbianas con cátodos asistidos por microalgas, para la producción simultánea de bioenergía. Para ello, se realizó un muestreo en la planta de procesamiento Jesús del Gran Poder del Distrito Minero de Zaruma-Portovelo. Se construyó 3 celdas de combustible microbianas (CCM) empleando a la especie *M. inermum* como biocatalizador en el cátodo del sistemas y un sistema control. La caracterización inicial del agua residual indico concentraciones de contaminantes que superan lo valores umbrales NO_3^- 122,2 mg/L, NO_2^- 200 mg/L, 141.6 ug/L Hg^{2+} y 1976.7 ug/L Pb^{2+} enfatizando la necesidad urgente de un tratamiento previo antes de su descarga a cuerpos de agua. El uso de CCM generó elevados porcentajes de remoción, se observó un aumento del pH a ligeramente alcalino, una disminución de más del 70% de NO_3^- y NO_2^- , para el caso de la DQO se generó una disminución del 99.17% y para los iones de metales pesados se logró eliminaciones del 98.81% para el mercurio y > 99% para el caso del plomo. El sistema genero voltajes maximos de 0.164 V, 0.363 V, y 0.199 V para las CCM con inculo de *M. inermum* y densidades de potencia maximas de 1530.54 mW/m² para CCM2 y 1078.97 mW/m² para CCM3. La remoción de contaminantes obtenidas en la investigación demuestra la eficiencia de los sistemas para el tratamiento del agua residual minera, y el uso de *M. inermum* corroborará su eficiencia en la producción de bioelectricidad.

Palabras claves: *bioelectricidad, biorremediación, católito, microalgas, minería*

Abstract

The present study project evaluates the contaminants' removal from mining wastewater using microbial fuel cells (MFCs) with algae-assisted cathodes to produce bioenergy simultaneously. Sampling occurred at the Jesús del Gran Poder processing plant in the Zaruma-Portovelo mining district. Researchers built three microbial fuel cells (MFCs) and used *M. inermum* as a biocatalyst in the cathode system alongside a control system. Initial wastewater characterization revealed contaminant concentrations exceeding threshold values, with NO_3^- at 122.2 mg/L, NO_2^- at 200 mg/L, Hg^{2+} at 141.6 $\mu\text{g/L}$, and Pb^{2+} at 1976.7 $\mu\text{g/L}$, highlighting the urgent need for pre-treatment before discharge into water bodies. The MFC systems achieved high contaminant removal rates, increased pH to slightly alkaline levels, reduced NO_3^- and NO_2^- levels by more than 70%, and lowered COD levels by 99.17%. Heavy metal ion removal reached 98.81% for mercury and over 99% for lead. Voltage outputs reached 0.164 V, 0.363 V, and 0.199 V in the *M. inermum*-inoculated MFCs, with maximum power densities of 1530.54 mW/m² in MFC2 and 1078.97 mW/m² in MFC3. These results demonstrate the control system's efficiency in treating mining wastewater and confirm the potential of *M. inermum* in bioelectricity production.

Keywords: *bioelectricity, bioremediation, catholyte, microalgae, mining*

Introducción

Actualmente, la contaminación de los recursos hídricos debido a las descargas ilegales de aguas residuales de las industrias ha generado graves impactos a los ecosistemas y la salud humana. Considerando que el agua es parte esencial de las actividades humanas, en la presente investigación se pretende explorar una nueva tecnología que permita la descontaminación del agua y a su vez la obtención simultánea de energía. La escasa investigación en el tratamiento de efluentes de la industria minera como los relaves y el agua de cola, ya que presentan grandes concentraciones de iones de metales pesados que son difíciles de remover por tratamientos convencionales, lo que resalta la necesidad de desarrollar soluciones más eficientes y sostenibles para mitigar su impacto ambiental

Una alternativa sostenible para el tratamiento del agua residual minera son las celdas de combustible microbianas (CCM), que son sistemas bioelectroquímicos (SBE) que permiten la obtención de energía y el tratamiento simultáneo de contaminantes, mediante la oxidación de compuestos orgánicos e inorgánicos por microorganismos electrogénicos, como por ejemplo las microalgas, que permiten una eliminación eficaz de una amplia gama de contaminantes, y además la mejora de la producción de bioelectricidad en las CCM.

La investigación se encuentra estructurada en 4 capítulos. El capítulo 1, se centra en los objetivos del estudio, el cual es evaluar la remoción de contaminantes en aguas residuales mineras utilizando celdas de combustible microbianas con cátodos asistidos por microalgas, para la producción simultánea de bioenergía. El capítulo 2, incluye el estado del arte actual sobre los sistemas CCM, sus componentes, y sus ventajas. En el capítulo 3, se detalla la metodología del experimento, principalmente la selección de la configuración del sistema a emplear, siendo las CCM sumergidas, además, se describe la remoción de contaminantes

orgánicos y metálicos por el sistema y se demuestra la capacidad biocatalizadora de la especie de microalga utilizada para el estudio. Finalmente, el capítulo 4, describe los principales resultados obtenidos en la investigación, para el caso de la remoción de contaminantes, se registró una eliminación del 99% para los metales pesados de Hg y Pb, el 98% para el caso de la DQO y el 97% para el caso de nitritos y nitratos. Se demuestra que el uso de CCM con inóculo de *M. inermum* (326 mV) presenta un voltaje mayor a las CCM sin inóculo (131 mV).

Con la investigación se busca generar una alternativa biológica para el tratamiento de efluentes de la industria minera, además se espera que la tecnología CCM pueda ser aplicada a nivel de campo de manera escalable y sostenible, permitiendo mitigar los impactos negativos de la contaminación de los recursos hídricos. Finalmente, la investigación permitirá contribuir al desarrollo de prácticas industriales más responsables y al bienestar ambiental global.

Capítulo 1

Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

En Ecuador, la minería de oro genera un gran aporte a la economía, sin embargo, el aumento de sus actividades en las diferentes zonas del país, ha causado una continua contaminación ambiental, debido al uso de elementos altamente tóxicos, constituyendo un gran peligro, tanto para los ecosistemas, como para la salud humana (Gaber, 2023; Mestanza-Ramón, Cuenca-Cumbicus, et al., 2022). Gran parte de los efluentes mineros contienen iones de metales pesados, concretamente mercurio, elemento resultante del proceso de amalgamación, y otros metales como plomo o arsénico, cuyo vertido entra en contacto con los recursos hídricos y se deposita en la superficie y sedimentos, pasando a formar parte de la cadena trófica acuática (MAATE, 2020).

Se evidencia que la contaminación de los cuerpos de agua por residuos mineros es uno de los problemas ambientales más preocupantes, ya que el relave de los efluentes, al no tener un valor agregado de reutilización como materia prima para otra actividad, ha sido una amenaza latente (Gaber, 2023). Según el Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica (2020), se evidencia que en el Distrito Minero de Zaruma-Portovelo, durante el proceso de extracción de oro, existe un tratamiento deficiente o nulo de los efluentes generados. De manera similar, Carling et al. (2013), evidencian la contaminación de los ríos cercanos, por metales pesados como: As, Hg, Pb, Zn. Además, la gestión inadecuada del CN⁻ para lixiviar el oro en los centros de procesamiento, ha resultado en la contaminación del río Puyango con concentraciones de CN⁻ de 9088 veces por encima del estándar de 5 µg/L CN⁻ (Marshall et al., 2020).

Debido al aumento exponencial de los efluentes mineros, que contienen concentraciones elevadas de metales pesados, en los últimos años la comunidad investigadora se ha centrado en buscar alternativas para la reutilización de estos efluentes, con el fin de mitigar los impactos que ocasiona (Gaber, 2023). Una alternativa emergente son las CCM, que han atraído un interés creciente en el campo de la remediación y la generación de energía por microorganismos. Un inconveniente importante asociado a las CCM con especies bacterianas radica en las bajas densidades de potencia, resultando en un gran problema para su escalamiento (Lee et al., 2020).

El uso de algas en las CCM están siendo investigados para combatir las desventajas que plantea el uso de solo especies bacterianas en las CCM. Por lo tanto, es importante probar el potencial de microalgas andinas para el tratamiento del agua residual, su capacidad para la producción de bioelectricidad y la generación de biomasa que se puede utilizar como biocombustibles (Kannan & Donnellan, 2021).

1.2 Justificación de la Investigación

A nivel global, la minería representa una significativa fuente de ingresos en regiones donde las opciones económicas son escasas. En Ecuador, la actividad minera se concentra en el sur del país, en las provincias de Zamora, Azuay y El Oro, donde se localizan las instalaciones de procesamiento de mineral (Mestanza-Ramón, Ordoñez-Alcivar, et al., 2022). Aunque la minería se considera una actividad estratégica en el marco de la matriz productiva, su práctica inadecuada tiene consecuencias negativas para el ambiente y las condiciones socioeconómicas locales, debido a los métodos inapropiados de disposición de subproductos tóxicos generados durante el procesamiento del mineral (Xiao et al., 2022).

Existe una necesidad urgente de fuentes verdes sostenibles (Mansoor et al., 2023), para el tratamiento del agua residual. Las CCM surgen como una tecnología prometedora para abordar este problema y, al mismo tiempo, tratar las aguas contaminadas, además el uso de microalgas en el sistema, ha surgido como una alternativa a la producción de energía convencional (Tay et al., 2022), ya que solo en 2019, el 84% de la energía primaria mundial provino del petróleo, el gas y el carbón, y el 64% de la electricidad provino de la quema de combustibles fósiles. La ventaja del uso de microalgas es que permite la generación de altas densidades de potencia en volúmenes bajos de reactores (Kannan & Donnellan, 2021a).

Por tal razón, la investigación se enfoca en el tratamiento del agua residual minera utilizando microalgas como biocatalizador en el cátodo en un sistema de CCM para evaluar la remoción de contaminantes y determinar el potencial de generación de bioenergía del sistema, con el fin de obtener información relevante que pueda ser utilizada para mejorar los procesos de tratamiento de aguas residuales, contribuyendo a la mitigación de los impactos negativos que ocasiona la contaminación de los recursos hídricos. La importancia del estudio también radica en las múltiples aplicaciones que se le otorgan a las CCM asistidas con microalgas en el campo de la biotecnológica y la industria.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Evaluar la remoción de contaminantes en aguas residuales mineras utilizando celdas de combustible microbianas con cátodos asistidos por microalgas, para la producción simultánea de bioenergía

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar la configuración adecuada de las celdas de combustible microbianas a escala de laboratorio para la remoción de contaminantes
- Analizar las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua residual minera.
- Demostrar la capacidad biocatalizadora de las microalgas en la producción de bioenergía en celdas de combustible microbianas.

Capítulo 2

Estado del Arte y la Práctica

2.1 Antecedentes Investigativos

A nivel internacional, en diversos países se ha desarrollado estudios sobre CCM, particularmente, en Egipto, Mahmoud et al., (2022), diseñan sistemas bioelectroquímicos para explotar la utilidad de la biomasa de algas, para la producción de bioelectricidad, emplean las algas como bioánodo o biocátodo. Los resultados indicaron que se produce una corriente eléctrica más alta cuando las células de microalgas se explotan como biocátodo en una CCM con una densidad de potencia de 250 mW/m^2 combinada con una eliminación del 44.8 % de la demanda química de oxígeno (DQO). Los hallazgos sugieren que el sistema introdujo la oportunidad de rediseñar los estanques de algas en las plantas de tratamiento de aguas residuales para producir energía y eliminar desechos. El aporte del estudio es que el autor explora diferentes enfoques para las algas en las CCM, ya sea como células vivas o como biomasa seca, y la optimización de parámetros de rendimiento eléctrico y ambiental.

De manera similar, en China, Zhang et al. (2022) en su estudio: Una celda de combustible microbiana fotosintética basada en biopelícula de algas giratoria para recuperación simultánea de energía, eliminación de contaminantes y producción de algas, informan sobre una nueva CCM sin membrana basada en la optimización de los componentes, el separador y el cátodo. Los resultados demostraron que las tasas más altas de eliminación de DQO de las cámaras del ánodo y el cátodo alcanzaron el 93.5% y el 95.8%, respectivamente. La eficiencia de remoción de amoníaco fue de 91.1% y 98.0%. La densidad de corriente máxima y la densidad de potencia fueron $136,1 \text{ mA/m}^2$ y $33,1 \text{ mW/m}^2$. La producción de biomasa de la biopelícula de algas fue superior a 30 g/m^2 . En este caso, el

estudio no emplea una membrana de intercambio de protones (MIP), pero demuestra la eficiencia de las microalgas como biocátodo en las CCM para la eliminación de contaminantes de las aguas residuales, así como para la generación de electricidad.

A nivel nacional, en Perú, Rojas Flores (2021) en su trabajo Generación de energía eléctrica mediante un fotobiorreactor con microalgas "*Chlorella sp.*", ha empleado un fotobiorreactor para la producción de electricidad utilizando como combustible la microalga *Chlorella sp.*, utilizó electrodos de cobre y zinc. Los autores generaron valores máximos de 0.93 V y 23.79 mA; así como una densidad de potencia y corriente máxima de 4.71441 W/cm² y 401.5873 mA/cm². Los valores de conductividad, pH y densidad aumentaron hasta 76.8 mS.cm⁻¹, 8.97 y 1.527x10⁷ cel/mL. Por otro lado, se muestra la formación de una biopelícula porosa en los electrodos de zinc y cobre; este resultado establece que se ha logrado una nueva forma de producción de electricidad generando altos valores de voltaje y corriente, empleando materiales de bajo costo (Rojas-Flores et al., 2021). El estudio es relevante porque utilizan biocatalizadores ampliamente estudiados.

