



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

SEDE VALLENAR

UNIVERSIDAD DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA

**“DISEÑO Y MONITOREO DE CELDAS MICROBIANAS
DE COMBUSTIBLE VEGETALES”**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Técnico Universitario en Metalurgia

Profesor Guía: Dr. Cristian Urdiales Flores
Profesora Co-guía: Mg. Carolina Venegas Abarzúa

Joaquín Nicolas Briceño Briceño

Rosaura Lorena Valenzuela Soto

Vallenar, Chile 2025

DEDICATORIA

Joaquín Briceño.

Dedico mi carrera y mi título a mi familia, mi madre, mi padre y mi hermano menor, quienes estuvieron apoyándome académicamente desde antes de la universidad y dándome las facilidades para estudiar. Los amo eternamente.

Rosaura Valenzuela.

Dedico este trabajo con todo mi amor a mi abuela María, a mi padre y a mi tío Fernando, quienes siempre me han dado su apoyo incondicional y los mejores consejos. Con su sabiduría, cariño y fortaleza, me han enseñado el valor de la humildad, la perseverancia y el amor familiar. Cada uno, a su manera, ha sido una fuente constante de inspiración y me ha guiado a lo largo de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Joaquín Briceño.

Agradezco a mi familia por el apoyo incondicional, a mi madre por darme consejos acerca de la universidad, a mi padre acerca de responsabilidad, y a mi hermano menor por darme motivación para ser un ejemplo.

Agradezco eternamente a mi compañera Rosaura Valenzuela, quien fue fundamental en el proyecto. Agradezco su apoyo, comprensión y paciencia, así como el esfuerzo que aplicó en el proyecto. Para ti, compañera de proyecto, muchas gracias.

Finalmente, agradezco a nuestro profesor guía, el Dr. Cristian Urdiales, por guiar y apoyar el proyecto actual, y a nuestra profesora Co-guía, Carolina Venegas, quien también nos fue dando sus puntos de vista para hacer esto posible.

Rosaura Valenzuela.

En primer lugar, agradezco profundamente a mi familia, especialmente a mis padres, por su amor incondicional, apoyo y paciencia en cada momento del proceso.

Y de manera muy especial, a mi querida amiga Neilibeth, por su amistad sincera, por escucharme, motivarme y acompañarme con cariño durante los momentos de cansancio y de alegría. Su apoyo fue fundamental para mantenerme firme y seguir adelante.

A mis profesores guías, Dr. Cristian Urdiales Flores y Mg. Carolina Venegas Abarzúa, por su apoyo, orientación y compromiso durante todo el desarrollo de esta investigación. Agradezco profundamente su disposición, sus valiosos consejos y su acompañamiento tanto en el laboratorio como en la revisión de este trabajo. Su experiencia, dedicación y guía fueron fundamentales en cada etapa de este proceso.

Índice de contenidos

CAPÍTULO I. MARCO INTRODUCTORIO	3
1.1. Introducción	3
1.2. Objetivo general	4
1.3. Objetivos específicos	4
1.4. Planteamiento del problema.....	4
1.5. Hipótesis.....	6
1.6. Antecedentes	6
1.7. Justificación	8
1.8. Alcances	10
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Fitorremediación	11
2.2. Tipos de fitorremediación	11
2.3. Principio de la fitorremediación.....	13
2.4. Relaves mineros	15
2.5. Plant Fuel Cells (Celdas de Combustible Vegetales).....	17
2.6. Arduino Uno	18
2.7. Image J	20
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	22
3.1. Caracterización fisicoquímica de relaves mineros	22
3.2. Toma de muestras	23
3.3. Determinación superficial de especies metalófitas	24
3.4. Preparación de la membrana	24

3.5.	Preparación del ánodo	25
3.6.	Preparación del cátodo	26
3.7.	Configuración de las columnas	27
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS		31
4.1.	Caracterización de relave minero de Piuquenes.....	31
4.2.	Caracterización de relave minero Ovejería	33
4.3.	Caracterización inicial de área de las plantas.....	35
4.4.	Caracterización final de área de las plantas	36
4.5.	Caracterización inicial de masa de <i>Carpobrotus chilensis</i>	38
4.6.	Caracterización final de masa de <i>Carpobrotus chilensis</i>	39
4.7.	Análisis de voltaje durante un monitoreo de 33 días	40
4.8.	Adición de lodo y cambio de resistencia.....	43
4.9.	Análisis de parámetros del lixiviado de las columnas	46
4.10.	Evaluación económica de construcción de las PFC	48
CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN		49
Bibliografía		50

Índice de figuras

Figura 2.1	Esquema que representa la fitoextracción (Fuente: https://www.phytosudoe.eu/el-proyecto/que-es-la-fitorremediacion/)	11
Figura 2.2	Esquema que representa la rizodegradación (Fuente: https://www.phytosudoe.eu/el-proyecto/que-es-la-fitorremediacion/)	12
Figura 2.3	Esquema que representa la rizofiltración (Fuente: https://rizofiltracion.blogspot.com/).....	12
Figura 2.4	Esquema que representa la fitovolatilización (Fuente: https://www.phytosudoe.eu/el-proyecto/que-es-la-fitorremediacion/)	13
Figura 2.5	Esquema que representa la fitoestabilización (Fuente: https://www.phytosudoe.eu/el-proyecto/que-es-la-fitorremediacion/)	13
Figura 2.6	Esquema que representa una celda microbiana de combustible vegetal (Fuente: Producción de energía eléctrica a partir de plantas vivas en pilas de combustible microbianas Energía Limpia Academias de Oxford)	18
Figura 3.1	Membrana de arcilla utilizada como medio de intercambio protónico.	25
Figura 3.2	a) Membrana de intercambio protónico, dispuesta sobre el ánodo de fieltro de grafito, b) Vista superior de membrana con el ánodo de fieltro de grafito, c) Vista inferior del cierre del ánodo de fieltro de grafito de la membrana, d) Vista lateral del ánodo de fieltro de grafito ensamblado alrededor de la membrana.....	26
Figura 3.3	a) Vista superior de membrana acoplada con cátodo de malla de acero inoxidable, b) Vista lateral del cátodo de malla de acero inoxidable acoplada al interior de la membrana.	27
Figura 3.4	a) Vista superior de membrana, cátodo y ánodo instalado al interior de la botella, b) Vista lateral de PFC con electrodos instalados.	28
Figura 3.5	PFC conectadas al sistema Arduino.	30
Figura 4.1	Vista superior de posición de las plantas en las columnas.	36
Figura 4.2	Área foliar de <i>Carpobrotus chilensis</i> . a) Columna 1, b) Columna 2, c) Columna 3, d) Columna 4.....	36
Figura 4.3	Voltaje promedio de las PFC durante 33 días de monitoreo. C1- Columna 1, C2 – Columna 2, C3 – Columna 3 y C4 – Columna 4.....	41

Figura 4.4 Voltaje promedio de las PFC durante 20 días de monitoreo.46

Índice de tablas

Tabla 4.1 Caracterización fisicoquímica del relave minero de Piuquenes.....	32
Tabla 4.2 Caracterización fisicoquímica del relave minero de Ovejería.	34
Tabla 4.3 Área foliar inicial de <i>Carpobrotus chilensis</i>	35
Tabla 4.4 Área foliar final de <i>Carpobrotus chilensis</i>	37
Tabla 4.5 Pesos iniciales de <i>Carpobrotus chilensis</i>	38
Tabla 4.6 Pesos finales de <i>Carpobrotus chilensis</i>	40
Tabla 4.7 Promedio de voltaje en cada columna.....	43
Tabla 4.8 pH del lixiviado de las columnas.	46
Tabla 4.9 Conductividad eléctrica del lixiviado de las columnas.	47
Tabla 4.10 Sólidos totales del lixiviado de las columnas.	47
Tabla 4.11 Precios de materiales.....	48

RESUMEN

Este estudio tuvo como objetivo diseñar y evaluar un sistema de celdas de combustible vegetal (PFC) utilizando como sustratos relaves mineros de Ovejería y Piuquenes de la Región Metropolitana de Chile y la especie metalófito *Carpobrotus chilensis*. La investigación se realizó con un enfoque cuantitativo y un diseño experimental de laboratorio para analizar la relación entre el crecimiento vegetal, la generación de bioelectricidad y las características fisicoquímicas de los relaves.

Para ello, se configuraron cuatro columnas experimentales que incorporaron membranas de arcilla, ánodos de fieltro de grafito, cátodos de acero inoxidable y un sistema de monitoreo basado en Arduino Uno. Se evaluaron el voltaje, el pH, la conductividad eléctrica, los sólidos totales y los parámetros de crecimiento vegetal durante 60 días.

Los resultados mostraron diferencias significativas entre los relaves: el relave de Ovejería presentó mejores condiciones fisicoquímicas para el crecimiento de *Carpobrotus chilensis*, mientras que el de Piuquenes generó un voltaje promedio más alto (0,38-0,40 V), asociado a una mayor conductividad iónica del sustrato. Se concluye que la implementación del acondicionamiento del crecimiento vegetal (PFC) con *Carpobrotus chilensis* es viable para la producción de bioelectricidad y la promoción de procesos de fitoestabilización en entornos mineros, representando una alternativa sustentable para la gestión de relaves.

PALABRAS CLAVE: RELAVES MINEROS, CARPOBROTUS CHILENSIS, FITORREMEDIACIÓN, BIOELECTRICIDAD, FITORREMEDIACIÓN.

ABSTRACT

This study aimed to design and evaluate a plant fuel cell (PFC) system using mining tailings from Ovejería and Piuquenes in the Metropolitan Region of Chile and the metallophyte species *Carpobrotus chilensis* as substrates. The research was conducted with a quantitative approach and a laboratory experimental design to analyze the relationship between plant growth, bioelectricity generation, and the physicochemical characteristics of the tailings.

To this end, four experimental columns were configured, incorporating clay membranes, graphite felt anodes, stainless steel cathodes, and a monitoring system based on an Arduino Uno. Voltage, pH, electrical conductivity, total solids, and plant growth parameters were evaluated over 60 days.

The results showed significant differences between the tailings: the Ovejería tailings presented better physicochemical conditions for the growth of *Carpobrotus chilensis*, while the Piuquenes tailings generated a higher average voltage (0.38–0.40 V), associated with a higher ionic conductivity of the substrate. It is concluded that the implementation of plant growth conditioning (PFC) with *Carpobrotus chilensis* is viable for the production of bioelectricity and the promotion of phytostabilization processes in mining environments, representing a sustainable alternative for tailings management.

KEYWORDS: MINING TAILINGS, CARPOBROTUS CHILENSIS, PHYTOREMEDIATION, BIOELECTRICITY, PHYTOREMEDIATION

CAPÍTULO I. MARCO INTRODUCTORIO

1.1.Introducción

La minería representa un pilar fundamental de la economía global, generando productos de alto valor como metales y minerales esenciales para la industria. Sin embargo, produce grandes volúmenes de residuos, conocidos como relaves mineros, compuestos por partículas finas de roca, agua y reactivos químicos, que causan contaminación severa en suelos, aguas subterráneas y ecosistemas, afectando la salud humana, la flora y la fauna. Ante esta problemática, se han desarrollado soluciones sostenibles basadas en tecnologías bioelectroquímicas, como las Plant Fuel Cells (PFC), que integran plantas y microbios rizosféricos en un sistema híbrido para remediar el suelo y producir energía renovable. En investigaciones recientes, se ha utilizado la fitorremediación, que consiste en plantar especies vegetales metalófitas, que pueden estabilizar, remediar, absorber, translocar, extraer y volatilizar metales pesados con características tóxicas (*Fitorremediación: Una Alternativa Para Eliminar La Contaminación*, 2011). En esencia, un sistema de PFC consiste en columnas donde las raíces de plantas liberan exudados orgánicos que alimentan a bacterias electrogénicas, generando bioelectricidad medible mediante flujo de electrones, mientras que las plantas estabilizan metales pesados mediante procesos de fitoestabilización y fitorremediación.

El presente proyecto de titulación se propone, a través de la fitoestabilización de relaves mineros mediante PFC, evaluando la eficiencia de la especie *Carpobrotus chilensis*, comúnmente conocida como "DOCA", una planta suculenta adaptada a suelos áridos y salinos. Se realizarán ensayos en columnas (Plant Fuel Cells) con relaves mineros de Ovejería y Piuquenes, evaluando diferentes condiciones de riego y realizando el monitoreo de parámetros eléctricos como el voltaje. Esto permitirá dilucidar las condiciones óptimas en que la especie *Carpobrotus Chilensis* maximiza su eficiencia en la fitoestabilización de metales pesados.

1.2. Objetivo general

Diseñar y evaluar un sistema de celda de combustible microbiana vegetal a base de *Carpobrotus chilensis* y relaves mineros de Piuquenes y de Ovejería de la Región Metropolitana.