En Ecuador, Cuadrado y Rodríguez (2022) en su investigación "Generación de bioelectricidad mediante celdas de combustible microbianas usando aguas residuales de minería aurífera con *Pleurococcus sp* como biocatalizador en la cámara catódica", producen bioelectricidad y el tratamiento del agua residual mediante CCM usando 150 mL de agua de cola y 150 g de relaves mineros, empleando *Pleurococcus sp.* como biocatalizador en la cámara catódica. Los resultados muestran que las CCM con *Pleurococcus sp.* tienen éxito en la generación de bioelectricidad en comparación a la celda control, con una producción mayor de voltaje en un 31, 6% y 21,35 %. Mediante análisis fisicoquímicos determinaron la remoción de metales pesados: 92 % Hg y 95% en Cu; y un 94% en Pb. Las autoras reportan que los cátodos asistidos por *Pleurococcus sp* muestran una mayor generación de voltaje.

2.2 Fundamentación Legal

Las aguas residuales de la minería pueden tener efectos adversos sobre el ecosistema y la salud humana; por lo tanto, el tratamiento antes de su descarga al medio ambiente es de suma importancia. La Asamblea General de las Naciones Unidas (2000) adoptó los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), directamente relacionados con el uso seguro de aguas residuales, el «Objetivo 7: Garantizar la sostenibilidad del medio ambiente». Sin embargo, debe hacerse de forma segura para maximizar los beneficios para la salud pública y el medio ambiente. En 1973, la Organización Mundial de la Salud (OMS) elaboró la publicación Reutilización de efluentes: Métodos de tratamiento de aguas residuales y salvaguardias de salud pública (World Health Organization, 2007).

En Ecuador, la constitución ecuatoriana, garantiza un entorno sano y ecológicamente equilibrado y el acceso seguro y constante al agua. La carta magna representa un marco favorable en términos de derechos y garantías constitucionales, al definir el recurso agua como un derecho humano fundamental e inalienable. Para asegurar su efectividad, se destaca que el acceso al agua debe involucrar aspectos de calidad y cantidad. Además, el agua es reconocida como patrimonio nacional estratégico de uso público, irrenunciable, inalienable y esencial para la vida, lo que implica que el estado debe tomar el control y decidir sobre el destino de los recursos, considerando las necesidades de las comunidades y las generaciones presentes y futuras, de conformidad con los principios constitucionales de sostenibilidad, precaución, prevención y eficiencia ambiental según la legislación ambiental.

La fundamentación legal establece el marco normativo que respalda esta investigación, destacando la importancia de la remoción de contaminantes en aguas residuales mineras y asegurando que el estudio cumple con las normativas nacionales e

internacionales sobre la protección ambiental y el derecho al acceso de agua de calidad. De esta manera, la investigación contribuye al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente en lo relacionado con la sostenibilidad ambiental y la salud pública. Además, el estudio ofrece soluciones innovadoras y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales mineras, alineándose con principios clave como la eficiencia en el uso de recursos y la generación simultánea de bioenergía.

2.3 Fundamentación Teórica

2.3.1 Contaminación del agua

El agua es un recurso esencial para la supervivencia de la flora, fauna y la humanidad, sin embargo, en las últimas décadas, la industrialización, la producción agrícola y la vida urbana han resultado en la degradación y contaminación de los ecosistemas, afectando de forma negativa a los cuerpos de agua que son indispensables para la vida y, en última instancia, afectando a la salud humana y el desarrollo social sostenible (Lin et al., 2022)

En primer lugar, la industria es la causa principal de la contaminación del agua, porque durante la producción industrial se liberan diversas sustancias químicas tóxicas, sustancias orgánicas e inorgánicas, disolventes tóxicos y compuestos químicos orgánicos volátiles, que al ser liberados en los ecosistemas acuáticos o terrestres sin un tratamiento previo adecuado, causarán contaminación del recurso hídrico (Lin et al., 2022).

2.3.1.1 Contaminación del agua por la industria minera

El agua es un elemento fundamental durante el desarrollo de las actividades mineras y muchas veces es el conducto por el que se transportan los contaminantes al medio. Elementos como Hg, Cd, Cr, Pb, Ni, Mn y Zn son considerados metales pesados potencialmente dañinos en ambientes acuáticos debido a su existencia y a sus características

tóxicas y no biodegradables. Las fuentes de contaminantes en la industria minera son: los insumos mineros, el procesamiento de minerales, los desechos mineros y las fugas de presas de relaves, entre otros (Cesar Minga et al., 2023).

El aumento de las actividades mineras genera una presión cada vez mayor sobre las reservas de agua dulce del planeta, debido a que durante su desarrollo se produce una gran variedad de sustancias químicas que se vierten en el ciclo del agua, poniendo en peligro el equilibrio natural. En muchos casos, las sustancias químicas presentes en las aguas residuales derivadas de la minería aurífera son difíciles de biodegradar y la falta de sistemas de tratamiento óptimos conduce a su acumulación en el agua (Luc Leroy et al., 2020a).

2.3.2 *Tratamientos del agua residual minera*

2.3.2.1 Tratamiento físico químicos

Para lograr la sostenibilidad ambiental a futuro en relación con las actividades mineras, se requieren la implementación de tecnologías efectivas y eficientes que permitan abordar la remediación de los pasivos mineros. Los productos químicos neutralizantes alcalinos, como la piedra caliza y la cal apagada, se adoptan comúnmente para tratar el drenaje ácido de mina, porque permite disminuir la acidez extrema y precipitar los iones de metales/metaloides venenosos disueltos como hidróxidos. A pesar de generar una remediación efectiva, los grandes volúmenes de lodos o relaves resultan en precipitaciones que contienen metales pesados/metaloides, que se clasifican como materiales peligrosos y requieren una eliminación más segura (Ai et al., 2020).

2.3.2.2 Tratamientos biológicos

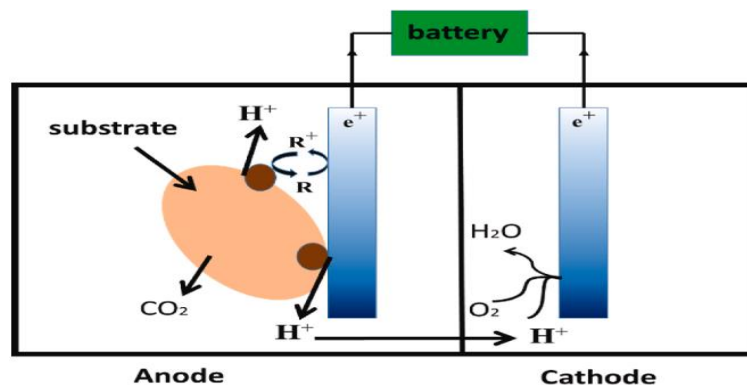
Tecnologías de remediación, como la biorremediación, la fitorremediación, la electrodiálisis, los humedales y la adsorción, también se usan para tratar desechos mineros.

Sin embargo, presentan inconvenientes debido a la baja eficiencia de remediación o un elevado costo. Además, algunas de esas tecnologías producen nuevos desechos, como por ejemplo, lodos, salmueras y medios gastados, que requieren un tratamiento adicional (Ai et al., 2020). Una tecnología biológica sostenible son las CCM.

2.3.2.2.1 Celdas de combustible microbianas

Las CCM son dispositivos de reacción bioelectroquímica que recolectan energía eléctrica generada por microorganismos electrogénicos en el proceso de respiración anaeróbica. Una CCM típica contiene dos cámaras, una cámara anódica anaeróbica y una cámara de cátodo aeróbica separadas por una membrana de intercambio de protones (MIP), como se observa en la Figura 1. La respiración microbiana tiene lugar en el ánodo y los electrones se generan y transmiten a la cámara del cátodo a través de un circuito externo. Los electrones llegan a la cámara del cátodo donde se reduce el aceptor de electrones presente mientras que los protones producidos en el compartimiento del ánodo se intercambian al cátodo a través de un separador de membrana (H. Zhang et al., 2022).

Figura 1. Esquema de una CCM

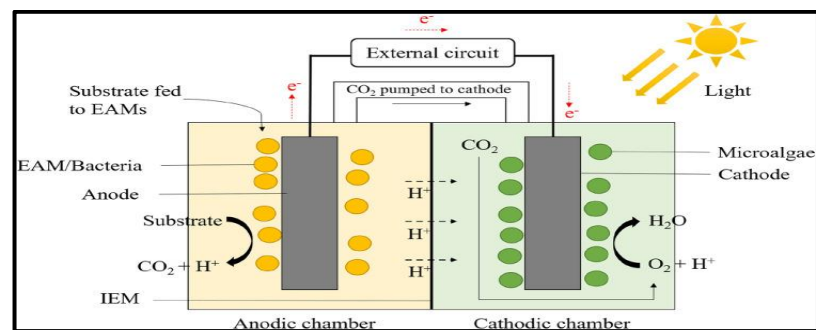


Fuente: (Jalili et al., 2024)

2.3.3 Celdas de combustible microbianas fotosintéticas.

Las CCM fotosintéticas son una combinación de un fotorreactor y una CCM (Tay et al., 2022), son respetuosas con el ambiente y se utilizan para producir energía renovable, comúnmente denominada como bioelectricidad. Este tipo de celdas requieren de luz (solar o artificial) para funcionar y son eficientes para lograr un voltaje elevado y una alta potencia de salida. Dependiendo del tipo de organismo, pueden recibir la ayuda de la maquinaria de células fotosintéticas de plantas, bacterias, hongos y algas (Ahiewar et al., 2023). En la Figura 2, se observa una CCM fotosintética típica que constan de dos electrodos (un ánodo y un cátodo) conectados por un circuito eléctrico externo y separados internamente por una MIP (Kannan & Donnellan, 2021).

Figura 2. CCM con microalgas



Fuente: (Tay et al., 2022).

2.3.3.1 Celdas de combustible microbianas fotosintéticas asistidas por algas

Las algas representan a un tipo de organismos acuáticos que tiene la capacidad de realizar el proceso de la fotosíntesis. Algunas especies de algas contienen el pigmento clorofila que les otorga el característico color verde, por lo tanto, se denominan algas verdes y son las responsables de más del 50% de la productividad fotosintética total en el planeta. Además, dependiendo de su tipo de célula, ya sea unicelular o multicelular y tamaño, las algas verdes se clasifican como microalgas o macroalgas (Kannan & Donnellan, 2021b).

En las CCM asistidas por algas, se emplean microalgas vivas junto con bacterias catalizadoras autosuficientes y electrodos rentables, como el grafito, con la posterior generación de oxígeno libre. Este tipo de celdas microbianas buscan convertir la energía de la luz en electricidad explotando la actividad fotosintética de microorganismos fototróficos. Las microalgas vivas y las bacterias electroquímicamente activas son ventajosas sobre las CCM, ya que no requieren mediadores redox, liberan oxígeno libre mediante un mecanismo de fotosíntesis (Ahiewar et al., 2023). Además, comúnmente y con diferentes roles, las microalgas pueden ser empleadas como biocatalizador, tanto en los compartimentos anódicos o catódicos del sistema (Mahmoud et al., 2022).

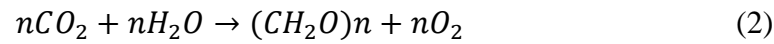
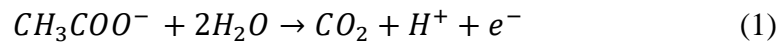
2.3.3.1.1 Celdas de combustible microbianas con microalgas en la cámara anódica

En la cámara anódica de una CCM, las microalgas exhiben la actividad exoelectrogénica que les permite oxidar los desechos orgánicos del sustrato seleccionado, liberando electrones libres que se bombean directamente a la superficie del ánodo (Mahmoud et al., 2022; Wu et al., 2021). Además, el CO₂ producto de la degradación oxidativa de los compuestos orgánicos en el compartimento del ánodo podría utilizarse para el proceso fotosintético de las microalgas (Kusmayadi et al., 2020; Tay et al., 2022).

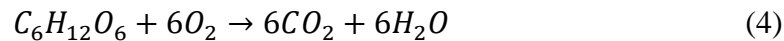
2.3.3.1.2 Celdas de combustible microbianas con microalgas en la cámara catódica

Las CCM basadas en microalgas catódicas convierten los nutrientes de las aguas residuales y producen oxígeno para las reacciones catódicas. Además, las algas en la cámara catódica actúan como aceptores terminales de electrones que llevan a cabo la reducción, eliminando la necesidad de aireación en el sistema (Kannan & Donnellan, 2021b; Mahmoud et al., 2022; Wu et al., 2021)). Las reacciones bioquímicas generadas en el cátodo se detallan

en la ecuación (1), mientras que las ecuaciones (2) y (3) corresponden a las reacciones que ocurren en la cámara anódica (Kusmayadi et al., 2020)).