1.3. Objetivos específicos

- Optimizar las condiciones de crecimiento de *Carpobrotus chilensis*.
- Medir y monitorear los parámetros eléctricos como el voltaje de la PFC.
- Evaluar la capacidad de los relaves mineros de Ovejería y Piuquenes para funcionar como sustrato en una celda de combustible microbiana vegetal (PFC).
- Medir y monitorear los parámetros de crecimiento de *Carpobrotus chilensis*.

1.4. Planteamiento del problema

La actividad minera constituye una de las principales fuentes de generación de residuos sólidos industriales, especialmente en países con una fuerte dependencia económica del sector extractivo. Durante los procesos de beneficio y concentración de minerales metálicos, se producen grandes volúmenes de relaves y ripios, los cuales son depositados en tranques o embalses diseñados para su contención. Sin embargo, estos depósitos suelen contener una mezcla de partículas finas, reactivos químicos residuales y metales pesados como plomo (Pb), cadmio (Cd), arsénico (As), cobre (Cu), mercurio (Hg) y zinc (Zn), entre otros. La falta de un manejo adecuado de dichos residuos puede provocar la contaminación del suelo, del agua y del aire, debido a la liberación progresiva de estos elementos al ambiente.

En el suelo, los metales pesados se acumulan en la capa superficial, alterando sus propiedades fisicoquímicas, reduciendo su fertilidad y afectando los procesos biogeoquímicos que sustentan la vida microbiana y vegetal. En el caso del agua, la

infiltración de lixiviados provenientes de los relaves puede contaminar cuerpos superficiales y subterráneos, sobre todo cuando ocurre el fenómeno de drenaje ácido de mina (DAM), producto de la oxidación de sulfuros metálicos. Este proceso genera aguas con pH extremadamente bajo y elevadas concentraciones de metales disueltos, que se dispersan fácilmente en los ecosistemas acuáticos. A su vez, la erosión eólica y la volatilización de partículas finas contaminadas pueden contribuir a la contaminación del aire, afectando zonas cercanas a los depósitos y facilitando la dispersión de los contaminantes a grandes distancias.

Las consecuencias ambientales y en la salud humana derivadas de la exposición a estos contaminantes son considerables y de largo plazo. En los ecosistemas, la presencia de metales pesados en concentraciones elevadas provoca toxicidad en plantas, disminución de la biodiversidad microbiana, bioacumulación en organismos acuáticos y terrestres y, en casos severos, la pérdida total de la capacidad productiva del suelo. Desde el punto de vista de la salud pública, la exposición prolongada a metales como el plomo, cadmio o arsénico se asocia con trastornos neurológicos, renales, respiratorios y reproductivos, así como con efectos cancerígenos en humanos. Las comunidades ubicadas en las cercanías de zonas mineras o de antiguos depósitos de relaves son especialmente vulnerables, ya que pueden verse expuestas por diversas vías: inhalación de polvo contaminado, consumo de agua subterránea afectada o ingestión de alimentos cultivados en suelos impactados.

A pesar de la magnitud del problema, la falta de soluciones efectivas y sostenibles continúa siendo una limitante importante en la gestión de residuos mineros. Las técnicas fisicoquímicas convencionales como la encapsulación, el lavado de suelos, la solidificación o la estabilización química suelen implicar altos costos económicos, elevados requerimientos energéticos y efectos secundarios sobre el ecosistema, además de generar nuevos residuos. Por otra parte, la normativa ambiental en diversos países no clasifica a los relaves como residuos peligrosos, lo que reduce el control regulatorio sobre su manejo y disposición final.

Ante este escenario, resulta imperativo desarrollar y aplicar estrategias biotecnológicas sostenibles que permitan la estabilización y confinamiento de los metales pesados presentes en los relaves, evitando su dispersión y reduciendo sus impactos ambientales y sanitarios. En este contexto, la fitoestabilización emerge como una alternativa innovadora y ecológicamente compatible, basada en el uso de especies vegetales tolerantes a la toxicidad metálica para inmovilizar los contaminantes en el suelo y la rizosfera, contribuyendo a la recuperación de sitios degradados y al cumplimiento de los principios de desarrollo sostenible en el sector minero.

1.5. Hipótesis

La implementación de celdas de combustible microbiana vegetal (Plant Fuel Cell) utilizando *Carpobrotus chilensis* y relaves mineros de Ovejería y Piuquenes como sustrato es viable y permitirá la generación de bioelectricidad monitorizable, correlacionada con el crecimiento y desarrollo de la especie vegetal durante el periodo experimental.

1.6. Antecedentes

Investigaciones pioneras han explorado el uso de plantas para mejorar la eficiencia de las celdas de combustible microbianas (PMFC) mediante la rizosfera, donde los exudados vegetales sirven como sustrato para microorganismos electrogénicos. Por ejemplo, en el año 2012 se desarrolló un prototipo de PMFC con plantas vivas como *Glyceria máxima* para generar electricidad en entornos húmedos (Timmers et al., 2012). Otro estudio clave lo constituye la evaluación de PMFC en sistemas de tratamiento de aguas residuales, integrando plantas para potenciar la producción de bioenergía (Wetser et al., 2015). Además, se ha revisado exhaustivamente la tecnología de PMFC, destacando su aplicación en suelos contaminados (Kabutey et al., 2019). Por otro lado, se analizó el panorama multifacético de las celdas de combustible microbianas (PMFC) de las plantas, investigando los factores que afectan, las configuraciones, las aplicaciones, los desafíos y las perspectivas que dan forma a su diseño (Chong et al., 2025).

Durante la investigación se reportaron voltajes de hasta 0,8 V en sistemas con plantas vivas, atribuyéndose aproximadamente el 70% de la energía generada a la actividad rizosférica. En ese mismo estudio, la densidad de potencia máxima obtenida con una resistencia externa de 900 Ω alcanzó 32 mW/m² en la PFC de baja corriente y 80 mW/m² en la PMFC de alta corriente (Timmers et al., 2012). Además, se logró una producción de 0.2-0.5 W/m² en sistemas integrados, demostrando que las raíces vegetales mejoran la transferencia de electrones en un 30-50% comparado con PMFC sin plantas (Wetser et al., 2015). Se concluyó que las PFC son viables para bioenergía sostenible, con rendimientos estables en entornos anaeróbicos (Kabutey et al., 2019).

Aunque existen estudios sobre PFC y la toxicidad de metales pesados en suelos contaminados, hay poca información sobre la aplicación de *Carpobrotus chilensis* en combinación con relaves mineros de Ovejería, un contexto particular de Chile. La mayoría de las investigaciones se centran en especies exóticas o suelos genéricos, sin explorar la tolerancia de plantas nativas suculentas a las condiciones neutras y salinas de Ovejería, lo que podría optimizar la fitoestabilización local. Este vacío deja sin evaluar el potencial ecológico de *Carpobrotus chilensis* en PFC adaptadas a entornos mineros chilenos.

Se requiere mayor investigación que correlacione directamente el crecimiento vegetal con la producción eléctrica en PFC, especialmente bajo condiciones controladas y con monitoreo en tiempo real. Estudios previos miden variables de forma aislada (ej: biomasa radicular vs. voltaje generado por microbios rizosféricos), pero carecen de integraciones dinámicas que utilicen sensores para registrar humedad y bioelectricidad simultáneamente, revelando interacciones óptimas en el rizosistema. Esta brecha es abordada en el presente trabajo mediante tecnología como Arduino Uno para análisis correlacional preciso.

La mayoría de los trabajos se enfocan en uno u otro aspecto, pero pocos abordan la viabilidad técnica y ambiental de sistemas que combinen fitoestabilización y generación de bioelectricidad en suelos contaminados con relaves. Investigaciones existentes priorizan la remediación o la energía por separado, ignorando la escalabilidad híbrida en

escenarios reales como Ovejería, donde factores como el riego variable influyen en ambos procesos. Este estudio contribuye al conocimiento al evaluar PFC multifuncionales, promoviendo soluciones sostenibles para la gestión de relaves.

1.7. Justificación

La fitoestabilización se constituye como una estrategia biotecnológica de gran relevancia dentro del campo de la ingeniería ambiental, orientada a la rehabilitación de suelos contaminados con metales pesados y metaloides. Desde una perspectiva científica, este enfoque se fundamenta en el uso de especies vegetales con alta tolerancia a la toxicidad metálica, capaces de inmovilizar los contaminantes en la rizosfera mediante procesos fisicoquímicos y biológicos, tales como la adsorción, la precipitación, la complejación y la acumulación en la superficie radicular. Estas interacciones contribuyen a reducir la movilidad, biodisponibilidad y toxicidad de los metales, promoviendo la estabilización del suelo sin necesidad de su remoción.

Las investigaciones desarrolladas en los últimos años han demostrado que la fitoestabilización no solo representa una alternativa viable a las tecnologías convencionales de remediación, sino que también amplía el conocimiento sobre las relaciones planta-suelo-contaminante, permitiendo identificar mecanismos de tolerancia y adaptación vegetal frente al estrés metálico. Dichos estudios han favorecido el desarrollo de especies mejoradas mediante herramientas de la biotecnología, como la selección asistida por marcadores y la ingeniería genética, con el propósito de incrementar la eficiencia del proceso. Asimismo, esta línea de investigación impulsa el avance de la fitorremediación como disciplina científica y tecnológica, consolidando su potencial para la gestión ambiental sostenible (Ali et al., 2013).

En cuanto a su relevancia ambiental, la fitoestabilización contribuye de manera significativa a la reducción de los impactos derivados de la contaminación por metales pesados, que representan una de las problemáticas más persistentes en los suelos afectados por actividades mineras, metalúrgicas, industriales y agrícolas. Al inmovilizar los

contaminantes en el perfil superficial del suelo, se previene su lixiviación hacia cuerpos de agua subterráneos, su dispersión atmosférica por erosión eólica y su incorporación a la cadena trófica, disminuyendo así el riesgo ecológico global. Este proceso favorece además la recuperación de la funcionalidad ecológica del suelo, al restablecer la cobertura vegetal, mejorar su estructura, incrementar la capacidad de retención de agua y estimular la actividad microbiana beneficiosa.

A diferencia de los métodos fisicoquímicos tradicionales, la fitoestabilización no requiere la extracción, transporte ni disposición final de grandes volúmenes de suelo contaminado, lo que minimiza la huella ecológica y el costo energético asociado al proceso de rehabilitación. Adicionalmente, el establecimiento de vegetación en las zonas degradadas contribuye al control de la erosión, al secuestro de carbono y a la restauración del paisaje, generando un impacto ambiental positivo a largo plazo.

Desde el punto de vista social, la implementación de programas de fitoestabilización en áreas afectadas por contaminación metálica conlleva beneficios sustanciales para las comunidades locales. La reducción de la exposición humana a metales tóxicos, tales como plomo, cadmio, arsénico y zinc, disminuye los riesgos para la salud pública, especialmente en poblaciones que dependen de los recursos agrícolas y del agua subterránea cercanos a zonas contaminadas. Asimismo, la recuperación de la cubierta vegetal mejora las condiciones estéticas del entorno y promueve el bienestar psicológico y social de los habitantes.

La fitoestabilización, además, representa una oportunidad para integrar la participación comunitaria en proyectos de restauración ambiental, fortaleciendo la educación y conciencia ecológica. Su bajo costo relativo en comparación con otras tecnologías de remediación la convierte en una alternativa viable para regiones con limitaciones económicas o tecnológicas, favoreciendo la equidad ambiental y la justicia social. De este modo, la aplicación de esta técnica no solo contribuye a la mitigación de la contaminación y la recuperación de ecosistemas, sino también al desarrollo sostenible de las comunidades, al generar entornos más seguros, saludables y resilientes.

En síntesis, la fitoestabilización se consolida como una estrategia integral que combina innovación científica, eficacia ambiental y responsabilidad social. Su implementación permite avanzar hacia modelos de gestión sostenible de suelos contaminados, promoviendo la conservación de los recursos naturales y el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible vinculados a la salud ambiental, la protección de los ecosistemas terrestres y la mejora de la calidad de vida de las poblaciones afectadas.

1.8. Alcances

El presente estudio se llevará a cabo en el Laboratorio del Centro Tecnológico Ambiental (CTA) de la Universidad de Atacama, donde se realizarán todas las actividades experimentales en un entorno controlado. Esto permitirá la manipulación precisa de variables ambientales y el acceso a infraestructura especializada para prototipos bioeléctricos.

Metodológicamente, el alcance abarca el diseño y construcción de celdas de combustible microbianas vegetales (PFC) utilizando *Carpobrotus chilensis* y relaves mineros de Ovejería y Piuquenes como sustrato. Además, incluye la realización de mediciones de parámetros eléctricos como el voltaje y análisis de laboratorio para parámetros clave como pH, conductividad eléctrica y sólidos totales, con el fin de evaluar la viabilidad técnica y la correlación entre crecimiento vegetal y generación de bioelectricidad

El estudio tiene una duración de 60 días, enfocado en fases intensivas de preparación y experimentación con monitoreo continuo, sin extenderse a evaluaciones a largo plazo.