En la fase luminosa, las microalgas realizan el proceso de la fotosíntesis, generando oxígeno y biomasa, la reacción se expresa en la ecuación (4). Por otro lado, en la fase oscura se genera el proceso de respiración en el cual se consume el oxígeno y el CO₂ producido en el sistema se convierte en productos útiles como azúcares y biomasa (Kannan & Donnellan, 2021).



2.3.3.2 Parámetros que considerar en el diseño de una celda de combustible microbiana fotosintética

2.3.3.2.1 Luz

Dado que la luz es un factor importante para controlar la fotosíntesis, tanto la luz alta como la baja pueden alterar el logaritmo del crecimiento de las algas (Khan et al., 2022). Existen varias fuentes de luz para el crecimiento de las algas, las cuales pueden ser la luz solar natural, lámparas fluorescentes, bombillas LED o incluso lámparas halógenas que emiten luz en el espectro visible. Es fundamental que las algas se cultiven en un período de luz/oscuridad para fomentar el crecimiento mixotrófico, permitiendo la producción de biocombustibles u otros bioproductos, así como para mantener la salud del organismo fotosintético. Por otro lado, un exceso de energía para iluminar continuamente a las algas es

desfavorable. El mejor método para cultivar algas depende de la cepa y el resultado deseado del sistema (Kannan & Donnellan, 2021).

2.3.3.2 Temperatura y pH

La temperatura óptima para el crecimiento de microalgas es comúnmente de 15 a 30 °C. Temperaturas más bajas o altas pueden reducir la actividad de ciertas enzimas como la Rubisco, inhibiendo el secuestro de carbono, y temperaturas superiores a 35 °C pueden ser letales para varias especies de microalgas, afectando de manera directa la eliminación de nutrientes. De manera similar, el pH también puede afectar significativamente la remoción de elementos como el nitrógeno y fósforo, principalmente debido a la precipitación de fósforo y la eliminación de NH₃ en condiciones alcalinas. Además, a pH más altos existe un aumento en la disponibilidad de CO₂ libre, promoviendo su absorción. Sin embargo, valores de pH extremadamente altos pueden inhibir el metabolismo de las microalgas y reducir la asimilación de nutrientes (Amaro et al., 2023)).

2.3.4 Aplicaciones de las celdas de combustible microbianas fotosintéticas.

2.3.4.1 Fijación de dióxido de carbono

En el medio natural, la biofijación de CO₂ se consigue a través del proceso de la fotosíntesis realizado por todas las plantas terrestres y por una gran cantidad de microorganismos. Las tasas de crecimiento de las microalgas y las cianobacterias, al ser mucho más rápidas que las de las plantas terrestres, son capaces de fijar CO₂ a razón de 6,24 kg/m³/día (Nagendranatha Reddy et al., 2019). Entonces, el secuestro de CO₂ mediante microalgas fotosintéticas y cianobacterias es una estrategia atractiva. Recientemente, la CCM fotosintética, que combina un sistema de fijación de CO₂ por microalgas con un

sistema bioelectroquímico, es considerado un enfoque prometedor y respetuoso con el medio para el secuestro de CO₂ y la producción simultánea de energía (Li et al., 2019).

El CO₂ en el compartimiento catódico es empleado por las algas durante la fotosíntesis para producir glucosa, necesario para funciones metabólicas que ayudan en el crecimiento celular. De manera similar, la fijación de CO₂ es una de las principales razones por las que los CCM fotosintéticas se están volviendo populares en comparación con los CCM tradicionales. Por ejemplo, si el secuestro de carbono es el objetivo principal, la tubería de salida de gas de la cámara del ánodo se conecta a la cámara del cátodo que contiene las algas, para servir como entrada para el crecimiento del organismo. De ser el caso, en algunas especies de algas que muestran un crecimiento mejorado de la biomasa en presencia de CO₂, los diseños de reactores también incluyen un sparger dentro de la cámara del cátodo para proporcionar CO₂ además de la corriente entrante de la cámara del ánodo (Kannan & Donnellan, 2021b). Li et al., (2019) descubrieron que la presencia de CO₂ en el sistema influye de una manera positiva en el crecimiento de la biomasa y la producción de biocombustibles, lo que permite ahorrar energía, ya que ya no sería necesario el bombeo de CO₂.

2.3.4.2 Remoción de contaminantes y producción de energía

Existen varias ventajas que ofrecen las CCM fotosintéticas en comparación a los procesos convencionales físico químicos de tratamiento de aguas residuales, debido a que incluyen la eliminación tanto de carbono orgánico como de nutrientes de las aguas residuales, el secuestro y utilización de CO₂, la generación de O₂ que actuará como aceptor terminal de electrones para las bacterias aerobias en suspensión, la eliminación de iones de

metales pesados y la generación de biomasa para la producción de bioenergía y/o biocombustibles (Nagendranatha Reddy et al., 2019).

2.3.4.3 Generación de biocombustibles y bioproductos a partir de biomasa de algas recuperada del cátodo de las MFC

Considerando un enfoque de biorrefinería, varias alternativas de biocombustibles como por ejemplo: el biometano, biohidrógeno, bioaceite, bioetanol, biometanol y biodiésel pueden ser generados a partir de biomasa algal, la cual es producida y recogida en el compartimiento catódico de la CCM fotosintéticas. La ingeniería genética permitirá mejorar la producción de biomasa y de compuestos deseados mediante la manipulación de las fábricas celulares de las algas, permitiendo lograr un mayor avance tecnológico en el campo de la generación de biocombustibles y productos de valor añadido (Nagendranatha Reddy et al., 2019).

La biomasa algal contiene un alto poder calorífico y, por lo tanto, se puede utilizar como sustituto de otros sustratos en procesos biológicos y como sustituto del carbón. La estructura celular de las algas tiene la capacidad de sintetizar macromoléculas como los lípidos, biodiésel y otros metabolitos que pueden utilizarse como colorantes, medicamentos, cosméticos y conservantes (Nagendranatha Reddy et al., 2019). Además, los biolípidos obtenidos a partir de la biomasa algal tienen gran importancia, ya que están compuestos por ácidos grasos C16 y C18, los cuales son necesarios para la síntesis de biodiésel (Angioni et al., 2018). Es importante considerar que una mayor producción de biomasa en una CCM es directamente proporcional a una mayor fijación de CO₂ y contenido de lípidos (Nagendranatha Reddy et al., 2019).

Capítulo 3

Diseño Metodológico

3.1 Enfoque de la Investigación

La investigación presenta un enfoque mixto, porque combina el enfoque cuantitativo con el cualitativo. Para el enfoque cualitativo, se llevó a cabo una revisión bibliográfica sobre las diferentes configuraciones de celdas microbianas asistidas por microalgas, para la definición del sistema experimental. De manera similar, en el enfoque cualitativo, se realizó la recolección, el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos.

3.2 Diseño de la Investigación

La investigación presentó un diseño experimental, es decir, el grupo experimental (agua residual minera) recibió el tratamiento o el estímulo experimental o, lo que es lo mismo, se le expone a la variable independiente (microorganismos en las CCM); y el grupo control no recibe el tratamiento o estímulo experimental (Hernández Sampieri et al., 2014). Las variables dependientes consideradas en el estudio son la calidad del agua después del tratamiento por los sistemas CCM y la producción de bioelectricidad por los sistemas.

3.3 Tipo de investigación

3.3.1 *Por su alcance*

La investigación es de tipo exploratorio porque el objetivo de la investigación consiste en examinar un tema poco estudiado y novedoso (Hernández Sampieri et al., 2014). La investigación es aplicada porque se centra en la aplicación directa de conocimientos para abordar situaciones prácticas. La investigación se enfoca en obtener información relevante que pueda ser utilizada para mejorar los procesos de tratamiento de aguas residuales empleados en la industria minera.

3.3.2 *Por su diseño*

La investigación es de tipo experimental, dado que requiere de la observación, registro, análisis y manejo de la variable independiente (microorganismos en las CCM) para observar su incidencia o efecto en una variable dependiente (remoción de contaminantes de las aguas residuales mineras y la producción de bioenergía).

3.4 Área de estudio

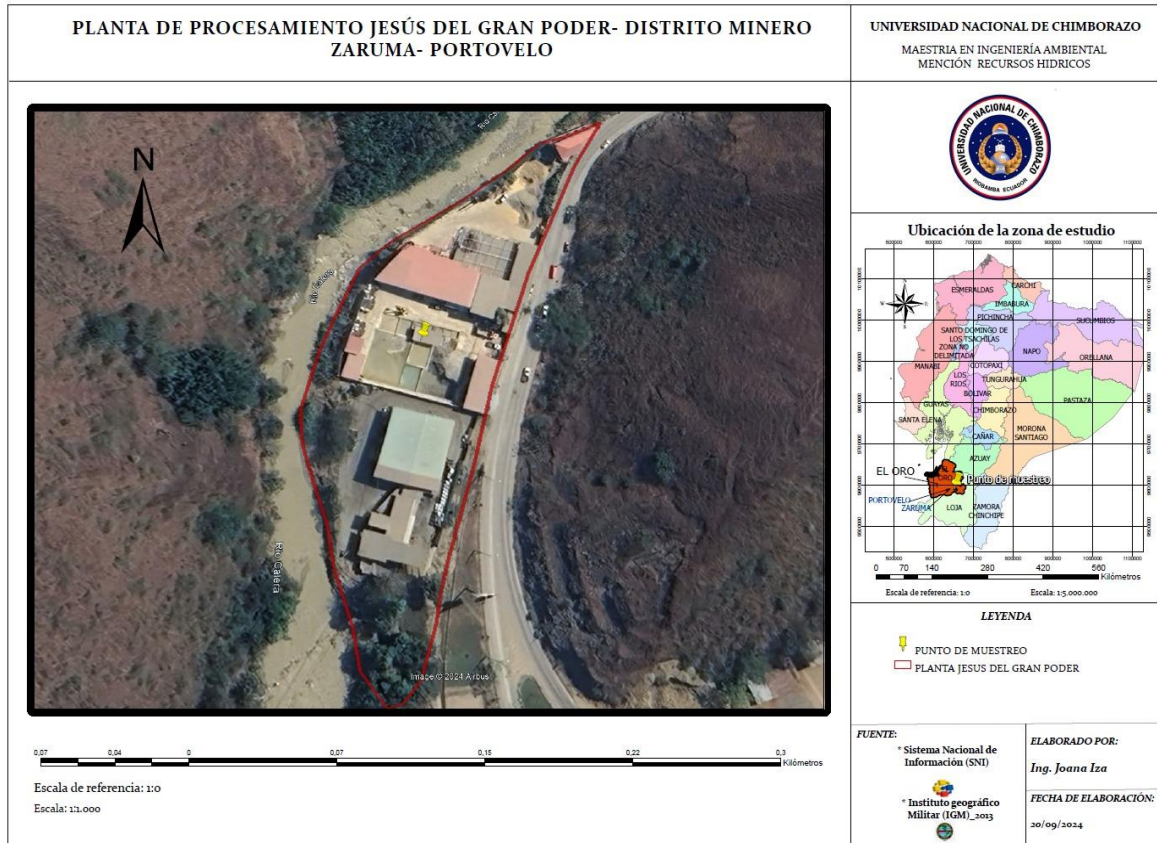
El área de influencia directa corresponde a la planta de procesamiento Jesús del Gran Poder situada en el Distrito Minero de Zaruma-Portovelo, ubicado en la parte montañosa de la provincia del Oro, cantón Zaruma (área de influencia indirecta) (Figura 3). La extensión actual del cantón es de aproximadamente unos 1.000 Km² y presenta un clima subtropical, con temperaturas que oscilan entre 18°C a 31°C, con una temperatura media de 21°C. El promedio anual de precipitaciones es de 1330 mm, siendo el periodo entre diciembre a mayo los de mayor precipitación (Narváez, 2022).

3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Para el desarrollo de la investigación, se realizó la visita a la zona de estudio, específicamente a la Planta de Procesamiento Jesús del Gran Poder con coordenadas - 3.6507, -79.1851. Se realizó la toma de muestras de efluentes mineros derivados del proceso de cianuración, principalmente, por la naturaleza de los contaminantes presentes en dichos efluentes y su relevancia para el desarrollo de un tratamiento eficiente. Se realizó un muestreo compuesto del agua residual de acuerdo a la NORMA INEN 2169:2013: Agua, Calidad del agua, Muestreo, Manejo y Conservación de muestras y se recolectó 4 litros de agua en recipientes plásticos y 500 mL de agua a la cual se añadió 1 mL de HNO₃ concentrado para la preservación de metales pesados (MAATE, 2013). Las muestras fueron

etiquetadas y posteriormente transportadas en un cooler hasta el laboratorio de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, para la identificación de contaminantes y el montaje experimental.

Figura 3. Planta de procesamiento Jesús del Gran Poder, Zaruma-Portovelo



Fuente: Autor

3.5.1 Cultivo de microalgas

En la experimentación se empleó la microalga *Microactinium inermum*, del banco de cepas del Grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA-ESPOCH), previamente aislada por Cuadrado y Rodríguez (2022). La reactivación de la microalgas se llevó a cabo empleando el medio de cultivo Blue-Green (BG11) en frascos de vidrio de 500 mL, con

aireación de 4.32 L/min y fotoperíodos de luz y oscuridad de 12:12 horas. La pureza de la cepa fue identificada mediante el uso de un microscopio a 40X.