Entre las limitaciones del estudio, se destaca la no inclusión de análisis de metales pesados en los relaves posteriores a la operación de la PFC, debido a restricciones de tiempo disponible y la falta de infraestructura especializada para ensayos metalúrgicos avanzados. Esto enfoca el proyecto en aspectos bioeléctricos y de crecimiento vegetal, sin profundizar en la remediación química completa.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Fitorremediación

La fitorremediación implica el uso de la capacidad natural de las plantas para contener, degradar o eliminar productos químicos tóxicos y contaminantes del suelo o del agua. Se utiliza para eliminar metales, pesticidas, solventes, explosivos, petróleo crudo y contaminantes (lixiviados) que puedan estar escapando de los vertederos (*BioPortail | Phytoremed*, 2019).

2.1. Tipos de fitorremediación

Fitoextracción: Consiste en el uso de plantas que absorben y concentran en sus partes recolectables (hojas, tallos) los contaminantes del suelo, comúnmente metales pesados. Se emplean plantas acumuladoras o hiperacumuladoras capaces de tolerar y acumular estos metales (*BioPortail | Phytoremed*, 2019).

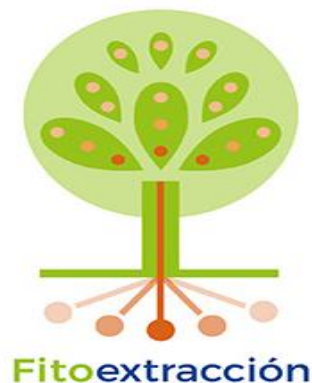


Figura 2.1 Esquema que representa la fitoextracción (Fuente: <https://www.phytosudoe.eu/el-proyecto/que-es-la-fitorremediacion/>)

Fitotransformación o Fitodegradación: Algunas plantas producen enzimas (deshalogenasa, oxigenasa) que catalizan la degradación de sustancias absorbidas o

adsorbidas, transformándolas en compuestos menos tóxicos o no tóxicos mediante la metabolización en tejidos vegetales o por organismos de la rizosfera alimentados por la planta (rizodegradación) (*¿Qué Es La Fitorremediación?* - *Phy2sudoe*, 2016a).



Figura 2.2 Esquema que representa la rizodegradación (Fuente: <https://www.phytosudoe.eu/el-proyecto/que-es-la-fitorremediacion/>)

Fitofiltración o Rizofiltración: Utilizada para descontaminar y restaurar aguas superficiales y subterráneas. Los contaminantes son absorbidos o adsorbidos por las raíces en ambientes húmedos (*BioPortail | Phytoremed*, 2019).



Figura 2.3 Esquema que representa la rizofiltración (Fuente: <https://rizofiltracion.blogspot.com/>)

Fitovolatilización: Las plantas absorben agua contaminada de la litosfera y transforman los contaminantes en compuestos volátiles que liberan a la atmósfera a través de sus hojas (*¿Qué Es La Fitorremediación? - Phy2sudoe, 2016b*).

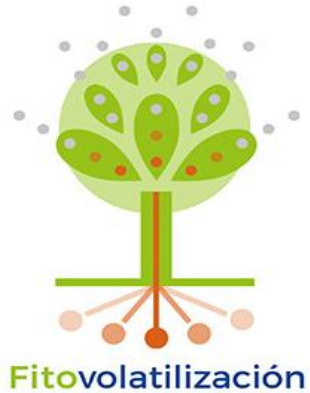


Figura 2.4 Esquema que representa la fitovolatilización (Fuente: <https://www.phytosudoe.eu/el-proyecto/que-es-la-fitorremediacion/>)

Fitoestabilización: Implica la inmovilización de contaminantes mediante plantas que reducen la escorrentía superficial y subsuperficial, limitando la erosión y la migración hacia acuíferos (*BioPortail | Phytoremed, 2019*).



Figura 2.5 Esquema que representa la fitoestabilización (Fuente: <https://www.phytosudoe.eu/el-proyecto/que-es-la-fitorremediacion/>)

2.2. Principio de la fitorremediación

La fitorremediación se fundamenta en las interacciones sinérgicas entre plantas, suelo y microorganismos rizosféricos, donde el suelo actúa como una matriz heterogénea que sustenta tanto crecimiento vegetal como la actividad microbiana, facilitando la degradación o inmovilización de contaminantes. En suelos contaminados por exceso de compuestos orgánicos o inorgánicos como metales pesados (Cu, Pb o As) presentes en relaves mineros, estos elementos pueden actuar como aceptores terminales de electrones en la respiración microbiana. Dentro del sistema planta-suelo-microorganismos, la biodegradación bacteriana mediada por enzimas como las de oxidorreductasas opera frecuentemente de manera independiente de la absorción radicular, aunque puede potenciarse mediante procesos como la rizodegradación o la fitostabilización, reduciendo la biodisponibilidad de toxinas en matrices contaminadas.

Las plantas pueden absorber contaminantes a través de sus sistemas radiculares para metabolizarlos vía rutas enzimáticas, como las oxidorreductasas presentes en la rizosfera o secuestrarlos en vacuolas celulares, promoviendo la fitoestabilización que inmoviliza toxinas y previene su lixiviación o dispersión eólica/hidrológica en matrices contaminadas. Los compuestos orgánicos, incluyendo xenobióticos persistentes, son frecuentemente degradados por consorcios microbianos simbióticos y metabolizados como sustratos energéticos para el crecimiento vegetal, resultando en su mineralización completa o conversión a metabolitos no tóxicos. Para contaminantes inorgánicos no biodegradables tales como metales pesados, metaloides y radionúclidos comunes en relaves mineros, las estrategias viables se limitan a la fitoestabilización (inmovilización *in situ* mediante complejación radicular) o fitoextracción (acumulación en biomasa aérea para cosecha), con potencial complementario de fitovolatilización en especies volátiles como el mercurio. La fitorremediación se clasifica según el locus de acción principal en procesos endoplánticos (in planta: absorción y transformación intracelular) y exoplánticos (explanta: degradación en la rizosfera o fitorrízicos). En contaminaciones por metales pesados y compuestos orgánicos de alta o media solubilidad acuosa (herbicidas, plaguicidas, solventes y explosivos), la contribución directa de la planta mediante

fitoextracción, acumulación vacuolar o fitovolatilización representa hasta un 70-90% de la remoción total, facilitada por su elevada movilidad iónica o polar hacia las raíces y tejidos vasculares. En contraste, para componentes de los hidrocarburos totales del petróleo y otros contaminantes orgánicos hidrofóbicos de baja solubilidad, el rol endoplántico es marginal, ya que la adsorción fuerte a la fracción orgánica del suelo y la baja biodisponibilidad limitan el contacto radicular (Fitorremediación: La Gran Alternativa Natural Para Recuperar Suelos Contaminados > Las Plantas Absorben Los Contaminantes | Sociedad Colombiana de Ingenieros, 2024).

2.4. Relaves mineros

Los relaves mineros son residuos generados durante el procesamiento y beneficio de minerales sulfurados, como pirita (FeS_2), calcopirita (CuFeS_2) y otros sulfuros metálicos. Durante la extracción, los minerales valiosos se separan de la ganga mediante trituración, molienda y flotación, quedando como residuo una mezcla de partículas finas de sulfuros no recuperados, agua y reactivos químicos.

Los tipos de depósitos de relave se clasifican en diversas modalidades según la forma de construcción y manejo del material residual. El tranque de relave corresponde a un depósito cuyo muro es construido con la fracción más gruesa del relave, la cual es compactada y proviene de un hidrociclón, un equipo que separa el relave integral en fracciones gruesas y finas. La fracción fina, denominada lama, se deposita en la cubeta del depósito. En contraste, el embalse de relave se caracteriza por un muro de contención construido con material de empréstito, es decir, tierra y rocas provenientes del entorno inmediato. Asimismo, se consideran embalses de relave aquellos depósitos ubicados en depresiones naturales del terreno, donde no es necesaria la construcción de un muro de contención. Por otra parte, los depósitos de relave espesado son aquellos en los que el material pasa por un proceso de espesamiento previo a la deposición, permitiendo la recuperación de agua. Este proceso genera playas de depósito con pendientes mayores que en relaves convencionales sin espesamiento, lo que contribuye a una mayor resistencia y estabilidad física del depósito. Finalmente, los depósitos de relave filtrado emplean

tecnologías de filtración para extraer casi la totalidad del agua contenida en el material, permitiendo que el relave, con bajo contenido de humedad, sea depositado en forma de apilamientos compactos y estables (Estándar de Relaves, 2020).

En Chile, la gestión y disposición de relaves mineros se encuentra regulada por un conjunto de normas que buscan garantizar la seguridad de las instalaciones y la protección del medio ambiente. El Decreto Supremo N.º 248/2007 del Ministerio de Minería establece el reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves (*Ley Chile - Decreto 248 11-ABR-2007 MINISTERIO DE MINERÍA - Biblioteca Del Congreso Nacional*, 2007). Adicionalmente, la Ley N.º 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente exige que los proyectos mineros ingresen al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, donde se evalúan los posibles impactos asociados a la disposición de relaves (*Ley Chile - Ley 19300 - Biblioteca Del Congreso Nacional*, 1994). Complementariamente, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) ha elaborado la Guía para la Evaluación de Depósitos de Relaves, que orienta los criterios técnicos y de seguridad (Propuesta & Chile, 2019). Finalmente, la Política Nacional de Relaves promueve un enfoque sustentable, incentivando la innovación tecnológica, la transparencia y la participación comunitaria en la gestión de estos residuos (*Plan Nacional de Depósitos de Relaves*, 2022).

Los relaves mineros, residuos sólidos generados en procesos de extracción y concentración de minerales, compuestos por partículas finas de roca, agua y trazas de metales pesados, representan un desafío ambiental significativo debido a riesgos como el drenaje ácido de mina (DAM) y la lixiviación de contaminantes. El tratamiento de relaves se enfoca en procesos fisicoquímicos, biológicos o geotécnicos para mitigar impactos ambientales mediante la remediación, estabilización y neutralización de contaminantes, tales como la precipitación de metales pesados con reactivos alcalinos o la solidificación en matrices inertes, priorizando la reducción de la movilidad de tóxicos y el cumplimiento normativo sin generar valor económico directo. En contraste, la valorización implica la recuperación integral de componentes valiosos residuales mediante técnicas hidrometalúrgicas, pirometalúrgicas o biotecnológicas, como la lixiviación selectiva de metales nobles (oro, cobre) o la reutilización en materiales de construcción (geo

polímeros), transformando los relaves en recursos económicos dentro de un paradigma de economía circular, lo que optimiza el ciclo de vida de los minerales y reduce indirectamente la huella ambiental al minimizar el volumen de residuos dispuestos. De este modo, el tratamiento adopta un enfoque reactivo y regulatorio centrado en la contención de pasivos ambientales, mientras que la valorización promueve una perspectiva proactiva e innovadora orientada a la generación de beneficios financieros y sostenibilidad industrial.

2.5. Plant Fuel Cells (Celdas de Combustible Vegetales)

Las celdas de combustible microbiana vegetal (PMFC) es un biorreactor cuyo funcionamiento se basa en el uso de microorganismos presentes de forma natural en la tierra para convertir un sustrato biodegradable en electricidad.

Las PMFC consta en dos electrodos que actúan como mediadores en el intercambio de electrones: el ánodo, ubicado en la zona más próxima a la planta, donde ocurre la semirreacción de oxidación, y el cátodo, generalmente situado a mayor distancia, donde se lleva a cabo la semirreacción de reducción. Además, puede incorporarse una membrana o separador de intercambio iónico con el fin de evitar que el oxígeno u otros agentes oxidantes compitan con el ánodo como aceptores finales de electrones.

Las PMFC se basan en dos procesos fundamentales: la rizodeposición de compuestos orgánicos producidos por la fotosíntesis realizada por las plantas y la generación de electricidad a partir de compuestos orgánicos dentro de la célula.

El sistema radicular produce y libera diferentes compuestos orgánicos en el suelo, incluyendo exudados solubles en agua como azúcares, ácidos orgánicos y vitaminas, materiales insolubles en agua (paredes celulares, materiales desprendidos y otros restos de raíces), además de secreciones como carbohidratos poliméricos y enzimas. Este conjunto de procesos de liberación se denomina rizodeposición vegetal y puede representar hasta un 40% del carbono primario fijado por la planta.

Los productos resultantes, denominados rizodepósitos actúan en las PMFC como sustrato bioenergético. Los microorganismos electroquímicamente activos presentes de forma natural en el suelo utilizan parte de la energía química de estos sustratos para su metabolismo, liberando simultáneamente dióxido de carbono (CO_2), protones y electrones.

Los electrones son transferidos hacia un electrodo (ánodo), conectado mediante un circuito externo a un segundo electrodo (cátodo). Finalmente, los protones liberados en el ánodo se desplazan hacia el cátodo, donde el oxígeno se reduce al reaccionar con los protones y electrones, dando lugar a la formación de agua (Martinez & Bermudez, 2023).

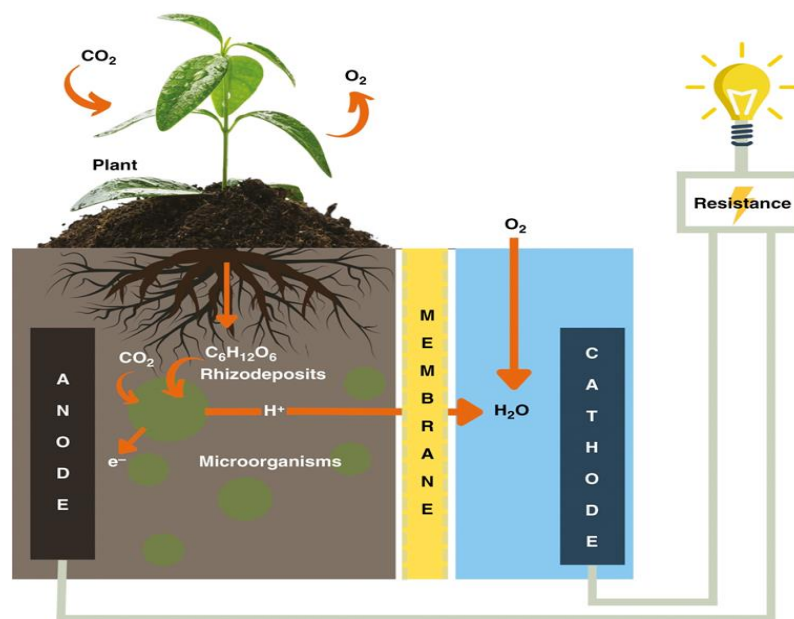


Figura 2.6 Esquema que representa una celda microbiana de combustible vegetal (Fuente: [Producción de energía eléctrica a partir de plantas vivas en pilas de combustible microbianas | Energía Limpia | Academias de Oxford](#))

2.6. Arduino Uno

El Arduino Uno es una placa de desarrollo de hardware y software de código abierto, diseñada para facilitar el prototipado rápido y la creación de proyectos interactivos en

electrónica. Lanzada en 2010 como parte de la familia Arduino, se basa en el microcontrolador ATmega328P de 8 bits fabricado por Atmel (ahora Microchip Technology), que opera a una frecuencia de 16 MHz. Esta placa integra un procesador, memoria (32 KB de flash, 2 KB de SRAM y 1 KB de EEPROM), y una serie de pines de entrada/salida (E/S) para conectar sensores, actuadores y otros componentes electrónicos. Esto permite la programación y el control de dispositivos embebidos de manera accesible tanto para principiantes como para expertos.

La placa Arduino Uno cuenta con los siguientes elementos esenciales, que permiten su uso en prototipos electrónicos:

Microcontrolador: Actúa como el "cerebro" de la placa. El ATmega328P de 8 bits incluye 32 KB de memoria flash (para programas), 2 KB de SRAM (para variables temporales) y 1 KB de EEPROM (para datos persistentes).

Entradas y salidas (E/S):

- 14 pines digitales (de los cuales 6 pueden usarse como salidas PWM para control de intensidad o velocidad).
- 6 pines analógicos para leer señales variables, como las de sensores de luz, temperatura o humedad (resolución de 10 bits, rango de 0-5 V).

Conexión con computadora: Se conecta mediante un puerto USB tipo B, lo que permite programarla desde una PC o laptop usando el entorno de desarrollo Arduino IDE (gratuito y multiplataforma). Incluye un convertidor USB-to-serial (ATmega16U2 en la versión Rev3) para una comunicación más estable.

Alimentación:

- Puede alimentarse directamente por USB (5 V) o con una fuente externa de 7 a 12 V (a través del conector barrel jack o el pin Vin).

- Pines de salida regulados: 5 V y 3.3 V disponibles para alimentar componentes externos.

Consumo de corriente: Cada pin de E/S soporta hasta 50 mA (con un total máximo recomendado de ~200 mA para toda la placa, para evitar sobrecalentamiento o daños).

Además, la placa mide aproximadamente 68.6 x 53.4 mm (tamaño de una tarjeta de crédito), incluye un LED integrado en el pin 13 para pruebas rápidas y un botón de reset. Es compatible con shields (módulos expansores) y se usa en una amplia gama de proyectos, desde robots simples hasta sistemas de IoT (*Arduino Uno R3, Qué Es, Características, Precio, Programación*, 2014).

2.7. Image J

ImageJ es un software de código abierto y dominio público, desarrollado en lenguaje Java por el National Institutes of Health (NIH), orientado principalmente al tratamiento digital de imágenes en el ámbito científico, especialmente en las ciencias de la salud. Su diseño con una arquitectura abierta permite la extensibilidad mediante plugins en Java y macros grabables, lo que facilita la personalización y adaptación del programa a diversas necesidades específicas de análisis de imágenes (Sánchez Valenciano, 2014).

El propósito principal de ImageJ es calcular áreas y valores de píxeles, funciones esenciales en el análisis cuantitativo de imágenes científicas. No obstante, el software ofrece también herramientas avanzadas, entre ellas la medición de distancias y ángulos, la creación de histogramas de densidad y gráficos de perfil de línea. Asimismo, incluye funciones estándar de procesamiento de imágenes, como ajuste de contraste, filtrado, nitidez, suavizado, detección de bordes y filtrado mediano. También permite realizar transformaciones geométricas, como escalado, rotación y volteo.

En cuanto al procesamiento de color, ImageJ destaca por su versatilidad, ya que soporta diversos espacios de color, entre ellos RGB, HSB y CIE Lab. Esto permite realizar análisis

y modificaciones basados en color con alta precisión. Además, facilita la separación de canales, posibilitando el tratamiento independiente de cada componente cromático.

Otra característica relevante es su capacidad para manejar pilas de imágenes, es decir, colecciones multicasas que se visualizan en una sola ventana. Esta función permite ejecutar en paralelo operaciones de alto costo computacional cuando se utiliza hardware con múltiples núcleos. A través de su sistema de macros, ImageJ también permite automatizar tareas y desarrollar herramientas personalizadas. Las macros pueden grabarse automáticamente mediante el registrador de comandos, y el software incorpora un depurador que facilita la corrección de errores.

Antecedentes históricos y desarrollo.

Orígenes: ImageJ surgió como una evolución del programa NIH Image, desarrollado en los años 80 para Macintosh. Wayne Rasband reescribió el software en Java para mejorar su portabilidad y permitir su uso en múltiples plataformas (Windows, macOS y Linux).

Evolución: Desde 1997, ImageJ ha recibido actualizaciones continuas. En 2010 se lanzó Fiji (Fiji Is Just ImageJ), una distribución mejorada con plugins preinstalados desarrollada por el laboratorio de Johannes Schindelin en Alemania, que amplió su funcionalidad hacia análisis avanzados, como segmentación automática y procesamiento 3D.

Comunidad: Actualmente es mantenido por una comunidad global de desarrolladores y usuarios. Existen más de 1.000 plugins disponibles en el sitio oficial, lo que ha consolidado a ImageJ como una de las herramientas más utilizadas en análisis de imágenes científicas (Schroeder et al., 2020).

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

En esta sección se describe el enfoque metodológico empleado para el desarrollo del estudio, detallando el procedimiento, técnicas y herramientas utilizadas para alcanzar los objetivos planteados. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, y un diseño experimental de laboratorio. Este enfoque busca diseñar y evaluar la eficiencia de celdas de combustible microbianas basadas en plantas (Plant Fuel Cell, PFC), utilizando *Carpobrotus chilensis* y relaves mineros de piquenes y Ovejería de la Región Metropolitana como sustrato. Este diseño es adecuado porque facilita la optimización de condiciones de crecimiento, el monitoreo de parámetros eléctricos (voltaje y curva de polarización) y la evaluación del sustrato mediante experimentos controlados y mediciones en tiempo real con dispositivos como Arduino. La elección de este enfoque cuantitativo se justifica por la necesidad de analizar datos numéricos de voltaje, área foliar y crecimiento vegetal, lo que permite obtener resultados reproducibles y aplicables a contextos de remediación ambiental.

1.1. Caracterización fisicoquímica de relaves mineros

Los relaves mineros fueron sometidos a una caracterización fisicoquímica siguiendo las metodologías descritas por (Sadzawka R. et al., 2006). En primer lugar, se determinaron parámetros básicos como el pH en una suspensión acuosa 1:2,5 (p/v), la conductividad eléctrica (CE) mediante el extracto saturado y el contenido de materia orgánica (MO) mediante un método adaptado de Walkey–Black.

Posteriormente, se evaluaron los macronutrientes disponibles. El nitrógeno (N) se cuantificó mediante extracción con KCl 2 M, seguida de destilación y titulación con H_2SO_4 0,001 M. El fósforo disponible (P) se determinó mediante el método de Olsen, mientras que el potasio disponible (K) se extrajo con una solución de $\text{NH}_4\text{CH}_3\text{CO}_2$ 1 M y

se midió posteriormente por espectroscopía de emisión atómica (AES) utilizando un equipo Perkin Elmer. El azufre disponible (SO_4^{2-}) se extrajo con $\text{CA}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0,01 M y su concentración se determinó mediante turbidimetría.

Para la determinación de elementos totales, se cuantificaron cobre (Cu), hierro (Fe), zinc (Zn) y manganeso (Mn) a través de espectroscopía de absorción atómica (AAS), utilizando un equipo Perkin Elmer tras una digestión ácida por microondas con (HNO_3 – HF). Las fracciones disponibles de estos mismos elementos se obtuvieron mediante una solución extractante de DTPA (0,005 M) con CaCl_2 (0,01 M) y trietanolamina (0,1 M), ajustada a pH 7,3, para luego ser determinadas también mediante AAS. Todas las mediciones se realizaron por triplicado para garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Finalmente, la textura del suelo se determinó mediante el método de (Bouyoucos, 1962), basado en la ley de sedimentación de Stokes (Jury & Horton, 2004). Este procedimiento utiliza una solución de hexametáfosfato de sodio al 5% y un mezclador de alta velocidad para asegurar una adecuada dispersión de las muestras.

1.2. Toma de muestras

La población de este estudio está compuesta por especímenes de *Carpobrotus chilensis*, una planta suculenta perteneciente a la familia Aizoácea. Esta especie, originaria de la costa chilena, se caracteriza por su tolerancia a condiciones salinas y contaminadas (Tamara Núñez, 2024).

Se recolectaron 16 plantas de *Carpobrotus chilensis* desde el Centro Tecnológico Ambiental (CTA), lugar donde la especie crece de manera natural y en condiciones favorables. Se seleccionaron especímenes sanos y uniformes, con tallos y hojas en buen estado, mediante muestreo intencional no probabilístico, para controlar variables iniciales y asegurar consistencia en el experimento.

Además, se consideran relaves mineros de plúvques y de Ovejería de la Región Metropolitana, los cuales presentan un elevado contenido de metales.

1.3. Determinación superficial de especies metalófitas

Se determinó el área foliar de cada planta mediante el software ImageJ, utilizando imágenes digitales para obtener mediciones precisas de superficie, lo que facilitará el seguimiento del desarrollo vegetativo y la actividad fotosintética, de la siguiente manera:

Para determinar el área foliar, las imágenes de cada planta fueron cargadas en el software ImageJ (File → Open) y se estableció una escala de referencia usando una distancia conocida de 5 cm. Luego, las imágenes se convirtieron a formato de 8 bits (Image → Type → 8-bit) y se aplicó un umbral (Image → Adjust → Threshold) para distinguir el tejido foliar del fondo. Posteriormente, las regiones de interés se seleccionaron mediante la herramienta de varita y se registraron en el ROI Manager (Analyze → Tools → ROI Manager). Finalmente, el área foliar de cada planta se obtuvo utilizando la función Measure dentro del ROI Manager.

1.4. Preparación de la membrana

Primero, se preparó la membrana de intercambio selectivo de protones utilizando arcilla comercial. Se fabricaron cuatro unidades (una por columna), moldeadas en láminas delgadas con un grosor aproximado de 1 mm, un diámetro de 2 mm y una altura de 12 cm, con un diseño cilíndrico. Las membranas se secaron en horno a 20 °C durante 24 horas. Esta membrana permite el paso selectivo de protones (H^+) desde el ánodo hacia el cátodo, lo que mejora la eficiencia de la celda y contribuye a la sostenibilidad del diseño de la celda de combustible microbiana vegetal (PFC).



Figura 3.1 Membrana de arcilla utilizada como medio de intercambio protónico.

1.5. Preparación del ánodo

Posteriormente, se envolvió una espuma de fieltro de grafito alrededor de cada membrana de arcilla, dejando expuesto el orificio superior de la membrana. Esta se aseguró firmemente con alambre de acero inoxidable, con el propósito de garantizar un contacto eléctrico estable y evitar desplazamientos durante el desarrollo del experimento.