3.5.2 Análisis físico químico del agua residual

El análisis físico químico del agua residual minera fue realizado *in situ* mediante el uso de un multiparámetro (PC2700) se pudo obtener los diferentes datos de pH, T°, conductividad, salinidad, TDS. También, se analizaron los parámetros de la Tabla 12. Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce, del anexo 1 de la calidad del agua del Acuerdo Ministerial 097 anexo A, que indica los parámetros que son cruciales para evaluar la calidad del agua y el impacto ambiental de las aguas residuales mineras antes de su descarga a los cuerpos hídricos, garantizando que no afecten la salud pública ni los ecosistemas acuáticos.

3.5.2.1 Nitratos

Se realizaron dos diluciones de la muestra de agua residual: la primera, tomando 10 mL de la muestra y aforando en un balón de 100 mL; la segunda, tomando 10 mL de la muestra aforada y se volvió aforar a 100 mL. Se toma 10 mL de la disolución y se realiza la lectura en el espectrofotómetro (HACH DR2800) para ello, se procede a llenar la cubeta con 10mL de muestra, se adiciona el reactivo NitraVer5 se agita la muestra por 1 minuto y se deja en reposo 5 minutos para su posterior medición. El equipo se calibra con la lectura de una muestra blanco, para ello se llena una cubeta con 10 mL de agua destilada y se toma la lectura.

3.5.2.2 Fosfatos

Para ello, se realizó dos diluciones de la muestra, la primera, tomando 10 mL de la muestra y aforando en un balón de 100 mL, la segunda, tomando 10 mL de la muestra

aforada y se volvió aforar a 100 mL, se toma 10 mL de muestra, la lectura se la realiza en el espectrofotómetro (HACH DR2800), para ello, se procede a llenar la cubeta con 10mL de muestra, se adiciona el reactivo PhosVer3 se agita la muestra por 1 minuto y se deja en reposo 5 minutos para su posterior medición. El equipo se calibra con la lectura de una muestra blanco, para ello se llena una cubeta con 10 mL de agua destilada y se toma la lectura.

3.5.2.3 Nitratos

Para ello, se realizó dos diluciones de la muestra, la primera, tomando 10 mL de la muestra y aforando en un balón de 100 mL, la segunda, tomando 10 mL de la muestra aforada y se volvió aforar a 100 mL, se toma 10 mL de muestra, la lectura se la realiza en el espectrofotómetro (HACH DR2800), para ello, se procede a llenar la cubeta con 10mL de muestra, se adiciona el reactivo PhosVer3 se agita la muestra por 1 minuto y se deja en reposo 5 minutos para su posterior medición. El equipo se calibra con la lectura de una muestra blanco, para ello se llena una cubeta con 10 mL de agua destilada y se toma la lectura.

3.5.2.4 DBO

Este parámetro fue medido durante un lapso de 5 días y se lo realizó mediante el método estándar 5210-B, utilizando un digestor de DBO (BOD TRANKTM II), para determinar la cantidad de oxígeno que una bacteria requiere para degradar la materia orgánica presente en la muestra, para la medición se utilizó 92 mL de muestra, con una agitación vigorosa para que se pueda disolver la mayor parte de la muestra.

3.5.2.5 DQO

Para la determinación de la DQO, se utilizó el equipo espectrofotómetro (HACH DR2800), el método colorimétrico aplicado fue el 5220-D, para ello se colocó 2 mL de muestra en un vial de DQO, con previa agitación, posteriormente, la muestra se llevó a un digestor Lovibond RD 125 por un periodo prolongado de 2 horas a una temperatura de 150 °C. Posteriormente, se lleva a un espectrofotómetro y se analiza el valor de la DQO.

3.5.2.6 Metales pesados

Se emplearon 500 mL de agua residual minera acidificada para la determinación de los metales pesados, mercurio y plomo. Para el mercurio se utilizó el procedimiento EPA 7470 A SM 3112 B/PEBMTLAB-68 y para el caso del plomo el procedimiento SM 3113 B/BMTLAB-69 del Laboratorio BMTLab ubicado en el cantón Chambo-Riobamba.

3.5.3 Pretratamiento de electrodos

Se utilizaron electrodos de fibra de carbono, tanto para el ánodo como para el cátodo. Los ánodos presentaron una configuración rectangular con dimensiones de 21×7 cm, mientras que los cátodos circulares con un diámetro de 6.5 cm. El ánodo se pre trató con la finalidad de mejorar la formación del biofilm de los microorganismos autóctonos del efluente minero (relave + agua residual), a través del siguiente proceso: se remojó en acetona pura durante una noche y al siguiente día se lavó 5 veces empleando agua destilada, posteriormente se remojó en una solución con un volumen 500 mL que contenía: peróxidisulfato de amonio (100 g) y ácido sulfúrico concentrado (50 mL), durante 15 minutos; después, los electrodos se calentaron en una mufla a 450 °C durante 30 minutos. De manera similar, el cátodo se humedeció en agua destilada en la noche con el fin de eliminar las impurezas (Cuadrado & Rodríguez, 2022).

3.5.4 Biocátodo de microalgas

Se empleó 500 mL de medio de cultivo BG11 para inocular los electrodos catódicos con *M. inermum* a condiciones óptimas para su desarrollo, como: temperatura ambiental y fotoperíodos de luz y oscuridad de 12 horas y aireación continua. Posteriormente, a los 7 días, se visualizó la formación de colonias verdes sobre el electrodo catódico de fibra de carbono.

3.5.5 Selección de la configuración de las CCM

La selección del diseño y tipo de CCM fotosintética se basó en consultas bibliográficas de artículos científicos que contienen información asociada con el funcionamiento, tratamiento y configuración. Existen diferentes tipos de CCM fotosintéticas, por ejemplo, las celdas con microalgas en la cámara catódica, las celdas con microalgas en la cámara anódica, las celdas sumergidas, las celdas monocámaras y las celdas de doble cámara.

Se diseñaron 4 CCM de una sola cámara con la siguiente nomenclatura: CCM sin biocatalizador en la cámara cátodica CCM1, CCM2 y CCM3 con biocátodo de *M. inermum*. Se seleccionó la configuración de CCM sumergidas, porque permiten una mejor distribución de la luz a través de la columna de agua, lo que es fundamental para el crecimiento de microalgas, asegurando que todas las microalgas reciban suficiente iluminación, aumentando así la tasa de fotosíntesis. Además, las CCM sumergidas son más fáciles de escalar a grandes volúmenes, lo que es fundamental para aplicaciones industriales, lo que permite que los resultados obtenidos en el laboratorio se puedan trasladar a un contexto más amplio, facilitando su implementación en tratamientos de aguas residuales.

En la Tabla 1, se puede evidenciar los estudios llevados a cabo mediante el uso de celdas de combustible microbianas de cámara simple, las cuales se consideraron la línea base para el desarrollo de la investigación.

Tabla 1: Configuración de las CCM sumergidas reportadas en la literatura

CELDA	ANOLITO	CATOLITO	AGITADOR	REFERENCIA
Tubos acrílicos simples sumergidos en un tanque de acrílico de 5 L.	100 mL de medio e inóculo de líquido ruminal.	3 L de <i>Nanochloropsis salina</i> con densidad óptica de 0,53-0,6 a 600 nm.	Agitadores magnéticos	(Saba et al., 2017).
Reactores cúbicos de cámara simple de acrílico, sumergidas en un recipiente de 1.5 L	14 mg/mL de levadura; 14 mg/mL de glucosa, 5 mg/mL de extracto de levadura y 2,5 mg/mL de peptona.	Muestras de agua ambiental real.	Dotación de gas de aire con un 21 % de oxígeno.	(Christwardana et al., 2021)
Reactores de cámara simple con placas de policarbonato, sumergidas en un reactor de vidrio de 1L.	18 mL de agua residual doméstica de Planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Lundtofte.	500 mL de agua del grifo.	Agitador magnetico	(Y. Zhang & Angelidaki, 2012)
Cámara de cátodo sumergida con un conjunto de electrodos de membrana.	Aguas residuales domésticas de la PTAR Lundtofte en Lyngby, Dinamarca.	Solución catódica con lodos activados	Agitador magnetico	(Min et al., 2012)

Fuente: Autor

3.5.6 Montaje experimental

Una vez definido el sistema CCM a utilizarse, se procedió al montaje del experimento. La cámara del ánodo se llenó con 50 gramos de relave minero, 25 mL de agua de peptona al 15% y 400 mL de agua residual minera. Los ensamblajes se colocaron en un

estante cercano a una ventana que permite el paso de luz solar natural. Se consideró un periodo de 21 días de generación de energía. Se utilizaron bombas de pecera durante 8 horas en un horario de 8 am a 6 pm para suministrar oxígeno a 3.2 L/ min y evitar la precipitación de las microalgas en el fondo del recipiente cúbico (Doan et al., 2023) que contenía medio BG11: 1,5 NaNO₃ , 0,04 K₂HPO₄ , 0,075 MgSO₄ · 7H₂O, 0,036 CaCl₂ · 2H₂O, 0,006 ácido cítrico, 0,006 citrato de amonio férrico, 0,001 EDTA y 0,5 NaHCO₃ (Khandelwal & Lens, 2023)

3.5.7 Monitoreo de las CCM

Todas las CCM se mantuvieron a temperatura ambiente (15-25°C) y se monitorearon mediante el empleo de una tarjeta de adquisición de datos de elaboración propia por el GEAA empleando al procesador ESP32 para gestionar 2 módulos de conversión ADC en la lectura de las 4 CCM, la fuente de energía del sistema fue provista por un sistema fotovoltaico para garantizar la adquisición continua del voltaje en milivoltios generado en cada celda y condiciones ambientales (temperatura y humedad) donde éstas fueron instaladas. El almacenamiento de la información se programó cada minuto durante 21 días, registrando esta información de forma local en una micro SD y a su vez en una plataforma IoT de acceso libre como Thingspeak para poder monitorear de forma remota mediante internet el desempeño de las CCM.

3.5.8 Mediciones electroquímicas

El análisis de polarización se realizó registrando la densidad de corriente y la densidad de potencia en resistencias externas variables de 50 a 20.000 Ω (Li et al., 2019), utilizando una caja de resistencia conectada a cada CCM. El voltaje se calculó utilizando la ley de Ohm ($I = V/R$), y la potencia se calculó utilizando la fórmula $P = I \times V$. La

densidad de corriente (mA/m^2) y la densidad de potencia (mW/m^2) se calcularon en función del área de superficie del sistema (0,040055 m) (Kondaveeti et al., 2019).

3.6 Técnicas para el Procesamiento e Interpretación de

Tras la recopilación de los datos, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existían variaciones significativas entre los tratamientos.

3.7 Población y Muestra

3.7.1 Población

La población de estudio corresponde a los 4 litros de agua residual minera recolectada del proceso de cianuración de la Planta de Procesamiento Jesús del Gran Poder del Distrito Minero de Zaruma-Portovelo.

3.7.2 Tamaño de la Muestra

El tamaño de la muestra de agua residual es 400 mL y 50 gramos de relave minero para cada una de las CCM con cátodo asistido por microalgas.

Capítulo 4

Análisis y Discusión de los Resultados

4.1 Configuración de las celdas de combustible microbianas

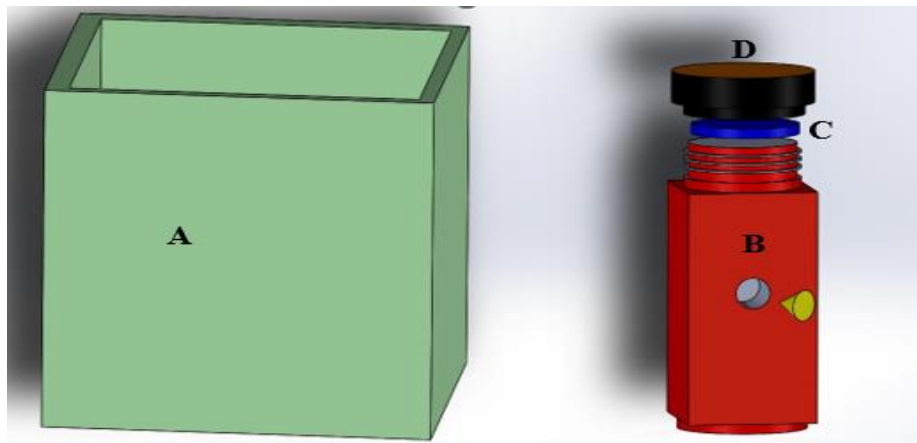
En la literatura se han presentado numerosos diseños y configuraciones. Se optó por seleccionar la configuración de celda de cámara única sumergida, similar a la estudiada por Saba et al., (2017) con varias modificaciones. La CCM diseñadas presentaron una configuración cilíndrica (B), de vidrio y con dimensiones 12 x 6 cm en la base y 5 x 6 cm en el cuello del sistema, incluyendo un agujero de 16 mm (Figura 4). La cámara del ánodo se selló herméticamente, insertando un tapón de goma de caucho en un puerto.