El fieltro de grafito cumple la función de ánodo, es decir, actúa como el electrodo donde los microorganismos asociados a las raíces de *Carpobrotus chilensis* y al sustrato de relaves llevan a cabo la oxidación anaeróbica de compuestos orgánicos. En este proceso, se liberan electrones que son capturados por el material conductor del fieltro y transferidos externamente hacia el cátodo, generando así una diferencia de potencial eléctrica medible.

Asimismo, el fieltro presenta una estructura porosa que favorece la adhesión y proliferación microbiana, optimizando la transferencia de electrones generados por la actividad metabólica en el sustrato.

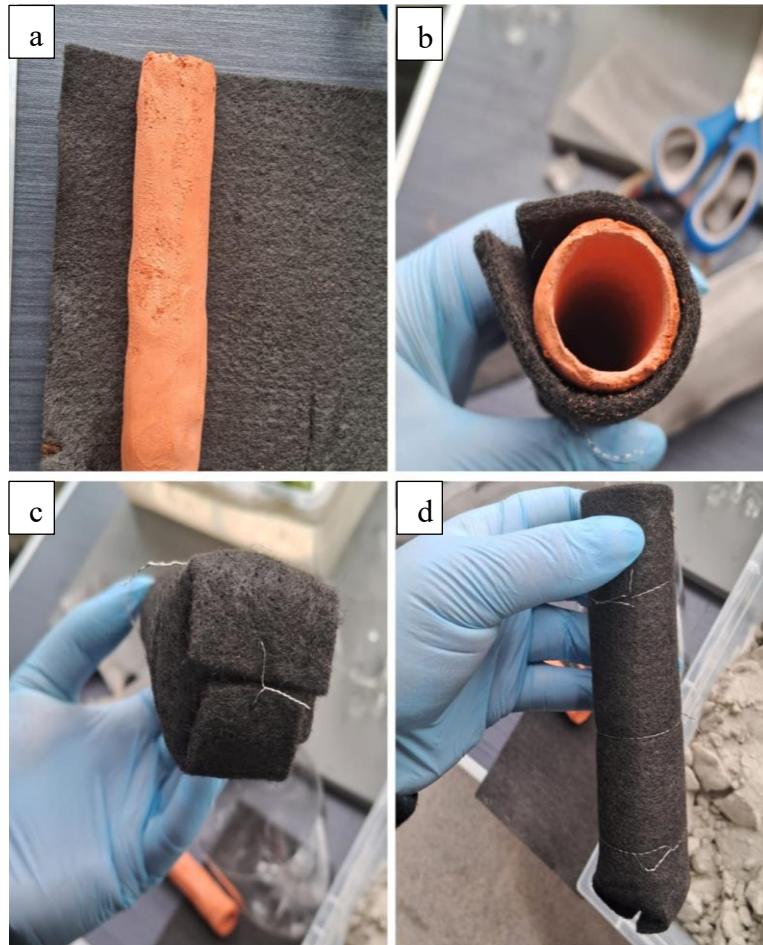


Figura 3.2 a) Membrana de intercambio protónico, dispuesta sobre el ánodo de fieltro de grafito, b) Vista superior de membrana con el ánodo de fieltro de grafito, c) Vista inferior del cierre del ánodo de fieltro de grafito de la membrana, d) Vista lateral del ánodo de fieltro de grafito ensamblado alrededor de la membrana.

1.6. Preparación del cátodo

Luego, en el interior de cada membrana de arcilla se acopló una malla de acero inoxidable que actuó como cátodo. Este componente permitió la recepción de los electrones transferidos desde el ánodo a través del circuito externo, completando así el flujo eléctrico dentro del sistema. La malla de acero inoxidable se eligió por su alta conductividad, resistencia a la corrosión y estabilidad en medios húmedos, garantizando una adecuada captación de electrones y la durabilidad del electrodo durante el experimento.

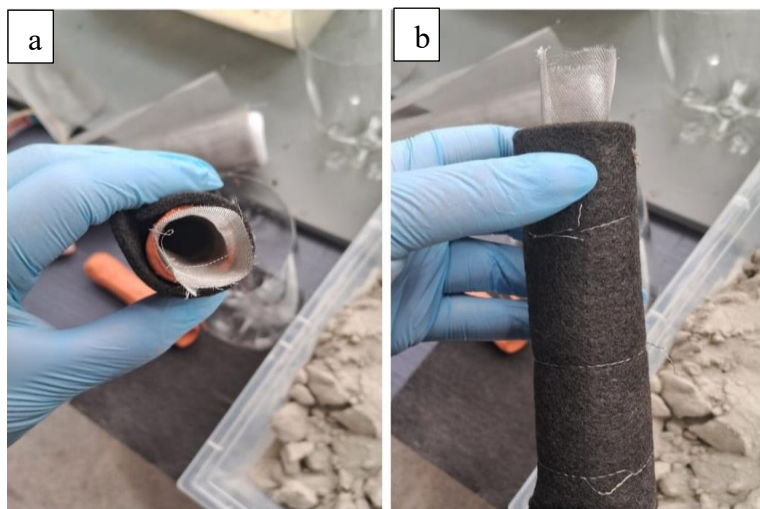


Figura 3.3 a) Vista superior de membrana acoplada con cátodo de malla de acero inoxidable, b) Vista lateral del cátodo de malla de acero inoxidable acoplada al interior de la membrana.

1.7. Configuración de las columnas

Una vez preparadas la membrana, el ánodo y el cátodo, se procedió al montaje del sistema. Para ello, se cortaron por la mitad cuatro botellas de 1600 mL, dejándolas con una altura aproximada de 20 cm. En las columnas 1 y 2 se vertió una primera capa de relave minero proveniente de Ovejería, mientras que en las columnas 3 y 4 se utilizó relave minero de Piuquenes, conformando una capa de soporte en la base de cada botella. Posteriormente, se ubicó en el centro de cada una el cilindro de la membrana, con el ánodo y el cátodo insertados, asegurando una posición estable y centrada. Finalmente, se rellenó el volumen restante de las botellas con relave minero, de modo que el cilindro quedara completamente rodeado.

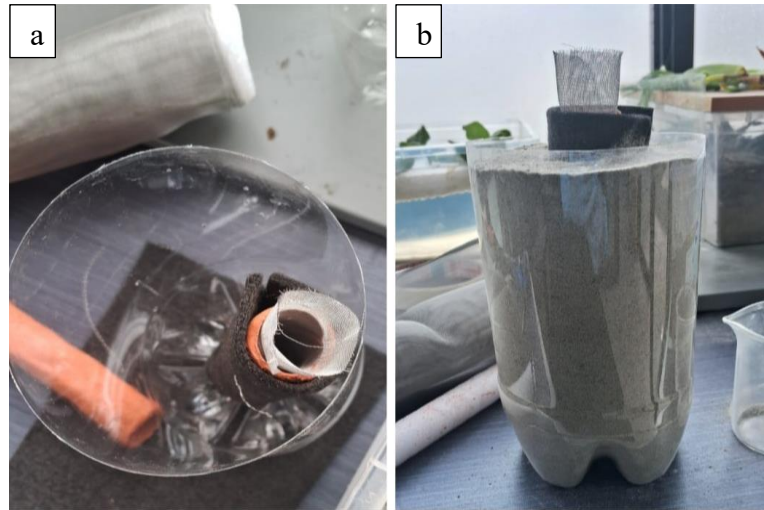


Figura 3.4 a) Vista superior de membrana, cátodo y ánodo instalado al interior de la botella, b) Vista lateral de PFC con electrodos instalados.

A continuación, se añadió un poco de agua potable al sustrato para ajustar la humedad inicial y promover la actividad microbiana, y se hicieron agujeros en la parte inferior de las botellas para permitir el drenaje del lixiviado, facilitando la recolección y análisis de efluentes. Las columnas se sostuvieron con soportes externos y un embudo, donde se colocó papel filtro en el interior del embudo para filtrar y recolectar el lixiviado drenado.

Posteriormente, los 16 especímenes de *Carpobrotus chilensis* fueron lavados con agua destilada para eliminar posibles contaminantes superficiales y garantizar condiciones iniciales limpias. Luego, cada planta fue pesada en una balanza analítica con el fin de registrar su peso inicial, parámetro que permitirá evaluar las variaciones asociadas al crecimiento durante el experimento.

Finalmente, se procedió a la plantación, distribuyendo cuatro especímenes por columna y colocándolos en el sustrato a una profundidad de 3 cm. Posteriormente, se implementó el sistema de monitoreo mediante una placa Arduino Uno, conectando los cables correspondientes a los electrodos instalados en las columnas. Este sistema fue diseñado para medir el voltaje generado por cada columna, permitiendo evaluar la actividad

eléctrica producida durante el experimento. El Arduino fue programado para registrar las mediciones a intervalos de 15 minutos durante un período total de 70 días, almacenando automáticamente los datos obtenidos en un archivo de Excel para su posterior análisis.

Una vez finalizado el montaje del sistema, se procedió al riego inicial de las columnas. Se añadieron 50 mL de agua potable al conducto cerámico (membrana) con el fin de asegurar una adecuada humedad en el sistema y facilitar el contacto entre el sustrato y los electrodos. Adicionalmente, se aplicaron 5 mL de agua potable a cada planta, favoreciendo el asentamiento de las raíces y el inicio del proceso de adaptación al nuevo medio.

Durante el período experimental, las plantas fueron regadas diariamente con un volumen de 5 mL. Se establecieron dos tratamientos de riego:

- Columnas 1 y 2: regadas con agua potable.
- Columnas 3 y 4: regadas con agua clara de relave.

El objetivo de este diseño fue evaluar el efecto del tipo de agua de riego sobre el crecimiento vegetal y la generación de voltaje en las columnas.

Posteriormente, al pasar 21 días se modificó el esquema de riego de las columnas para optimizar la generación de voltaje.

El nuevo orden de riego fue:

- Columna 1 y 3: agua potable.
- Columna 2 y 4: agua de clara de relave.

Este ajuste se implementó con el fin de mejorar la eficiencia del sistema y favorecer una mayor producción de voltaje en las columnas.

Durante el día 27 se cerró el circuito con una resistencia de 10 k Ohm para evaluar el desempeño de los sistemas con una carga que representaría los circuitos de

almacenamiento de energía. Transcurridos 42 días desde el inicio del experimento, se incorporaron 25 mL de lodo a cada una de las columnas. Esta acción se realizó debido a que, hasta ese momento, no se registraban valores de voltaje en el sistema. El lodo se aplicó de forma homogénea sobre la superficie del sustrato en cada columna, con el propósito de favorecer la generación de potencial eléctrico mediante el aporte adicional de microorganismos y materia orgánica, los cuales podrían estimular la actividad bioelectroquímica en la interfase raíz–sustrato.

A pesar de este cambio, no se registraron valores de voltaje en el sistema, entonces se modificó la resistencia de 10 k Ohm a resistencias de 1 M Ohm, para poder aplicar la Ley de Ohm. Al cambiar la resistencia se registraron finalmente lecturas de voltaje del sistema.



Figura 3.5 PFC conectadas al sistema Arduino.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Caracterización de relave minero de Piuquenes

El análisis fisicoquímico del relave de Piuquenes se puede evidenciar en la Tabla 4.1 y evidenció que el material corresponde a una matriz altamente alterada, químicamente empobrecida y con características típicas de depósitos mineros sulfurosos en estado de oxidación. El pH inicial de 4,05 confirma un ambiente ácido, condición atribuible a procesos de oxidación de sulfuros metálicos y generación de especies acidificantes. Esta acidez favorece la solubilización de metales y la movilización de iones potencialmente tóxicos, influyendo directamente en la dinámica biogeoquímica del sustrato.

La conductividad eléctrica fue extremadamente baja ($0,03 \text{ dS m}^{-1}$), reflejando una concentración mínima de sales solubles y una reducida disponibilidad de especies iónicas en solución. Esta condición es indicativa de una matriz con escasa capacidad para la conducción iónica y con limitaciones sustanciales para sostener actividad microbiana o vegetal sin aporte exógeno. De igual forma, el contenido de materia orgánica (0,3 %) fue prácticamente nulo, corroborando la ausencia de compuestos carbonados biodegradables y la baja capacidad del relave para servir como fuente energética para microorganismos heterótrofos o electrogénicos.

Los macronutrientes esenciales se encontraron en concentraciones muy reducidas: nitrógeno ($9,6 \text{ mg kg}^{-1}$), fósforo (28 mg kg^{-1}) y potasio (58 mg kg^{-1}). Estos valores evidencian un sustrato severamente deficitario desde el punto de vista nutricional, consistentes con relaves chilenos caracterizados por baja fertilidad y escasa aptitud para el establecimiento vegetal. La carencia simultánea de N, P y K limita el desarrollo radicular y la capacidad de las plantas para realizar funciones fisiológicas básicas, dificultando la formación de comunidades vegetales funcionales.