En el interior de la cámara anódica se situó un electrodo de fibra de carbono, el electrodo anódico de forma rectangular con dimensiones 10 x 21 cm. Posteriormente, se colocó papel celofán (C) de 6 cm de diámetro sobre el sustrato anódico como membrana de intercambio de protones. El electrodo del cátodo (D) se fijó en el exterior del ensamblaje y se sumergió en el recipiente cúbico de 18 x 18 x 23 cm (A) que contenía como catolito una solución de 1.5 L de medio BG11 (Figura 5), con la composición (en g/l) sugerida por Khandelwal & Lens, (2023) y un inculo de 50 mL de *M. inermum* a una densidad optica (OD_{600}) de 0.828.

Al emplear la CCM de configuración sumergida, se disminuye las concentraciones de medio BG11 que se debe añadir diariamente al inculo de *M. inermum* en el electrodo catodico, para permitir un correcto grado de humedad para su proliferación. Este resultado, difiere del reportado por Cuadrado & Rodríguez, (2022), quienes emplean diariamente la solución BG11 para humedecer al catodo de una CCM de cámara al aire, evitando que la biomasa algal pierda humedad y permitiendo el crecimiento de *Pleorococcus sp.* Además,

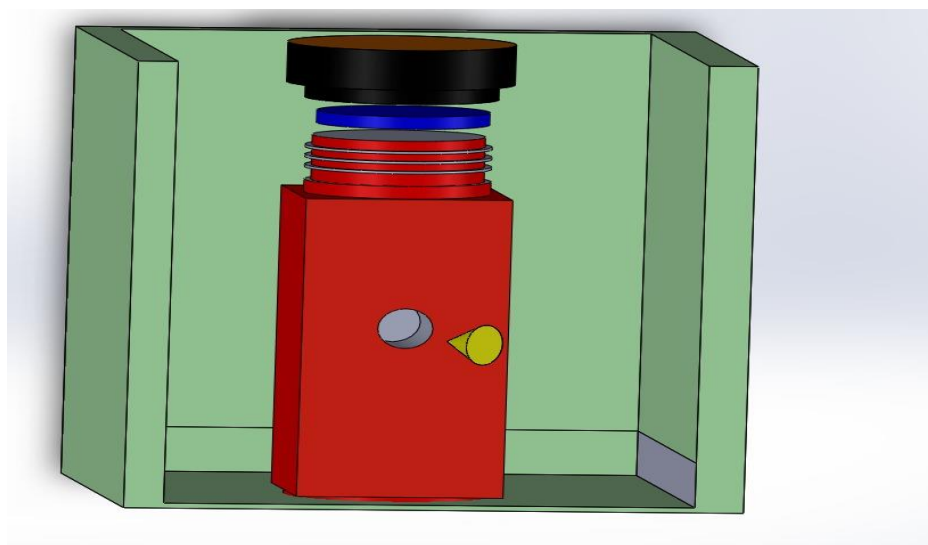
la selección de electrodos 100% sumergidos en las CCM en estudio es similar a las CCM con inoculo de *Chlorella pyrenoidosa* FACHB-9 estudiada por Ling et al., (2019), los cuales evidencian que los sistemas que presentan electrodos sumergidos completamente generan voltajes de trabajo más altos (378 mV) y estables, a diferencia de los CCM con electrodos sumergidos al 25% (278 mV), 50% (297 mV) y 75% (246 mV).

Figura 4. Configuración de las CCM



A: Recipiente cubico para el cátolito; **B:** CCM; **C:** MIP; **D:** Cátodo

Figura 5. Montaje de las CCM



Fuente: Autor

4.2 Características fisicoquímicas y microbiológicos del agua residual minera.

4.2.1 Características fisicoquímicas

Las características fisicoquímicas del agua residual minera se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Caracterización fisicoquímica del agua residual minera antes y después del tratamiento

Parámetros	Unidad	Limite permisible ANEXO 097	Muestra inicial	Muestra final CCM	Muestra final CCM1	Muestra final CCM2	Muestra final CCM3
pH	-	5-9	7,09	7,32	8,38	8,49	8,39
Conductividad	mS	-	3,017	2,422	1,793	1,152	2,354
Sólidos Totales	ppm	1600	1757	1,412	1,010	1,018	1,372
Nitritos	mg/L	10	122,2	26,5	29,5	27,4	36,5
Nitratos	mg/L	10	200	60	20	20	31
Fosfatos	mg/L	-	0,52	36	251	461	438
DBO	mg/L	100	3000	200	1000	1200	1300
DQO	mg/L	250	2400	20	20	20	50
Mercurio	ug/L	5	141,6	1,68	0,73	0,49	0,53
Plomo	ug/L	0.2	1976,7	0,12	0,08	0,44	0,06

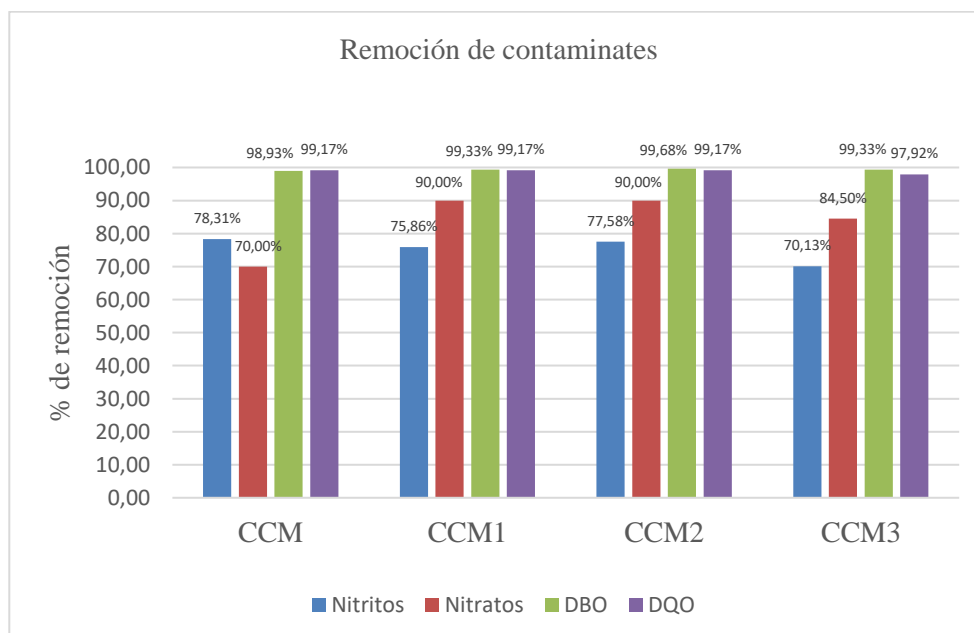
Fuente: Autor

Los valores iniciales de pH de las aguas residuales de minería aurífera son ligeramente neutras, con un valor de 7.09 como se muestra en la Tabla 2. Estos valores están de acuerdo con el rango de valores recomendados por el anexo 097 de la calidad del agua. Sin embargo, después del tratamiento en los sistemas CCM, se observa un aumento

significativo del pH a 7.32 para CCM, 8.38 para CCM1, 8.49 para CCM2 y 8.39 para CCM3. El incremento significativo del pH puede darse debido al paso de cationes desde la sustancia utilizada como catolito. Además, los valores de pH aumentan tras uno o dos días de funcionamiento, ya que el intercambio de protones será en menor proporción que su producción, es decir, el pH está condicionado a reacciones catódicas por oxidación del oxígeno (Gaber, 2023).

La conductividad eléctrica (CE) es probablemente una de las propiedades más simples e importantes para controlar la calidad del agua. Los valores de conductividad iniciales 3,017 uS indica que las aguas están mineralizadas (Luc Leroy et al., 2020b). Sin embargo, después del tratamiento por las CCM, la conductividad disminuye significativamente en CCM 19.72 %, 40.57% en CCM1, 61.82% en CCM2 y 21.97% en CCM3, debido a las reacciones generadas por la influencia del pH del sustrato (Gaber, 2023).

Figura 6. Remoción de contaminantes del agua residual minera



Fuente: Autor

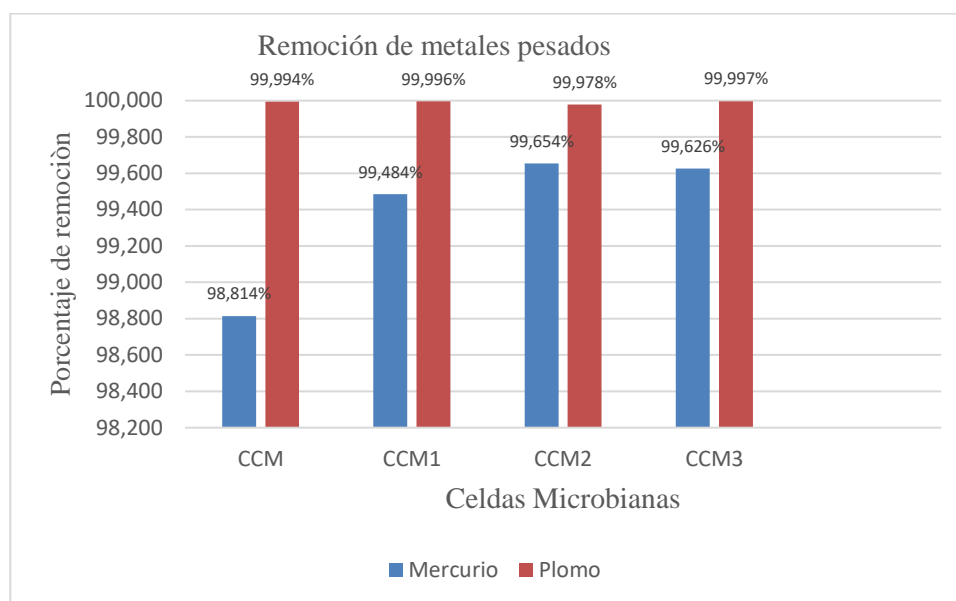
El agua residual minera derivada del proceso de cianuración presento valores elevados de nitritos y nitratos, posiblemente, debido al uso de explosivos utilizados durante la minería, los cuales exuberan la contaminación de las aguas residuales al introducir altas concentraciones de NO_3 (Moloantoa et al., 2023). Se observó que, similar a lo reportado en estudios previos Zhang et al., (2022), donde se alcanzó una eficiencia de eliminación superior al 90% para ambos compuestos, los sistemas CCM lograron una significativa disminución $> 70\%$ de los niveles de nitritos y nitratos, como se observa en la Figura 6. Por ejemplo, las concentraciones iniciales de nitrito de 122,2 mg/L se redujeron a 26,5 mg/L y para el caso del nitrito, una disminución significativa de 200 mg/L a 20 mg/L, lo que indica posiblemente una eficiencia notable en el proceso.

Para el caso del fosfato, se evidencia un incremento de la concentración inicial de 0.52 mg/L en los sistemas CCM, esto puede ser en respuesta al paso de iones fosfato desde el catolito (solución BG11). Además, considerando que la absorción de $(\text{PO}_4)^{-3}$ por parte de las microalgas, disminuye en medios alcalinos, ya que disminuye la disponibilidad e induce la eliminación de fosfatos vía co-precipitación química con Ca^{2+} y la formación de fosfato de calcio (Huaynate et al., 2021).

La eliminación de DQO por las cámaras de ánodo de los sistemas fue de 99.17% para CCM, CCM1, CCM2 y para CCM3 97.92%. Resultados similares fueron reportados por Mansoor et al., (2023) donde se observan porcentajes de eliminación del 54% de la DQO por CCM con microalgas en el cátodo. Además, se puede establecer que la posible razón para la alta eliminación de DQO fue el tiempo disponible para que los microorganismos consumieran la DQO ya existente y el uso del co-sustrato de peptona que podría mejorar la reducción de DQO y la generación de energía, tal como lo sugerido por Kondaveeti et al., (2019) al utilizar acetato en la cámara anódica en las CCM.

En la figura 7, las concentraciones de los metales pesados, mercurio y plomo de las muestras se encuentran por encima del límite permisible de la legislación ecuatoriana. En contraste, mediante el tratamiento por los sistemas CCM se puede evidenciar una remoción del 99% del plomo en los 4 sistemas en respuesta a que a medida que el pH aumenta por encima de la neutralidad, los metales pesados forman sólidos que precipitan, para el caso del plomo, que precipita en medios acuosos con pH alcalino, mientras que en medios ácidos se encuentra en forma de iones libres (Gaber, 2023).

Para el caso del mercurio, CCM presenta una eliminación de 98.81%, por otro lado CCM1, CCM2 y CCM3 con inoculo de *M. inermum* presentaron mayor grado de remoción > 99%. Se ha demostrado que las algas verdes tienen la capacidad de potenciar la acumulación de Hg^{2+} debido a la configuración fisiológica de su cloroplasto, tal y como reveló un estudio in vitro de Quiroga-Flores et al., (2021). En la misma línea, Kumar et al. (2020) emplearon *Chlorella vulgaris* para eliminar el mercurio en solución acuosa a pH 6 y 35°C y descubrieron que la especie tenía una capacidad de adsorción de 52,09 mg por gramo de biomasa algal (Kumar et al., 2020). Considerando que *Chlorella* y *Micractinium* pertenecen a la misma familia de Chlorellaceae y que posee una pared celular gruesa difícilmente de lizar (Sydney et al., 2018), y por lo tanto resistente a contaminantes, se corrobora la eficiencia de los sistemas que contienen el biocátodo para la eliminación o transformación del Hg^{2+} en el agua residual.

Figura 7. Remoción de metales pesados del agua residual minera

Fuente: Autor

4.2.2 Características microbiológicas

El agua residual minera presentó concentraciones extremadamente bajas de microorganismos, lo cual puede atribuirse a su naturaleza química y física hostil para los organismos vivos. Este tipo de agua, debido a los contaminantes presentes, como metales pesados y compuestos químicos tóxicos, crea un entorno poco propicio para el crecimiento y desarrollo de la mayoría de los microorganismos. Los detalles de los microorganismos detectados en la muestra inicial de agua se detallan en la Tabla 3.

En las diluciones 10^{-1} y 10^{-2} , se observó un número elevado de unidades formadoras de colonias (UFC) que resultaron incontables, es decir, el número de UFC superó las 300 unidades, lo cual indica una alta concentración de microorganismos viables en estas diluciones. Esto puede sugerir la presencia de microorganismos tolerantes a condiciones extremas, capaces de sobrevivir en medios tan adversos como el agua residual minera.

Por otro lado, en las diluciones 10^{-3} y 10^{-4} , los resultados fueron significativamente menores, con 191 y 62 UFC, respectivamente. Estos valores indican una disminución progresiva de la concentración microbiana conforme se realizaron las diluciones. La reducción en la cantidad de UFC en estas diluciones refleja una tendencia habitual en estudios microbiológicos, donde las muestras diluidas contienen una cantidad cada vez menor de microorganismos viables debido a la dilución de la muestra original.

Tabla 3. Características microbiológicas del agua residual minera

Placa	TAMAÑO			FORMA	BORDE		ELEVACIÓN	TRANSPARENCIA		COLOR		INDICAR COLOR	SUPERFICIE	CONTEO
	PEQUEÑA	MEDIANA	GRANDE	CIRCULAR	ENTERO	ONDULADO	PLANA	OPACA	CREMOSA	NO PIGMENTADAS	PIGMENTADAS		LISA	NUFC
10-1	X			X	X		X	X	X	X		Blanco		INCONTABLE
			X	X		X	X	X	X			Blanco	X	50
10-2	X			X	X		X	X	X	X		Blanco	X	INCONTABLE
		X		X		X	X	X	X			Crema	X	INCONTABLE
		X		X		X	X	X		X		Amarillo	X	17
10-3	X			X		X	X		X	X		Blanco	X	INCONTABLE
		X		X		X	X	X	X			Blanco	X	191
10-4	X			X	X		X	X	X	X		Blanco	X	53
		X		X		X	X	X		X		Anaranjado leve	X	9

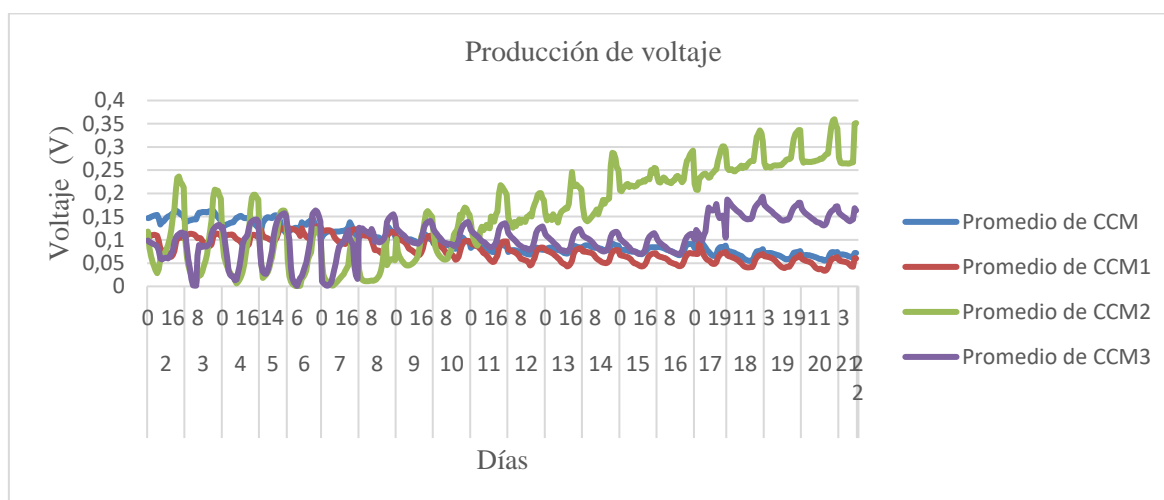
Fuente: Autor

Las bacterias identificadas pueden ser heterótrofas que utilizan el poco carbono orgánico liberado por los quimiolitotrofos. Con base en la morfología, el color, se aislaron tres cepas microbianas, las cuales fueron identificadas como Gram +. Las cepas se identifican como extremofilas, ya que son capaces de sobrevivir en ambientes ricos en metales y carentes de nutrientes. Al final de la experimentación, los biofilms anódicos, presentaron una alta carga microbiana, esto se da en respuesta al uso de la peptona como fuente de nitrógeno orgánico que promueve la formación del biofilm bacteriano en los sistemas (Wu et al., 2021).

4.3 Capacidad biocatalizadora de las microalgas en la producción de bioenergía en celdas de combustible microbianas.

4.3.1 Generación de voltaje por los sistemas CCM

Figura 8. Generación de voltaje por los sistemas CCM



Fuente: Autor

En la figura 8, se puede evidenciar el voltaje producido por los sistemas experimentales, para el caso de CCM correspondiente al sistema que no contiene el inoculo de *M. inermum*, se puede evidenciar un voltaje máximo de 0.131 V a diferencia de las celdas

CCM1, CCM2 y CCM3 que contienen el inoculo de *M. inermum* con voltajes de 0.164 V, 0.363 V, y 0.199 V respectivamente, sin embargo, se puede observar en CCM1 un comportamiento similar al sistema control, quizá debido a fallas en las conexiones eléctricas del sistema. Para el caso de las CCM2 y CCM3 los valores se encuentran acorde a lo establecido por Zhang et al., (2022), quien obtuvo un voltaje que alcanzó el valor pico de 0,1926 V en un sistema de cátodo giratorio con microalgas. Del mismo modo, en un sistema con un biocátodo algal sumergido al 100% se reporta un voltaje de $0,268 \pm 66$ V (Ling et al., 2019). Angioni et al. (2018) establece la relación entre la DQO y la producción de bioelectricidad, e indica que este parámetro revela la cantidad de sustrato orgánico, convertido en bioelectricidad por el reactor CCM. En todos los sistemas estudiados, la degradación del sustrato es eficiente. De hecho, se obtuvo una eliminación de DQO superior al 90% durante los 21 días del experimento, lo que es acorde el voltaje producido.

Se puede evidenciar los cambios de voltaje en los sistemas CCM que contenía el inoculo algal, un incremento del voltaje con la disminución de la intensidad de la luz y la aireación proporcionada, los voltajes aumentaron de manera significativa a diferencia de los periodos de luz donde las microalgas generan oxígeno debido al proceso de la fotosíntesis, sin la necesidad de aireación. Este resultado es similar al reportado por Fu et al., (2009), para un cátodo de la microalga *Spirulina platensis*. Sin embargo, los resultados no están acorde a lo reportado por Khan et al. (2022), que demuestra que el biocátodo de *Desmodesmus sp.* muestra una disminución de voltaje de 0,1857 a 0,547 mV. De manera similar, los hallazgos de la investigación concuerdan con los reportados por Doan et al., (2023) quienes demostraron que la combinación de oxigenación asistida y luz resultó en un equilibrio más estable en la CCM, lo que es importante para su funcionamiento continuo.

4.3.2 Curvas de polarización

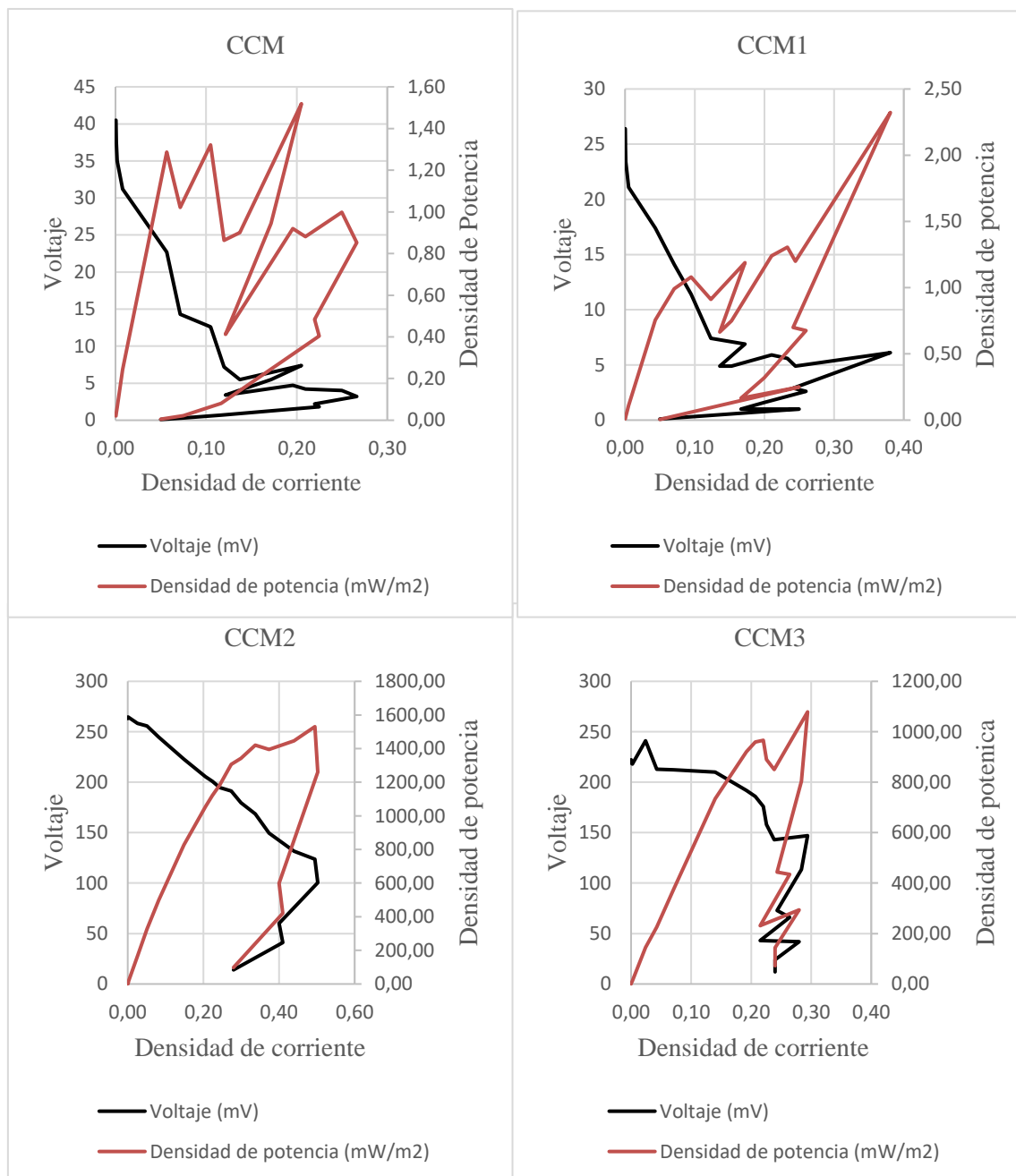
La figura 9, muestra la densidad de potencia y corriente máxima en los sistemas, CCM presentó una densidad de potencia máxima de 1.52 mW/m^2 a una resistencia de 900Ω , CCM1 de 2.32 mW/m^2 con una resistencia de 400Ω , CCM2 de 1530.54 mW/m^2 con una resistencia de 2500Ω y CCM3 1078.97 mW/m^2 con una resistencia de 500Ω . Se ha demostrado que la correlación entre voltaje y la densidad de corriente es inversa. El valor máximo de densidad de corriente (DC) registrado fue de 0.27 mA/m^2 a 300Ω para CCM, para CCM1 0.38 mA/m^2 a 400Ω , para CCM2 0.50 mA/m^2 a 200Ω y para CCM2 0.29 mA/m^2 a 500Ω . Un valor alto de resistencia externa, por ejemplo, $20\,000 \Omega$, generó 0 mW/m^2 .

La diferencia de rendimiento se atribuye principalmente al rendimiento del cátodo porque los sistemas tenían la misma cámara de ánodo, mientras que la reacción catódica dependía del O_2 (como aceptor de electrones) generado por microalgas. Estos hallazgos sugieren que los rendimientos de las MFC con electrodos de biocátodo sumergidos fueron más estables que los de los electrodos sin microalga. Resultados similares fueron reportados por Li et al. (2021), que obtuvieron una densidad de potencia máxima en B-PAMFC (biocátodo) que alcanzó los $1108,9 \text{ mW/m}^3$, la cual fue un 89,4% más alta que la de PAMFC control ($585,6 \text{ mW/m}^3$).