En cuanto a la fracción mineral, el relave presentó elevadas concentraciones de metales totales, especialmente Fe ($61,184 \text{ mg kg}^{-1}$) y Cu (396 mg kg^{-1}), elementos característicos

de matrices mineras con predominancia de minerales ferrosos y sulfuros de cobre. El contenido de Mn (278 mg kg⁻¹) y Zn (41 mg kg⁻¹) también fue consistente con lo reportado para depósitos metalíferos procesados. Estas concentraciones refuerzan el carácter potencialmente tóxico del sustrato y su relevancia como matriz de estudio para evaluar procesos de inmovilización, estabilización o transformación bioelectroquímica.

La caracterización física mostró que el relave presenta una textura dominada por la fracción arcillosa (44,5%), seguida de proporciones menores de arena (30,1%) y limo (25,4%). Esta composición corresponde a un material de textura fina y cohesiva, con alta capacidad de retención de agua y baja permeabilidad. La densidad aparente (1,744 g/cm³) respalda esta clasificación y sugiere un sustrato compacto, con limitaciones potenciales para la penetración radicular y el intercambio gaseoso.

Tabla 4.1 Caracterización fisicoquímica del relave minero de Piuquenes.

Parámetros	Valor
pH	4,05
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0,03
Materia orgánica (%)	0,3
N disponible (mg kg ⁻¹)	9,6
P disponible (mg kg ⁻¹)	28
K disponible (mg kg ⁻¹)	58
Cu total (mg kg ⁻¹)	396
Fe total (mg kg ⁻¹)	61.184
Mn total (mg kg ⁻¹)	278
Zn total (mg kg ⁻¹)	41
Densidad aparente (g/cm ³)	1,744
Arena (%)	30,1
Limo (%)	25,4
Arcilla (%)	44,5

4.2. Caracterización de relave minero Ovejería

El análisis fisicoquímico del relave de Ovejería se puede apreciar en la Tabla 4.2 y evidenció diferencias sustanciales respecto al primer material evaluado, particularmente en términos de acidez, conductividad eléctrica, composición mineral y disponibilidad de nutrientes. El pH registrado (5,80) indica condiciones moderadamente ácidas, menos extremas que las observadas en relaves fuertemente sulfatados. Este nivel de acidez sugiere un grado menor de oxidación de sulfuros y una menor generación de especies acidificantes, lo que potencialmente modula la movilidad de metales y la estabilidad química del sustrato.

La conductividad eléctrica ($2,74 \text{ mS cm}^{-1}$) fue significativamente mayor en comparación con el relave de Piuquenes, indicando una alta concentración de sales solubles y de especies iónicas disponibles en solución. Este comportamiento es coherente con matrices sometidas a procesos de meteorización avanzada o con contenidos elevados de sulfatos, como lo confirma la elevada concentración de SO_4^{2-} disponible (410 mg kg^{-1}).

El contenido de materia orgánica fue ligeramente superior al de Piuquenes (0,55 %), aunque sigue siendo bajo para estándares edáficos, indicando que el sustrato continúa siendo esencialmente mineral y pobre en compuestos carbonados. En contraste, los macronutrientes disponibles se encontraron en concentraciones extremadamente bajas: N ($3,73 \text{ mg kg}^{-1}$), P ($1,64 \text{ mg kg}^{-1}$) y K ($6,23 \text{ mg kg}^{-1}$), reflejando una condición oligotrófica severa.

La fracción biodisponible de metales mostró valores particularmente altos para Fe (307 mg kg^{-1}) y moderados para Cu ($28,1 \text{ mg kg}^{-1}$), lo que indica la presencia de especies metálicas solubles capaces de interactuar con microorganismos y raíces. Las concentraciones biodisponibles de Mn ($1,73 \text{ mg kg}^{-1}$) y Zn ($4,37 \text{ mg kg}^{-1}$) fueron comparativamente menores, aunque aún representativas de matrices metalíferas activas desde el punto de vista geoquímico.

En cuanto al contenido total de metales, el relave presentó concentraciones elevadas de Cu total (1924 mg kg⁻¹) y Fe total (8769 mg kg⁻¹), lo que refleja una mineralogía rica en sulfuros de cobre y minerales ferrosos. Los contenidos de Mn total (187 mg kg⁻¹) y Zn total (92,6 mg kg⁻¹) complementan un perfil elemental consistente con depósitos metalíferos de granulometría fina y moderada reactividad química.

La caracterización física muestra una textura dominada por la fracción arenosa (72,73%), con proporciones menores de arcilla (20,05%) y limo (7,22%), clasificándola como un material arenoso. Esta composición implica una estructura gruesa, alta permeabilidad y baja capacidad de retención de agua, facilitando el drenaje, pero aumentando el riesgo de erosión y lixiviación de contaminantes en pendientes. La densidad aparente (1,67 g/cm³) es moderada, sugiriendo un sustrato menos compacto, lo que podría favorecer la penetración radicular en contextos de remediación, aunque limita la estabilidad en depósitos húmedos.

Tabla 4.2 Caracterización fisicoquímica del relave minero de Ovejería.

Parámetros	Valor
pH	5,80
Conductividad eléctrica (mS cm ⁻¹)	2,74
Materia orgánica (%)	0,55
N disponible (mg kg ⁻¹)	3,73
P disponible (mg kg ⁻¹)	1,64
K disponible (mg kg ⁻¹)	6,23
SO ₄ ²⁻ disponible (mg kg ⁻¹)	410
Cu biodisponible (mg kg ⁻¹)	28,1
Fe biodisponible (mg kg ⁻¹)	307
Mn biodisponible (mg kg ⁻¹)	1,73
Zn biodisponible (mg kg ⁻¹)	4,37
Cu total (mg kg ⁻¹)	1,924
Fe total (mg kg ⁻¹)	8,769

Mn total (mg kg ⁻¹)	187
Zn total (mg kg ⁻¹)	92,6
Densidad aparente (g/cm ⁻³)	1,67
Arena (%)	72,73
Limo (%)	7,22
Arcilla (%)	20,05

4.3. Caracterización inicial de área de las plantas

La medición inicial del área foliar de las 16 plantas de *Carpobrotus chilensis* se realizó mediante el software ImageJ, con el objetivo de determinar su condición inicial antes del montaje del sistema experimental. Las mediciones se efectuaron cuando las plantas aún no se encontraban instaladas en las columnas (4 plantas por columna, distribuidas en 4 columnas), lo que permitió establecer un punto de referencia para evaluar posteriormente el efecto de los distintos tratamientos de riego y relave.

Estos valores indican una variabilidad moderada dentro de cada columna, lo que es consistente con plantas jóvenes de especies suculentas como *Carpobrotus chilensis*, donde factores ambientales previos (como luz o humedad en el vivero) pueden influir en el crecimiento inicial.

Tabla 4.3 Área foliar inicial de *Carpobrotus chilensis*.

Posición de las plantas en las columnas	Área foliar (cm ²)			
	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
A	23,596	30,326	22,818	25,794
B	16,014	28,486	33,682	26,508
C	26,384	33,794	15,947	18,597
D	27,963	20,796	20,861	30,061

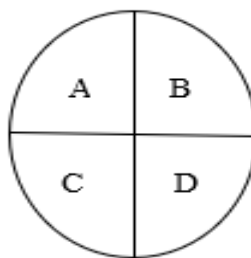


Figura 4.1 Vista superior de posición de las plantas en las columnas.

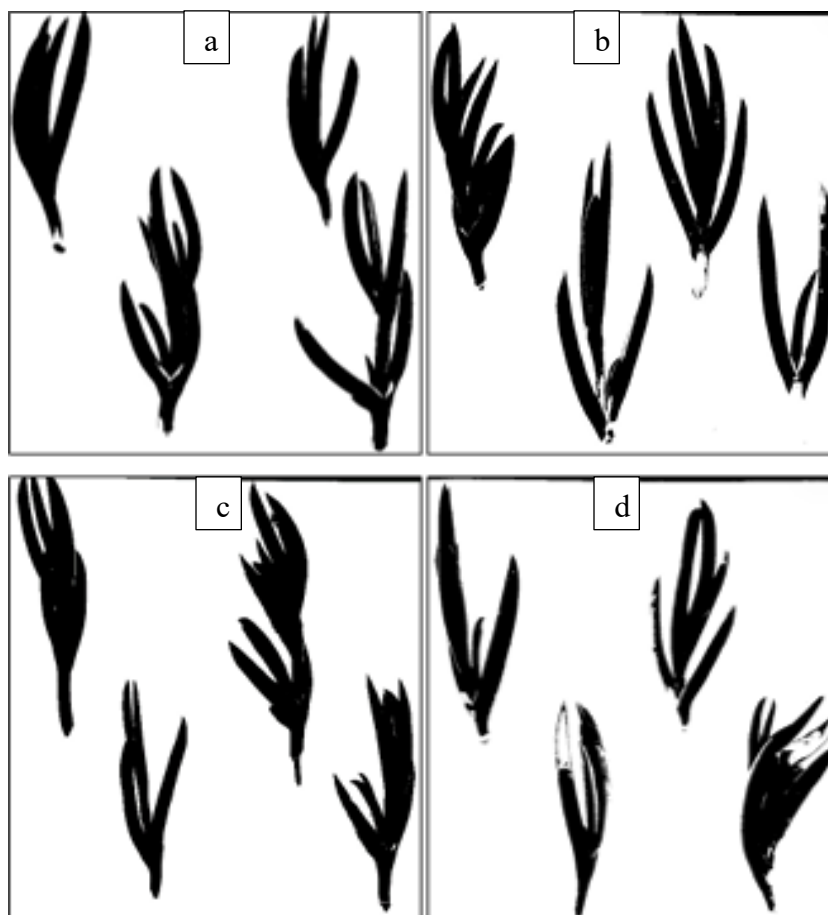


Figura 4.2 Área foliar de *Carpobrotus chilensis*. a) Columna 1, b) Columna 2, c) Columna 3, d) Columna 4

4.4. Caracterización final de área de las plantas

El análisis de comparación entre el área foliar inicial y final permitió evaluar el efecto de los distintos tratamientos aplicados en las cuatro columnas experimentales. En la Columna

1, todas las plantas presentaron un aumento del área foliar, sin registrarse disminuciones. Los aumentos fluctuaron entre 4,98 cm² y 23,28 cm² respecto de sus valores iniciales, indicando un crecimiento foliar consistente bajo este tratamiento.

Estos datos sugieren que la Columna 1 proporcionó condiciones favorables para el desarrollo foliar, posiblemente asociadas a una mejor disponibilidad de nutrientes o menor presencia de elementos tóxicos del relave.

En la Columna 2 también se observó un crecimiento positivo uniforme. Ninguna de las plantas presentó reducción del área foliar, y los incrementos oscilaron entre 0,80 cm² y 33,48 cm². Esta columna registró los mayores incrementos absolutos dentro del conjunto, destacando especialmente los individuos C y D, que presentaron las expansiones foliares más elevadas

Las Columnas 3 y 4 mostraron comportamientos heterogéneos. En la Columna 3, las plantas B y D presentaron aumentos del área foliar; sin embargo, los individuos A y C experimentaron reducciones de -3,30 cm² y -4,05 cm², respectivamente. Un patrón similar se registró en la Columna 4, donde las plantas A y C exhibieron incrementos leves, mientras que B y D evidenciaron disminuciones más marcadas del área foliar final en comparación con la inicial.

Tabla 4.4 Área foliar final de *Carpobrotus chilensis*.

Posición de las plantas en las columnas	Área foliar (cm ²)			
	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
A	49,565	40,239	18,767	30,776
B	37,747	29,283	36,108	12,777
C	49,668	50,736	12,650	21,018
D	29,152	54,281	26,378	18,731

4.5. Caracterización inicial de masa de *Carpobrotus chilensis*

Previo al montaje del sistema experimental, se determinó el peso inicial de las 16 plantas de *Carpobrotus chilensis*, con el propósito de establecer su condición fisiológica de partida. Las mediciones se realizaron antes de la instalación en las columnas, lo que permitió contar con una referencia base para posteriores comparaciones con los tratamientos aplicados.

Estos resultados reflejan que las plantas utilizadas presentaban biomásas iniciales relativamente homogéneas, sin diferencias marcadas entre columnas. Esta uniformidad es importante, ya que garantiza que las posibles variaciones observadas en etapas posteriores del experimento se deban principalmente al efecto de los tratamientos de riego y tipo de sustrato, y no a diferencias iniciales en el tamaño o vigor de las plantas.

El peso inicial constituye un indicador directo del contenido de agua y materia viva en los tejidos vegetales, por lo que valores similares entre columnas sugieren que las plantas se encontraban en condiciones fisiológicas comparables al inicio. Este equilibrio inicial proporciona una base experimental sólida para evaluar los efectos posteriores de las aguas claras de relave y del agua potable sobre el crecimiento y la respuesta bioelectroquímica de las plantas.

Tabla 4.5 Pesos iniciales de *Carpobrotus chilensis*.

Posición de las plantas en las columnas	Peso (g)			
	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
A	9,86641	13,05957	10,90480	15,77248
B	7,27821	21,56715	16,42044	13,35516
C	14,25565	18,24523	7,34924	10,24405
D	13,24501	11,55460	10,15855	17,54437

4.6. Caracterización final de masa de *Carpobrotus chilensis*

La comparación entre los pesos iniciales y finales de las plantas permitió evaluar el efecto diferencial de dos sustratos de relave, Ovejería (C 1 y C2) y Piuquenes (C3 y C4) sobre la acumulación de biomasa aérea. Este análisis es fundamental para inferir el grado de estrés edáfico generado por cada tipo de relave y su potencial para ser utilizado en procesos de fitoestabilización.

Las plantas cultivadas en el relave de Ovejería evidenciaron un desempeño significativamente superior en términos de acumulación de biomasa. En la columna 1, todas las unidades experimentales mostraron incrementos marcados en su peso final. Este aumento sostenido indica que el relave de Ovejería impone un menor nivel de estrés químico y osmótico, permitiendo una mayor eficiencia en la expansión foliar y la acumulación de tejidos.

La columna 2 presentó un comportamiento más heterogéneo: mientras los individuos A y D incrementaron su biomasa, las plantas B y C mostraron reducciones en su peso final. Esta variabilidad intra-columna se asocia a micro heterogeneidades dentro del sustrato, tales como diferencias locales en humedad, compactación, aireación o gradientes de sales. No obstante, el significativo aumento observado en la planta D (30,175 g) demuestra que el relave de Ovejería posee sectores con condiciones adecuadas para el crecimiento, compatibles con la fisiología de la especie utilizada.

Las plantas cultivadas en el relave de Piuquenes exhibieron respuestas más restrictivas, evidenciando un mayor nivel de estrés funcional. En la columna 3, solo dos plantas (B y D) lograron aumentos en su peso final, mientras que A y C registraron disminuciones notorias. Esta respuesta sugiere que, aunque algunas plantas lograron establecer mecanismos adaptativos, el sustrato impuso limitaciones significativas en disponibilidad de agua, nutrientes o exceso de elementos tóxicos, generando un rendimiento general inferior.

La columna 4 mostró un patrón aún más claro de estrés: todas las plantas disminuyeron su biomasa final. Este comportamiento uniforme indica que el relave de Piuquenes posee características fisicoquímicas más desfavorables para el desarrollo vegetal

Tabla 4.6 Pesos finales de *Carpobrotus chilensis*.

Posición de las plantas en las columnas	Peso (g)			
	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
A	25,60394	21,75000	7,32884	10,59626
B	20,26785	16,17130	18,86910	4,05610
C	23,37128	17,90120	4,39301	8,61252
D	13,27770	30,17500	17,98570	9,11670

Los resultados de ambas columnas indican que el relave de Ovejería presenta mejores condiciones fisicoquímicas para el crecimiento vegetal, lo que podría incluir una menor presencia de sales solubles o una disponibilidad de metales menos tóxica para las raíces. Estas características reducen el estrés de las plantas y permiten que acumulen más biomasa en comparación con el relave de Piuquenes.

4.7. Análisis de voltaje durante un monitoreo de 33 días

Las mediciones realizadas durante 33 días mediante el sistema Arduino Uno pueden verse en la Figura 4.3 al inicio del experimento durante 27 días los ensayos se efectuaron en circuito abierto, registrando únicamente el voltaje generado de forma natural por cada PFC. Las siglas C1 al C4 se refieren a las columnas de relave: C1 y C2 son columnas con relave Ovejería y C3 y C4 columnas empacadas con relave Piuquenes.

Durante estos 27 días iniciales, el voltaje generado de mayor a menor tuvo las siguientes preponderancias C4>C3>C1>C2, indicando condiciones electroquímicas favorables para el relave Piuquenes comparado con el Ovejería, asociadas posiblemente a mayores niveles

de humedad, menor resistencia interna inicial o un contacto electrodo–rizosfera más eficiente.

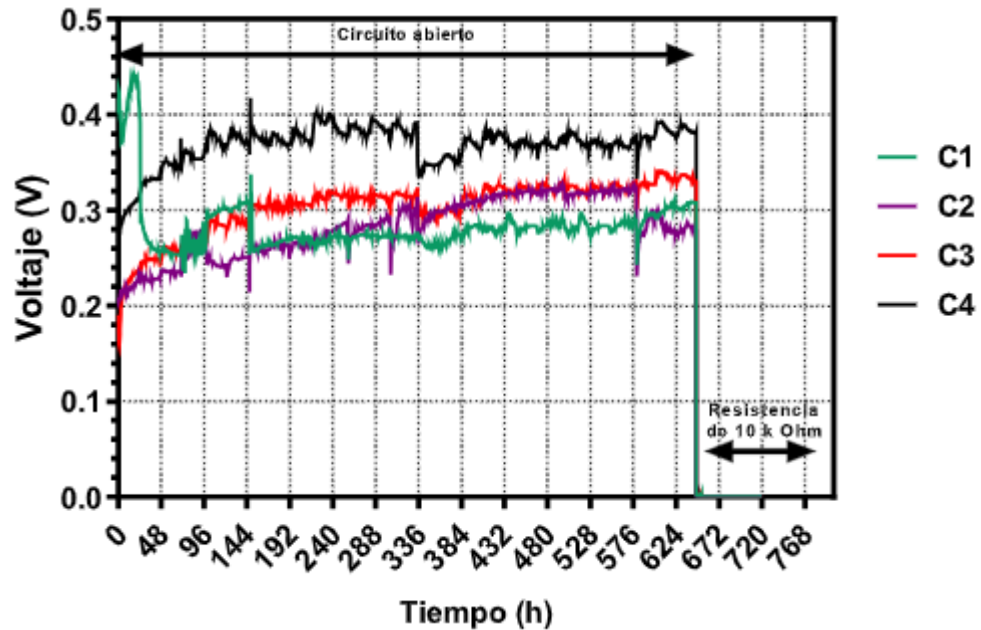


Figura 4.3 Voltaje promedio de las PFC durante 33 días de monitoreo. C1- Columna 1, C2 – Columna 2, C3 – Columna 3 y C4 – Columna 4

Con el avance del monitoreo se observó una fase de estabilización donde las columnas reorganizaron su comportamiento. La C4 emergió como la más eficiente de forma sostenida, manteniendo voltajes estables entre 0,38 y 0,40 V durante la mayor parte del periodo. Su desempeño superior se relaciona con el uso de agua clara de relave, la cual aporta mayor conductividad al sistema debido a su contenido iónico, favoreciendo la movilidad de cargas y reduciendo la resistencia interna. Esto sugiere un acoplamiento más eficiente entre las raíces, los microorganismos electrogénicos y los electrodos, permitiendo una transferencia electrónica continua y estable.

La Columna 1, pese a su voltaje inicial elevado, mostró un descenso progresivo hasta estabilizarse en torno a 0,28–0,30 V. Su rendimiento decreciente indica que las condiciones iniciales que favorecieron el voltaje temprano no se mantuvieron a medida que el sistema alcanzó equilibrio. Esta columna, irrigada con agua potable, experimentó

una disminución de eficiencia atribuible a la menor conductividad del medio, lo cual limita la movilidad iónica y aumenta la resistencia interna del sustrato.

Las C2 y C3 exhibieron patrones intermedios, aunque por razones distintas. La Columna 2, también regada con agua potable, presentó fluctuaciones más marcadas con valores entre 0,26 y 0,31 V, lo cual sugiere variaciones en humedad y oxigenación que afectaron la estabilidad microbiana. En contraste, la Columna 3, irrigada con agua clara de relave, mostró el comportamiento más estable de todo el sistema, con voltajes sostenidos entre 0,28 y 0,31 V, destacando que un sistema electroquímicamente estable puede compensar un voltaje inicial bajo. Su rendimiento final elevado indica que la conductividad iónica del relave contribuye fuertemente a mantener gradientes electroquímicos eficientes.

El tipo de agua de riego demostró ser un factor determinante. Las C1 y C2 regadas con agua potable mostraron una tendencia a reducir su potencial en el tiempo y a presentar mayor variabilidad, atribuido a la menor conductividad eléctrica del agua potable, lo cual incrementa las pérdidas óhmicas del sistema. Por el contrario, las C3 y C4 que utilizaron agua clara de relave no solo alcanzaron mejores voltajes promedio, sino que también demostraron comportamientos más estables y eficientes, confirmando que la presencia de iones metálicos y sales disueltas favorece la transferencia electrónica.

En conjunto, los resultados indican que las C3 y C4 fueron las configuraciones más eficientes en términos de voltaje promedio. La Columna 3 se destacó por su estabilidad sostenida, mientras que la Columna 4 combinó estabilidad con altos valores de voltaje, alcanzando el mejor desempeño global. Estos hallazgos evidencian que la eficiencia de las PFC depende no solo del voltaje inicial sino de la capacidad del sistema para mantener condiciones electroquímicas estables. Asimismo, se confirma que el uso de agua clara de relave aumenta la conductividad del medio y favorece un rendimiento bioelectroquímico superior, posicionándola como un recurso apto para mejorar la eficiencia de PFC aplicadas en matrices de relave minero.

Al llegar el día 27 de conectó una resistencia de 10 kOhm, como se puede apreciar en la Figura 4.3, en todos los casos el potencial decae hasta cero hasta el final de los 33 días.

Tabla 4.7 Promedio de voltaje en cada columna.

Promedio	Columna 1	Columna 2	Columna 3	Columna 4
voltaje (V)	0,2665 ±	0,2654 ±	0,2858 ±	0,3464 ±
	0,0014	0,0014	0,0015	0,0017

4.8. Adición de lodo y cambió de resistencia

Las mediciones realizadas durante 20 días de monitoreo pueden verse en la Figura 4.3, en circuito cerrado con una resistencia de 1 MΩ y la incorporación de lodo permite caracterizar con precisión el desempeño electroquímico de las Plant Fuel Cells (PFC) bajo carga.

Tras la adición del lodo, el sistema presentaba un elevado potencial interno acumulado, producto de la movilización de materia orgánica fresca, la activación de microorganismos electrogénicos y la reorganización de los gradientes electroquímicos en el ánodo.

En este modo operativo, el voltaje registrado no refleja el potencial electroquímico máximo del sistema, sino su capacidad real para generar potencia frente a una demanda eléctrica constante.

Durante los primeros días, todas las columnas mostraron voltajes bajos (entre 0,03 y 0,07 V), coherentes con la fase inicial de adaptación del sistema en circuito cerrado. En este periodo, el ecosistema microbiano electrogénico aún se encontraba en formación, la resistencia interna permanecía elevada y la humedad no estaba completamente distribuida en el sustrato. Tanto las columnas irrigadas con agua potable Columna 1 y 3 como aquellas regadas con agua clara de relave C2 y C4 presentaron un comportamiento homogéneo, reflejando que el sistema todavía no diferenciaba significativamente su eficiencia en transferencia electrónica. La alta resistencia impuesta por la carga externa de 1 MΩ

amplificó estas condiciones, obligando a las PFC a estabilizarse antes de alcanzar niveles sostenidos de producción eléctrica.

A medida que avanzó el monitoreo, se evidenció una separación marcada entre los tratamientos, manifestada principalmente a través de la aparición de peaks abruptos de voltaje. Estos peaks, presentes de forma clara en la Columna 2 y 4, ambas irrigadas con agua clara de relave, alcanzaron valores superiores a 0,45–0,50 V. En sistemas operando con una resistencia de 1 M Ω , peaks de esta magnitud son indicativos de eventos donde la resistencia interna disminuye drásticamente debido a aumentos transitorios de conductividad, reorganización del ecosistema microbiano, o momentos de elevada actividad metabólica microbiana que intensifican la transferencia electrónica. La presencia natural de iones metálicos y sales en el agua clara de relave favorece exactamente este tipo de episodios al reducir las pérdidas óhmicas y mejorar la movilidad de cargas en el sustrato, lo que habilita incrementos súbitos en el voltaje bajo carga.

Las C1 y C3 irrigadas con agua potable no mostraron peaks significativos, manteniéndose confinadas a valores muy inferiores, en torno a 0,05–0,07 V durante casi todo el experimento. Dado el uso de una resistencia externa elevada 1 M Ω , estos valores reducidos son especialmente relevantes, ya que indican que la resistencia interna del sistema se mantuvo igualmente alta y que la movilidad iónica dentro del sustrato fue insuficiente para permitir una transferencia electrónica eficiente. La baja conductividad del agua potable limita de manera importante el funcionamiento de las PFC en circuito cerrado, pues incrementa la resistencia total del sistema y restringe el flujo electrónico incluso en presencia de actividad microbiana.

Las C1 y C3, irrigadas con agua potable, muestran perfiles caracterizados por una disminución progresiva del voltaje seguida de un comportamiento más estable. La menor concentración de iones y la ausencia de metales disueltos en el agua potable reducen la conductividad eléctrica del medio, produciendo mayores pérdidas óhmicas y una transferencia electrónica más limitada hacia el ánodo. No obstante, la química más simple del medio permite formar un ecosistema microbiano más estable, con menor interferencia

externa. Esto explica por qué, aunque alcanzan valores de voltaje más reducidos que las columnas con agua clara de relave, el comportamiento tiende a ser más uniforme y menos fluctuante una vez superada la descarga inicial.

Tras los peaks, tanto la C2 como la C4, ambas con agua clara de relave, mantuvieron voltajes sustancialmente superiores al resto. En particular, la C4 exhibió el peak más pronunciado y logró posteriormente estabilizarse por encima de los 0,30 V, lo que demuestra un acoplamiento electroquímico altamente eficiente entre raíces, biofilm y ánodo. Esto implica que las condiciones proporcionadas por el agua de relave no solo favorecen los eventos máximos de generación de voltaje, sino también la estabilidad posterior bajo carga de 1 M Ω , revelando un sistema capaz de mantener un flujo electrónico adecuado en el tiempo.

Un punto relevante es que, aunque el lodo añadido el 24 de octubre actuó como fuente inmediata de materia orgánica disponible, permitiendo una alta producción de electrones al inicio y una convergencia inicial en los voltajes de todas las columnas, el tipo de agua de riego constituye el factor determinante del desempeño sostenido bajo carga. Las columnas irrigadas con agua potable presentan un comportamiento limitado y una curva prácticamente plana, típico de sistemas donde la resistencia interna es comparable o superior a la resistencia externa, lo que suprime la capacidad de generar potencia útil. Por el contrario, las columnas irrigadas con agua clara de relave muestran un comportamiento dinámico, con eventos de alta eficiencia y una estabilización posterior a niveles superiores, validando que la mayor conductividad iónica del relave mejora la transferencia electrónica y optimiza la eficiencia global del sistema.

Los resultados indican que las C2 y C4 irrigadas con agua clara de relave fueron significativamente más eficientes en condiciones de circuito cerrado con una resistencia de 1 M Ω . La C4 se consolidó como la más eficiente, gracias a la combinación de peaks de voltaje altos, respuesta rápida del sistema y una estabilización sostenida en niveles superiores.

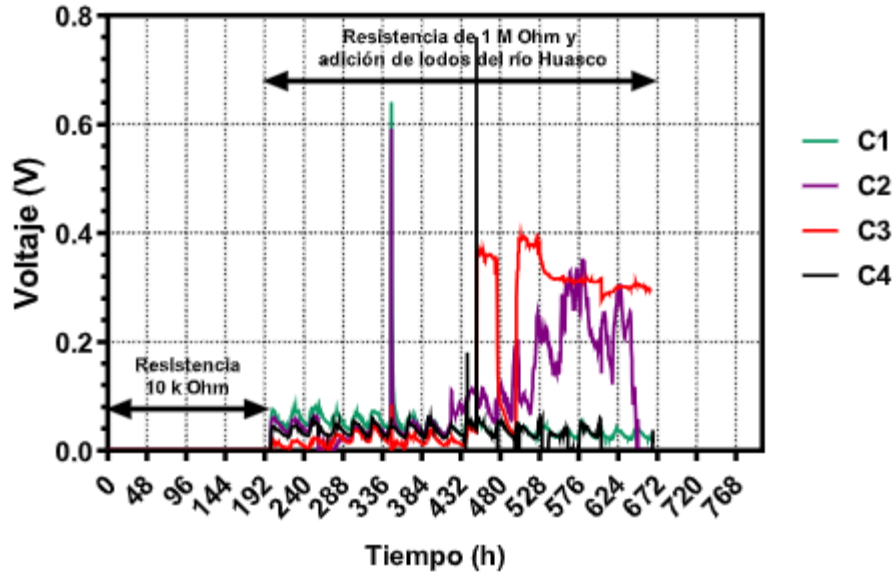


Figura 4.4 Voltaje promedio de las PFC durante 20 días de monitoreo.

4.9. Análisis de parámetros del lixiviado de las columnas

Con el objetivo de evaluar las condiciones químicas generadas en cada columna durante el ensayo, se analizaron los principales parámetros fisicoquímicos del líquido lixiviado: pH, conductividad eléctrica y sólidos totales. Estos indicadores permiten interpretar el grado de acidez o alcalinidad del sistema, la disponibilidad de iones en solución y la concentración total de sólidos, respectivamente. Su comportamiento entrega información relevante sobre la interacción entre el sustrato de relave, el agua de riego aplicada y la actividad microbiana asociada al proceso.

Tabla 4.8 pH del lixiviado de las columnas.

pH			
C1	C2	C3	C4
6,1	6,1	3,9	3,6

Los valores de pH mostraron diferencias marcadas entre columnas: mientras que las C1 y C2 presentaron valores ligeramente ácidos (pH 6,1), las C3 y C4 evidenciaron una acidez

considerablemente mayor, con pH 3,9 y 3,6 respectivamente. Esta diferencia puede asociarse a la composición mineralógica del relave utilizado, particularmente en las C3 y C4, donde la presencia de sulfuros u otros minerales acidificantes podría favorecer la generación de condiciones más ácidas en el lixiviado.

Tabla 4.9 Conductividad eléctrica del lixiviado de las columnas.

Conductividad ($\mu\text{s cm}^{-1}$)			
C1	C2	C 3	C 4
6000	4550	5370	6000

En cuanto a la conductividad eléctrica, los valores oscilaron entre 4550 y 6000 uS/cm, siendo mayores en la C1 y C4 (6000 uS/cm), seguidas por la C3 (5370 $\mu\text{S/cm}$) y la C2 (4550 uS/cm). Una mayor conductividad eléctrica refleja un incremento en la concentración de sales solubles presentes en el sustrato, lo cual se vuelve relevante al interpretar la respuesta electroquímica de las columnas, dado que una mayor conductividad del medio facilita el transporte iónico y, potencialmente, la generación de voltaje en sistemas bioelectroquímicos.

Tabla 4.10 Sólidos totales del lixiviado de las columnas.

Sólidos totales (mg L^{-1})			
C1	C2	C3	C4
3000	2270	2680	3000

Los sólidos totales disueltos (STD), expresados en ppm (mg L^{-1}), siguieron un patrón similar al observado en la conductividad. Las C1 y C4 presentaron las concentraciones más altas (3000 ppm), seguidas de la C3 (2680 ppm) y la C2 (2270 ppm). Este comportamiento indica que el lixiviado de estas columnas contiene una mayor cantidad de material soluble, lo cual es consistente con un sustrato de relave más activo o con mayor disponibilidad de minerales susceptibles a disolución.

4.10. Evaluación económica de construcción de las PFC

La estimación de costos asociada al montaje del prototipo de Plant Fuel Cell (PFC) se presenta en la Tabla 4.11. El presupuesto considera exclusivamente los insumos necesarios para la fabricación del sistema a escala de laboratorio, incluyendo materiales estructurales, componentes electroquímicos, elementos de adquisición de datos y accesorios operacionales.

El presente proyecto tiene un costo total de \$ 77.846, este valor corresponde a la estimación completa de los recursos necesarios para la implementación del sistema experimental y constituye la referencia económica final para su reproducibilidad y evaluación futura.

Tabla 4.11 Precios de materiales.

Artículo	Precio
Arduino Uno	29.990
Resistencia	6.990
Filtro de grafito	21.272
Malla de acero inoxidable	9.944
Arcilla	5.580
Protoboard	4.250
Total	\$77.846

CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN

En conclusión, los resultados obtenidos en el presente proyecto de titulación permiten afirmar que las PFC fueron capaces de generar voltajes estables durante los cerca de 60 días de monitoreo, tanto en condiciones de circuito cerrado como de circuito abierto. Este comportamiento confirma que *Carpobrotus chilensis* es capaz de mantener actividad bioelectroquímica sobre un sustrato compuesto por relave minero, lo que valida su uso como especie vegetal compatible con sistemas bioelectroquímicos en contextos de pasivos ambientales.

Asimismo, los hallazgos de este estudio respaldan el potencial de las PFC como una herramienta tecnológica complementaria para apoyar procesos de revegetación y para la implementación de sistemas de monitoreo bioelectroquímico en depósitos de relaves.

En cuanto al comportamiento vegetal, los relaves de Ovejería favorecieron un mayor desarrollo de las plantas, evidenciando un menor estrés iónico y mejores condiciones para el crecimiento vegetal y foliar. Por otro lado, los relaves de Piuquenes demostraron ser más eficientes desde el punto de vista electroquímico, alcanzando mayores voltajes y una mayor estabilidad en el tiempo, debido a su mayor conductividad y a la presencia de especies iónicas que favorecieron el transporte electrónico. Esto indica que las condiciones óptimas para el crecimiento vegetal no necesariamente coinciden con aquellas que maximizan el rendimiento bioelectroquímico.

Bibliografía

Ali, H., Khan, E., & Sajad, M. A. (2013). Phytoremediation of heavy metals—Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2013.01.075>

Arduino Uno R3, Qué es, Características, Precio, Programación. (2014). https://descubrearduino.com/arduino-uno/#google_vignette

BioPortail | *Phytoremed.* (2019). <https://web.archive.org/web/20070823173050/http://www.biofondations.gc.ca/francais/View.asp?x=742>

Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils¹. *Agronomy Journal*, 54(5), 464–465. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ1962.00021962005400050028X>

Chong, P. L., Chuah, J. H., Chow, C. O., & Ng, P. K. (2025). Plant microbial fuel cells: A comprehensive review of influential factors, innovative configurations, diverse applications, persistent challenges, and promising prospects. *International Journal of Green Energy*, 22(3), 599–648. <https://doi.org/10.1080/15435075.2024.2421325;CTYPE:STRING:JOURNAL>

Estándar de relaves. (2020). <https://www.aminerals.cl/sustentabilidad/estandar-de-relaves>

Fitorremediación: La gran alternativa natural para recuperar suelos contaminados > las plantas absorben los contaminantes | Sociedad Colombiana de Ingenieros. (2024). <https://sci.org.co/fitorremediacion-la-gran-alternativa-natural-para-recuperar-suelos-contaminados-las-plantas-absorben-los-contaminantes/>

Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. (2011).
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-04622011000200002

Jury, W. A., & Horton, R. (2004). Water characteristic function. *Soil Physics*, 384.
https://books.google.com/books/about/Soil_Physics.html?hl=es&id=E5HZDwAAQBAJ

Kabutey, F. T., Zhao, Q., Wei, L., Ding, J., Antwi, P., Quashie, F. K., & Wang, W. (2019). An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 110, 402–414.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.05.016>

Ley Chile - Decreto 248 11-ABR-2007 MINISTERIO DE MINERÍA - Biblioteca del Congreso Nacional. (2007). <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=259901>

Ley Chile - Ley 19300 - Biblioteca del Congreso Nacional. (1994).
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>

Martinez, R. D. R., & Bermudez, M. E. A. (2023). Production of electrical energy from living plants in microbial fuel cells. *Clean Energy*, 7(2), 408–416.
<https://doi.org/10.1093/CE/ZKAC092>

Plan Nacional de Depósitos de Relaves. (2022).

Propuesta, U., & Chile, D. (2019). *ESTÁNDAR DE MONITOREO Y EVALUACIÓN PARA LA ESTABILIDAD FÍSICA DE LOS DEPÓSITOS DE RELAVES.*
https://www.sernageomin.cl/pdf/ESTANDAR_IEF_NOV_SNGM.pdf

¿Qué es la fitorremediación? - phy2sudoe. (2016). <https://www.phy2sudoe.eu/el-proyecto/que-es-la-fitorremediacion/>

- Sadzawka R., A., Carrasco R., M. A., Grez Z., R., Mora G., M. de la L., Flores P., H., & Neaman, A. (2006). *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006.* <https://hdl.handle.net/20.500.14001/8541>
- Sánchez Valenciano, D. (2014). *Análisis del software ImageJ para el análisis científico de imágenes.*
- Schroeder, A. B., Dobson, E. T. A., Rueden, C. T., Tomancak, P., Jug, F., & Eliceiri, K. W. (2020). The ImageJ ecosystem: Open-source software for image visualization, processing, and analysis. *Protein Science : A Publication of the Protein Society*, 30(1), 234. <https://doi.org/10.1002/PRO.3993>
- Tamara Núñez. (2024, October 16). *El desconocido mundo de la doca chilena, una vistosa suculenta endémica de las costas del país | Ladera Sur.* <https://laderasur.com/articulo/el-desconocido-mundo-de-la-doca-chilena-una-vistosa-suculenta-endemica-de-las-costas-del-pais/>
- Timmers, R. A., Rothballer, M., Strik, D. P. B. T. B., Engel, M., Schulz, S., Schloter, M., Hartmann, A., Hamelers, B., & Buisman, C. (2012). Microbial community structure elucidates performance of *Glyceria maxima* plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology and Biotechnology* 2012 94:2, 94(2), 537–548. <https://doi.org/10.1007/S00253-012-3894-6>
- Wetser, K., Liu, J., Buisman, C., & Strik, D. (2015). Plant microbial fuel cell applied in wetlands: Spatial, temporal and potential electricity generation of *Spartina anglica* salt marshes and *Phragmites australis* peat soils. *Biomass and Bioenergy*, 83, 543–550. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2015.11.006>