Los valores obtenidos están en línea con lo reportado en la literatura para CCM con microalgas en el cátodo, sin embargo, una comparación exhaustiva es desafiante porque los desempeños funcionales de los dispositivos pueden depender fuertemente de varios parámetros, incluyendo la arquitectura de la CCM, la intensidad de la luz, el período de iluminación, la naturaleza de las aguas residuales y la cepa de microalgas. Sin embargo, los

valores obtenidos de densidad de potencia de la investigación confirmaron la capacidad de las algas para producir suficiente oxígeno para el funcionamiento óptimo de la CCM.

Figura 9. Curvas de polarización



Fuente: Autor

En la Tabla 4, se realiza el análisis ANOVA para verificar si al menos una CCM es diferente, considerando un nivel de significancia de 0.05. F crítico es menor a F calculada,

por lo tanto, se rechaza la hipótesis, evidenciando que existen diferencias significativas entre las medias aritméticas de las 4 CCM, atribuidas a la variación de voltaje que existe entre los tratamientos.

Tabla 4. Resumen del análisis ANOVA

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
CCM	33121	2980,772	0,08999644	0,0014899
CCM1	33121	2361,197	0,07129003	0,00098548
CCM2	33121	5614,018	0,16950026	0,01006553
CCM3	33121	4629,291	0,13976906	0,00442885

Fuente: Autor

Tabla 5. Análisis de varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	201,762	3	67,25	15852,684	0	2,6049763
Dentro de los grupos	562,038	132480	0,004			
Total	763,8	132483				

Fuente: Autor

Los grupos de celdas con cátodo de algas (como CCM2) muestran diferencias notables en comparación con el grupo de control (CCM), tanto en términos de promedios como de dispersión de los datos.

Capítulo 5

Conclusiones

Se construyó una CCM de configuración de celda sumergida, en la cual los cátodos de los sistemas CMM se encontraron sumergidos al 100% en medio BG11. Las CCM sumergidas proporcionan una mejor distribución de la luz a través de la columna de agua, lo que es fundamental para el crecimiento de microalgas, asegurando que todas las microalgas reciban suficiente iluminación, aumentando así la tasa de fotosíntesis. Además, las CCM sumergidas son más fáciles de escalar a grandes volúmenes, lo que es fundamental para aplicaciones industriales.

Se analizaron las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua residual minera, el pH ligeramente neutro de 7.09, concentraciones de nitrito de 122,2 mg/L, nitrito de 200 mg/L, para el caso de los metales pesados como el mercurio y plomo se identificaron valores de 141.6 ug/L y 1976.7 ug/L respectivamente. Para el caso de la caracterización microbiológica del agua se evidencia >300 UFC. Todos los contaminantes analizados en el agua residual minera se encontraron fuera del límite permisible establecido por la legislación ecuatoriana, por lo tanto, es evidente la urgencia de un tratamiento al agua antes de su descarga a un cuerpo de agua.

El tratamiento del agua residual minera mediante el uso de CCM generó elevados porcentajes de remoción para los contaminantes analizados, por ejemplo, se observó un aumento del pH a ligeramente alcalino, una disminución de más del 70% de nitritos y nitratos, para el caso de la DQO se generó una disminución del 99.17%. Para el caso de los iones de metales pesados se logró eliminaciones del 98.81% para el mercurio y > 99% para

el caso del plomo. La remoción de contaminantes obtenidas en la investigación demuestra la eficiencia de los sistemas para el tratamiento del agua residual minera.

La capacidad biocatalizadora de las microalgas en la producción de bioenergía en celdas de combustible microbianas, se demostró mediante la generación de voltaje y densidad de potencia. La caracterización electroquímica de los sistemas, permitió la obtención de voltajes máximos de 0.164 V, 0.363 V, y 0.199 V para las CCM con inóculo de *M. inermum* y para el caso del sistema control se obtuvo un voltaje máximo de 0.131 V. Además, el sistema demostró densidades de potencia máximas de 1530.54 mW/m² para CCM2 y 1078.97 mW/m² para CCM3, lo que demuestra que la microalga presente en los sistemas mejoró la generación de energía.

Recomendaciones

Llevar a cabo el estudio de la influencia de la luz artificial en los sistemas CCM con inóculos de microalgas para determinar el rendimiento de las celdas a diferentes intensidades lumínicas, para determinar el espectro que permita la mayor generación de bioelectricidad, biorremediación y producción de biomasa.

Determinar el porcentaje de oxígeno disuelto producido por los sistemas CCM y la producción de biomasa generada durante el tiempo de tratamiento, con la finalidad de utilizar los subproductos del proceso de tratamiento, ya sea como alimentación de animales o como biofertilizante agrícola.

Aislar y caracterizar nuevos consorcios de microalgas andinas y bacterias electrogénicas para potenciar el rendimiento del sistema para la generación de bioelectricidad y biorremediación de contaminantes de diferentes sustratos. Además, determinar los genes implicados en los procesos estudiados.

Referencias Bibliográficas

- Ai, C., Yan, Z., Hou, S., Zheng, X., Zeng, Z., Amanze, C., Dai, Z., Chai, L., Qiu, G., & Zeng, W. (2020). Effective treatment of acid mine drainage with microbial fuel cells: An emphasis on typical energy substrates. *Minerals*, *10*(5). <https://doi.org/10.3390/min10050443>
- Amaro, H. M., Salgado, E. M., Nunes, O. C., Pires, J. C. M., & Esteves, A. F. (2023). Microalgae systems - environmental agents for wastewater treatment and further potential biomass valorisation. In *Journal of Environmental Management* (Vol. 337). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117678>
- Angioni, S., Millia, L., Mustarelli, P., Doria, E., Temporiti, M. E., Mannucci, B., Corana, F., Quartarone, E., & Quartarone Photosynthetic, E. (2018). Photosynthetic microbial fuel cell with polybenzimidazole membrane: synergy between bacteria and algae for wastewater removal and biorefinery. *Heliyon*, *4*, e00560. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018>
- Cesar Minga, J., Elorza, F. J., Rodriguez, R., Iglesias, A., & Esenarro, D. (2023). Assessment of Water Resources Pollution Associated with Mining Activities in the Parac Subbasin of the Rimac River. *Water (Switzerland)*, *15*(5). <https://doi.org/10.3390/w15050965>
- Christwardana, M., Yoshi, L. A., Setyonadi, I., Maulana, M. R., & Fudholi, A. (2021). A novel application of simple submersible yeast-based microbial fuel cells as dissolved oxygen sensors in environmental waters. *Enzyme and Microbial Technology*, *149*. <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2021.109831>

- Cuadrado, J., & Rodriguez, M. (2022). *Generación de bioelectricidad mediante celdas de combustible microbianas usando aguas residuales de minería aurífera con pleurococcus sp como biocatalizador en la cámara catódica.*
- Doan, C., Sansonnens, J., Morgante, M., Savy, C., Martinet, D., Huguenin, G., Maye, S., Salvo, M. V., & Fischer, F. (2023). LED algal microbial fuel cell stack balancing conception: Electronic voltage reversal blockage, light feed-starvation cycling, and aeration. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103464>
- Fu, C. C., Su, C. H., Hung, T. C., Hsieh, C. H., Suryani, D., & Wu, W. T. (2009). Effects of biomass weight and light intensity on the performance of photosynthetic microbial fuel cells with *Spirulina platensis*. *Bioresource Technology*, 100(18), 4183–4186. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.059>
- Gaber, H. (2023). *Proceedings of the 5th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems Proceedings.*
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., María del Pilar Baptista Lucio, D., & Méndez Valencia Christian Paulina Mendoza Torres, S. (2014). *Metodología de la Investigación* (McGRAW-HILL).
- Huaynate, A. O., Gallegos, M. C., Ramos, L. F., & Soto, A. R. (2021). Potential assessment of *Desmodesmus asymmetricus* and *Chlorella vulgaris* for removal of nitrates and phosphates in wastewater. *Revista Peruana de Biología*, 28(1). <https://doi.org/10.15381/RPB.V28I1.18082>

- Jalili, P., Ala, A., Nazari, P., Jalili, B., & Ganji, D. D. (2024). A comprehensive review of microbial fuel cells considering materials, methods, structures, and microorganisms. In *Heliyon* (Vol. 10, Issue 3). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25439>
- Kannan, N., & Donnellan, P. (2021a). Algae-assisted microbial fuel cells: A practical overview. *Bioresource Technology Reports*, *15*, 100747. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100747>
- Kannan, N., & Donnellan, P. (2021b). Algae-assisted microbial fuel cells: A practical overview. *Bioresource Technology Reports*, *15*, 100747. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100747>
- Khandelwal, A., & Lens, P. N. L. (2023). Simultaneous removal of sulfide and bicarbonate from synthetic wastewater using an algae-assisted microbial fuel cell. *Environmental Technology (United Kingdom)*. <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2243544>
- Kondaveeti, S., Mohanakrishna, G., Pagolu, R., Kim, I. W., Kalia, V. C., & Lee, J. K. (2019). Bioelectrogenesis from Raw Algal Biomass Through Microbial Fuel Cells: Effect of Acetate as Co-substrate. *Indian Journal of Microbiology*, *59*(1), 22–26. <https://doi.org/10.1007/s12088-018-0769-2>
- Kumar, M., Singh, A. K., & Sikandar, M. (2020). Biosorption of Hg (II) from aqueous solution using algal biomass: kinetics and isotherm studies. *Heliyon*, *6*(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03321>
- Kusmayadi, A., Leong, Y. K., Yen, H. W., Huang, C. Y., Dong, C. Di, & Chang, J. S. (2020). Microalgae-microbial fuel cell (mMFC): an integrated process for electricity generation, wastewater treatment, CO₂ sequestration and biomass production.

International Journal of Energy Research, 44(12), 9254–9265.
<https://doi.org/10.1002/er.5531>

Lee, M., Kondaveeti, S., Jeon, T., Kim, I., & Min, B. (2020). Influence of humidity on performance of single chamber air-cathode microbial fuel cells with different separators. *Processes*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/PR8070861>

Li, M., Zhou, M., Luo, J., Tan, C., Tian, X., Su, P., & Gu, T. (2019). Carbon dioxide sequestration accompanied by bioenergy generation using a bubbling-type photosynthetic algae microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 280, 95–103.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.038>

Lin, L., Yang, H., & Xu, X. (2022). Effects of Water Pollution on Human Health and Disease Heterogeneity: A Review. In *Frontiers in Environmental Science* (Vol. 10). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.880246>

Ling, J., Xu, Y., Lu, C., Lai, W., Xie, G., Zheng, L., Talawar, M. P., Du, Q., & Li, G. (2019). Enhancing stability of microalgae biocathode by a partially submerged carbon cloth electrode for bioenergy production from wastewater. In *Energies* (Vol. 12, Issue 17). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en12173229>

Luc Leroy, M. N., Jacques Richard, M., Mouhamed, A. N., Sifeu, T. K., Reynolds Yvan, A. S., & Said, R. (2020a). Physicochemical characterization of mining waste from the betare-oya gold area (East Cameroon) and an adsorption test by sabga smectite (North-West Cameroon). *Scientifica*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6293819>

Luc Leroy, M. N., Jacques Richard, M., Mouhamed, A. N., Sifeu, T. K., Reynolds Yvan, A. S., & Said, R. (2020b). Physicochemical characterization of mining waste from the

- betare-oya gold area (East Cameroon) and an adsorption test by sabga smectite (North-West Cameroon). *Scientifica*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6293819>
- MAATE, M. del A. A. y T. E. (2013). *AGUA. CALIDAD DEL AGUA. MUESTREO. MANEJO Y CONSERVACIÓN DE MUESTRAS. NTE INEN 2169:2013.*
- Mahmoud, R. H., Samhan, F. A., Ibrahim, M. K., Ali, G. H., & Hassan, R. Y. A. (2022). Waste to energy conversion utilizing nanostructured Algal-based microbial fuel cells. *Electrochemical Science Advances*, 2(6). <https://doi.org/10.1002/elsa.202100071>
- Mansoor, B., Ashraf, S., Rehman, U., Ullah, Z., & Sheikh, Z. (2023). *Integration of Microalgae-Microbial Fuel Cell with Microbial Electrolysis Cell for Wastewater Treatment and Energy Production.* 72. <https://doi.org/10.3390/ecws-7-14306>
- Marshall, B. G., Veiga, M. M., da Silva, H. A. M., & Guimarães, J. R. D. (2020). Cyanide Contamination of the Puyango-Tumbes River Caused by Artisanal Gold Mining in Portovelo-Zaruma, Ecuador. In *Current Environmental Health Reports* (Vol. 7, Issue 3, pp. 303–310). Springer. <https://doi.org/10.1007/s40572-020-00276-3>
- Mestanza-Ramón, C., Cuenca-Cumbicus, J., D'orio, G., Flores-Toala, J., Segovia-Cáceres, S., Bonilla-Bonilla, A., & Straface, S. (2022). Gold Mining in the Amazon Region of Ecuador: History and a Review of Its Socio-Environmental Impacts. *Land*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/land11020221>
- Mestanza-Ramón, C., Ordoñez-Alcivar, R., Arguello-Guadalupe, C., Carrera-Silva, K., D'orio, G., & Straface, S. (2022). History, Socioeconomic Problems and Environmental Impacts of Gold Mining in the Andean Region of Ecuador. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph19031190>

- Min, B., Poulsen, F. W., Thygesen, A., & Angelidaki, I. (2012). Electric power generation by a submersible microbial fuel cell equipped with a membrane electrode assembly. *Bioresource Technology*, *118*, 412–417. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.097>
- Moloantoa, K. M., Khetsha, Z. P., Kana, G. E. B., Maleke, M. M., Van Heerden, E., Castillo, J. C., & Cason, E. D. (2023). Metagenomic assessment of nitrate-contaminated mine wastewaters and optimization of complete denitrification by indigenous enriched bacteria. *Frontiers in Environmental Science*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1148872>
- Nagendranatha Reddy, C., Nguyen, H. T. H., Noori, M. T., & Min, B. (2019). Potential applications of algae in the cathode of microbial fuel cells for enhanced electricity generation with simultaneous nutrient removal and algae biorefinery: Current status and future perspectives. In *Bioresource Technology* (Vol. 292). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122010>
- Narváez, R. (2022). *LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN EN LA SUBSIDENCIA DEL TERRENO EN LA CALLE COLÓN Y ERNESTO A. CASTRO (DICIEMBRE 2021) ZARUMA, PROVINCIA DE EL ORO.*
- Quiroga-Flores, R., Guédron, S., & Achá, D. (2021). High methylmercury uptake by green algae in Lake Titicaca: Potential implications for remediation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *207*. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111256>
- Rojas-Flores, S., de la Cruz Noriega, M., Cabanillas-Chirinos, L., Carranza-Vigo, C., Quiroz De La Cruz, J., Zavaleta Portilla, S., & Angelats-Silva, L. (2021). Generation of electrical energy by means of a photobioreactor with microalgae “Chlorella sp.”

Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology, 2021-July. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.127>

Saba, B., Christy, A. D., Yu, Z., Co, A. C., Islam, R., & Tuovinen, O. H. (2017). Characterization and performance of anodic mixed culture biofilms in submersed microbial fuel cells. *Bioelectrochemistry*, *113*, 79–84. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2016.10.003>

Sydney, T., Marshall-Thompson, J. A., Kapoore, R. V., Vaidyanathan, S., Pandhal, J., & Fairclough, J. P. A. (2018). The effect of high-intensity ultraviolet light to elicit microalgal cell lysis and enhance lipid extraction. *Metabolites*, *8*(4). <https://doi.org/10.3390/metabo8040065>

Tay, Z. H. Y., Ng, F. L., Ling, T. C., Iwamoto, M., & Phang, S. M. (2022). The use of marine microalgae in microbial fuel cells, photosynthetic microbial fuel cells and biophotovoltaic platforms for bioelectricity generation. In *3 Biotech* (Vol. 12, Issue 7). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s13205-022-03214-2>

World Health Organization. (2007). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater*. World Health Organization.

Wu, J. Y., Lay, C. H., Chia, S. R., Chew, K. W., Show, P. L., Hsieh, P. H., & Chen, C. C. (2021). Economic potential of bioremediation using immobilized microalgae-based microbial fuel cells. *Clean Technologies and Environmental Policy*, *23*(8), 2251–2264. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02131-x>

Xiao, M., Xu, S., Yang, B., Zeng, G., Qian, L., Huang, H., & Ren, S. (2022). Contamination, Source Apportionment, and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland

- Soils Surrounding a Typical Copper Tailings Pond. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(21).
<https://doi.org/10.3390/ijerph192114264>
- Zhang, H., Yan, Q., An, Z., & Wen, Z. (2022). A revolving algae biofilm based photosynthetic microbial fuel cell for simultaneous energy recovery, pollutants removal, and algae production. *Frontiers in Microbiology*, 13.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.990807>
- Zhang, J., Zhang, Z., Rong, K., Guo, H., Cai, J., Xing, Y., Ren, L., Ren, J., Wu, T., Li, J., & Zheng, P. (2022). Simultaneous Anaerobic Ammonium Oxidation and Electricity Generation in Microbial Fuel Cell: Performance and Electrochemical Characteristics. *Processes*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/pr10112379>
- Zhang, Y., & Angelidaki, I. (2012). A simple and rapid method for monitoring dissolved oxygen in water with a submersible microbial fuel cell (SBMFC). *Biosensors and Bioelectronics*, 38(1), 189–194. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2012.05.032>

Anexos

Anexo 1: Cultivos de microalgas



Anexo 2: Preparación de electrodos con microalgas




Anexo 3: Piscinas de sedimentación del agua residual minera



Anexo 4: Toma de muestras de agua residual minera



Anexo 5: Análisis físico químico inicial del agua residual minera

	BMTLAB INFORME DE ENSAYOS PLE-1027-24 ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS
---	---

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Nombre: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Joana Fernanda Iza Guaman

Dirección: Avenida Monseñor Leonidas Proaño

Correo Electrónico: joana.iza@esPOCH.edu.ec

Teléfono: 09876764515

Riobamba, 09 de Septiembre de 2024

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Origen de Muestra: Agua Residual Minera

Número de Muestras: 1

Punto de Muestra: Zaruma

Técnico Responsable: Ing. Juan José Oleas

Coordenadas: 651616.595365/
9588092.984395

Fecha y Hora de Recepción de la Muestra: 30/08/24 16:00:00

Tipo de Muestreo: Simple

Fecha y Hora de Muestreo: N/A

Código de la Muestra: MA - 056-24

Condiciones Ambientales del Análisis: 23,5 °C ; 57,7 %HR

Norma Técnica de Muestreo: N/A

Condiciones Ambientales del Muestreo: N/A

RESULTADOS**METALES**

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U(K=2)	MÉTODO/PROCEDIMIENTO
MERCURIO	0,1416	mg/L	....	EPA 7470 A SM 3112 B/PE-BMTLAB-68
PLOMO	1,9767	mg/L	....	SM 3113 B/BMTLAB-69

Los resultados del presente informe corresponden exclusivamente a la(s) muestra(s) analizada(s) y mediciones in.situ
 BMTLAB libera su responsabilidad por la información proporcionada por el cliente y el uso que se le dará a los resultados
 Se prohíbe la reproducción parcial de este informe sin la autorización del laboratorio.


Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.
 Sin la firma del responsable autorizado de BMTLAB, este informe no es válido.

Los parámetros fueron realizados en el Laboratorio: BMTLAB

Autorizado y firmado electronicamente por:



Anexo 6: Análisis físico químico final del agua residual minera

	BMTLAB INFORME DE ENSAYOS PLE-1029-24 ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS
---	---

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Nombre: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Joana Fernanda Iza Guaman

Dirección: Avenida Monseñores Leonidas Proaño

Correo Electrónico: joana.iza@esPOCH.edu.ec

Teléfono: 09876764515

Riobamba, 02 de Octubre de 2024

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Origen de Muestra: Agua Residual Minera - Zaruma

Número de Muestras: 1

Muestra: Portovelo

Punto de Muestra: CH1 - ACID

Técnico Responsable: Ing. Juan José Oleas

Coordenadas: N/A

Fecha y Hora de Recepción de la Muestra: 23/09/24 16:00:00

Tipo de Muestreo: Simple

Fecha y Hora de Muestreo: N/A

Código de la Muestra: MA - 058-24

Condiciones Ambientales del Análisis: 23,5 °C; 57,7 %HR

Norma Técnica de Muestreo: N/A

Condiciones Ambientales del Muestreo: N/A

RESULTADOS**METALES**

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U(K=2)	MÉTODO/PROCEDIMIENTO
MERCURIO	1,68	µg/L	....	EPA 7470 A SM 3112 B/PE-BMTLAB-68
PLOMO	0,12	µg/L	....	SM 3113 B/BMTLAB-69

Los resultados del presente informe corresponden exclusivamente a la(s) muestra(s) analizada(s) y mediciones in situ. BMTLAB libera su responsabilidad por la información proporcionada por el cliente y el uso que se le dará a los resultados. Se prohíbe la reproducción parcial de este informe sin la autorización del laboratorio.


Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.

Sin la firma del responsable autorizado de BMTLAB, este informe no es válido.

Los parámetros fueron realizados en el Laboratorio: BMTLAB

Autorizado y firmado electrónicamente por:



	BMTLAB INFORME DE ENSAYOS PLE-1030-24 ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS
---	---

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Nombre: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Joana Fernanda Iza Guaman
Dirección: Avenida Monseños Leonidas Proaño
Correo Electrónico: joana.iza@epoch.edu.ec
Teléfono: 09876764515 **Riobamba, 02 de Octubre de 2024**

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Origen de Muestra:	Agua Residual Minera - Zaruma	Número de Muestras:	1
Punto de Muestra:	Portovelo	Técnico Responsable:	Ing. Juan José Oleas
Coordenadas:	N/A	Fecha y Hora de Recepción de la Muestra:	23/09/24 16:00:00
Tipo de Muestreo:	Simple	Fecha y Hora de Muestreo:	N/A
Código de la Muestra:	MA - 059-24	Condiciones Ambientales del Análisis:	23,5 °C; 57,7 %HR
Norma Técnica de Muestreo:	N/A	Condiciones Ambientales del Muestreo:	N/A

RESULTADOS**METALES**

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U(K=2)	MÉTODO/PROCEDIMIENTO
MERCURIO	0,73	µg/L	....	EPA 7470 A SM 3112 B/PE-BMTLAB-68
PLOMO	0,08	µg/L	....	SM 3113 B/BMTLAB-69


Los resultados del presente informe corresponden exclusivamente a la(s) muestra(s) analizada(s) y mediciones in.situ
 BMTLAB libera su responsabilidad por la información proporcionada por el cliente y el uso que se le dará a los resultados
 Se prohíbe la reproducción parcial de este informe sin la autorización del laboratorio.

Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.
 Sin la firma del responsable autorizado de BMTLAB, este informe no es válido.

Los parámetros fueron realizados en el Laboratorio: BMTLAB

Autorizado y firmado electrónicamente por:



	BMTLAB INFORME DE ENSAYOS PLE-1031-24 ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS
---	---

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Nombre: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Joana Fernanda Iza Guaman
Dirección: Avenida Monseños Leonidas Proaño
Correo Electrónico: joana.iza@epoch.edu.ec
Teléfono: 09876764515 **Riobamba, 02 de Octubre de 2024**

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Origen de Muestra:	Agua Residual Minera - Zaruma	Número de Muestras:	1
Punto de Muestra:	Portovelo	Técnico Responsable:	Ing. Juan José Oleas
Coordenadas:	N/A	Fecha y Hora de Recepción de la Muestra:	23/09/24 16:00:00
Tipo de Muestreo:	Simple	Fecha y Hora de Muestreo:	N/A
Código de la Muestra:	MA - 060-24	Condiciones Ambientales del Análisis:	23,5 °C; 57,7 %HR
Norma Técnica de Muestreo:	N/A	Condiciones Ambientales del Muestreo:	N/A

RESULTADOS**METALES**

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U(K=2)	MÉTODO/PROCEDIMIENTO
MERCURIO	0,49	µg/L	....	EPA 7470 A SM 3112 B/PE-BMTLAB-68
PLOMO	0,44	µg/L	....	SM 3113 B/BMTLAB-69


Los resultados del presente informe corresponden exclusivamente a la(s) muestra(s) analizada(s) y mediciones in.situ
 BMTLAB libera su responsabilidad por la información proporcionada por el cliente y el uso que se le dará a los resultados
 Se prohíbe la reproducción parcial de este informe sin la autorización del laboratorio.

Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.
 Sin la firma del responsable autorizado de BMTLAB, este informe no es válido.

Los parámetros fueron realizados en el Laboratorio: BMTLAB

Autorizado y firmado electrónicamente por:



	BMTLAB INFORME DE ENSAYOS PLE-1032-24 ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUAS
---	---

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Nombre: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Joana Fernanda Iza Guaman
Dirección: Avenida Monseños Leonidas Proaño
Correo Electrónico: joana.iza@epoch.edu.ec
Teléfono: 09876764515 **Riobamba, 02 de Octubre de 2024**

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

Origen de Muestra:	Agua Residual Minera - Zaruma	Número de Muestras:	1
Punto de Muestra:	Portovelo	Técnico Responsable:	Ing. Juan José Oleas
Coordenadas:	CH4 - ACID	Fecha y Hora de Recepción de la Muestra:	23/09/24 16:00:00
Tipo de Muestreo:	N/A	Fecha y Hora de Muestreo:	N/A
Código de la Muestra:	Simple	Condiciones Ambientales del Análisis:	23,5 °C; 57,7 %HR
Norma Técnica de Muestreo:	MA - 061-24	Condiciones Ambientales del Muestreo:	N/A

RESULTADOS**METALES**

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDADES	U(K=2)	MÉTODO/PROCEDIMIENTO
MERCURIO	0,53	µg/L	....	EPA 7470 A SM 3112 B/PE-BMTLAB-68
PLOMO	0,06	µg/L	....	SM 3113 B/BMTLAB-69

Los resultados del presente informe corresponden exclusivamente a la(s) muestra(s) analizada(s) y mediciones in.situ
 BMTLAB libera su responsabilidad por la información proporcionada por el cliente y el uso que se le dará a los resultados
 Se prohíbe la reproducción parcial de este informe sin la autorización del laboratorio.

Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.
 Sin la firma del responsable autorizado de BMTLAB, este informe no es válido.

Los parámetros fueron realizados en el Laboratorio: BMTLAB

Autorizado y firmado electrónicamente por:

