

*“Año del Diálogo y la Reconciliación Nacional”*



# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA**

(Creada por Ley N° 25265)



## **ESCUELA DE POSGRADO**

### **TESIS**

**INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE Y LA  
CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO OXÁLICO SOBRE LA REMOCIÓN DE  
PLOMO POR ELECTROREMEDIACIÓN DE RELAVE DE LA EMPRESA  
MINERA PAREDONES**

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN: METALURGIA EXTRACTIVA  
DE COBRE Y POLIMETÁLICOS**

**PRESENTADO POR:**

**BACH. GARY CHRISTIAM FARFÁN CHILICAUS**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN:  
INGENIERÍA METALÚRGICA Y GEOMETALURGIA**

**MENCIÓN: METALURGIA EXTRACTIVA DE  
COBRE Y POLIMETÁLICOS**

**HUANCAVELICA - PERU**

**2019**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA

(Creado por Ley N° 25265)

ESCUELA DE POSGRADO

(APROBADO CON RESOLUCIÓN N° 736-2005-ANR)



"Año de la lucha contra la corrupción e impunidad"

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

Ante el Jurado conformado por los docentes: **Dr. ENRIQUEZ DONAIRES Amadeo, MSc. CANTA CARLOS Paul Percy y MSc. ESTEVES PAIRAZAMAN Manuel Emiliano**

**Asesor: MSc. GUZMAN IBAÑEZ CESAR SALVADOR**

De conformidad al Reglamento único de grados y títulos de la Universidad Nacional de Huancavelica, aprobado mediante Resolución N° 330-2019-CU-UNH, ratificado con resolución N° 378-2019-CU-UNH.

El Candidato al **GRADO DE MAESTRO INGENIERIA METALURGICA Y GEOMETALURGIA CON MENCION: METALURGIA EXTRACTIVA DE COBRE Y POLIMETALICOS**

Don, **Gary Christiam, FARFAN CHILICAUS** procedió a sustentar su trabajo de Investigación titulado **"INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE Y LA CONCENTRACION DE ACIDO OXALICO SOBRE LA REMOCION DE PLOMO POR ELECTROREMEDIACION DE RELAVE DE LA EMPRESA MINERA PAREDONES"**

Luego, de haber absuelto las preguntas que le fueron formulados por los Miembros del Jurado, se dio por concluido al ACTO de sustentación, realizándose la deliberación y calificación, resultando:

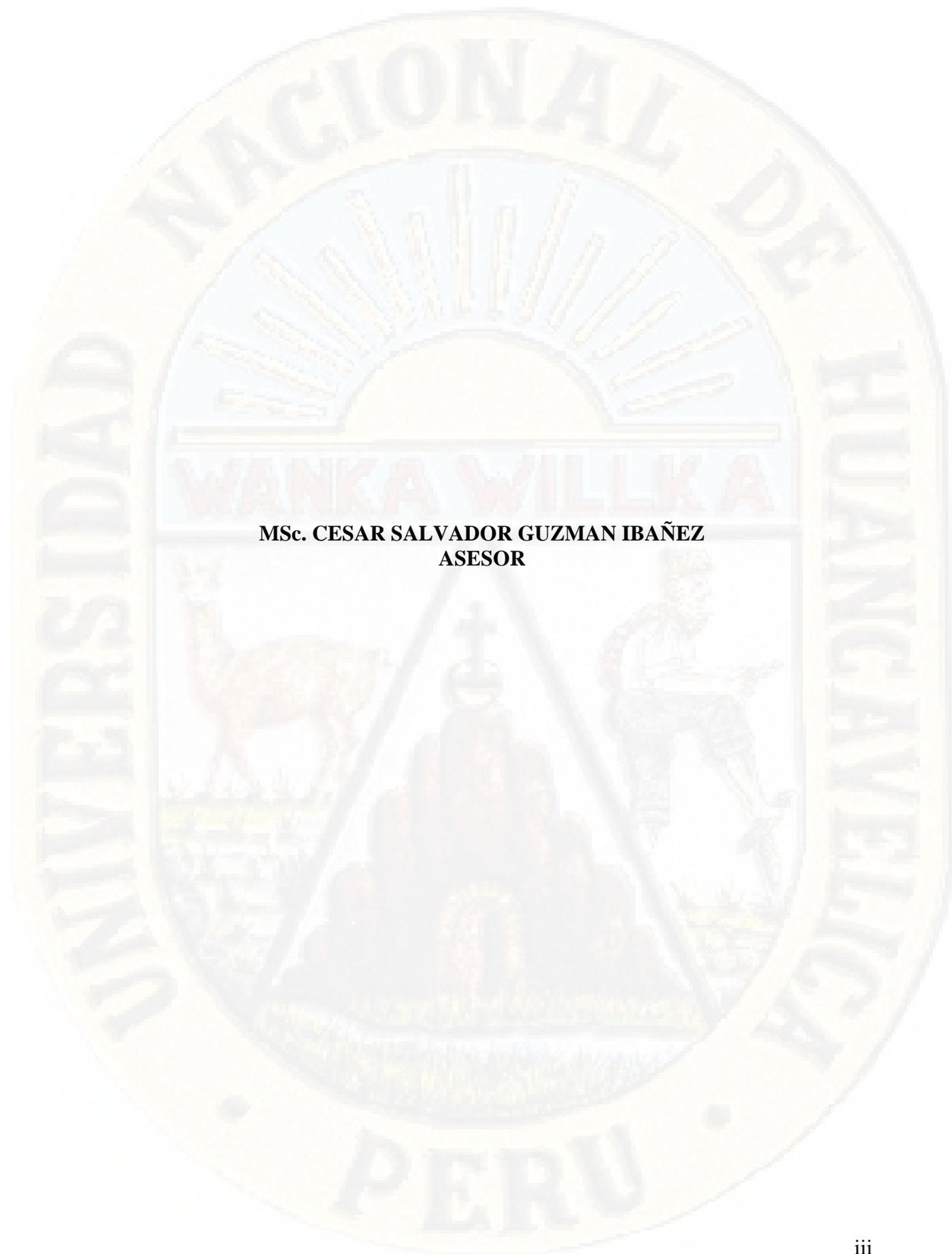
Con el calificativo: Aprobado  Por: **UNANIMIDAD**  
Desaprobado

Y para constancia se extiende la presente ACTA, en la ciudad de Huancavelica, a los Veintitrés días del mes de julio del año 2019.

.....  
**Dr. ENRIQUEZ DONAIRES Amadeo**  
Presidente del Jurado.

.....  
**MSc. CANTA CARLOS Paul Percy**  
Secretario del Jurado

.....  
**MSc. ESTEVES PAIRAZAMAN Manuel Emiliano**  
Vocal del Jurado



**MSc. CESAR SALVADOR GUZMAN IBAÑEZ**  
**ASESOR**

## **Dedicatoria**

### ***A Dios.***

*Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.*

### ***A mis padres Juana y César.***

*Por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.*

### ***A mi esposa Gladys.***

*Quien me apoyo y alentó para continuar, cuando parecía que me iba a rendir.*

### ***A mis amados hijos Gabriel y Sofía.***

*Por ser la motivación principal de mí continúa superación.*

### ***A mi tío Jorge (QEPD).***

*Por quererme y apoyarme en un tiempo oscuro en la familia, esto también se lo debo a usted.*

## Resumen

El presente trabajo de investigación, que tiene como título “Influencia de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico sobre la remoción de plomo por electroremediación del relave de la empresa minera paredones”, que tiene como objetivo principal la el tratamiento de suelos contaminados, y eliminación de metales pesados, como el plomo presentes en relaves de mina de la empresa minera Paredones. Para la remoción de este metal pesado, se hizo uso del proceso de electroremediación, colocando como variables en este proceso la densidad de corriente de 10, 20 y 30 mA/cm<sup>2</sup> y con concentraciones de ácido oxálico de 5, 10, 15 mol/L y con un tiempo de residencia de 24 horas como mínimo y según antecedentes.

Se realizaron mediciones de pH, entre las distancia de los electrodos, observando que el pH se incremente del ánodo hacia el cátodo, considerando una distancia de 10 cm entre ambos. Por otra parte antes y después del proceso de electroremediación, se realizó un análisis de contenido de plomo (ppm), siendo el contenido de plomo inicial de 4641.80 ppm. De los resultados obtenidos se concluyó que la eficiencia máxima en la remoción de metal pesado de Pb, presentes en relave fue del 83.77%, con variables de 30 mA/cm<sup>2</sup> densidad de corriente y de ácido oxálico al 15M, y por último el análisis estadístico confirma que la variable de mayor influencia en el presente proceso de tratamiento de suelo, fue la densidad de corriente.

Palabras clave: Electroremediación, Pb, relave, densidad de corriente

## Abstract

This research work, whose title is "Influence of the density of the current and the concentration of oxalic acid on the elimination of lead by electroremediation of the resource of the mining company paredones", whose main objective is the treatment of soils contaminated, and elimination of heavy metals, such as lead present in mine tailings from the mining company Paredones. For the removal of this heavy metal, the process of electroremediation was used, placing as variables in this process the current density of 10, 20 and 30 mA / cm<sup>2</sup> and with oxalic acid concentrations of 5, 10, 15 mol / L and with a residence time of at least 24 hours and according to antecedents.

PH measurements were made between the distances of the electrodes, observing that the pH was increased from the anode to the cathode, considering a distance of 10 cm between them. On the other hand before and after the electroremediation process, a lead content analysis (ppm) was carried out, with the initial lead content being 4641.80 ppm. From the results obtained it was concluded that the maximum efficiency in the removal of heavy metal from Pb, presented in relation to 83.77%, with variables of 30 mA / cm<sup>2</sup>, current density and oxalic acid at 15M, and finally the statistical analysis confirms that the variable of greatest influence in the present process of soil treatment, was the current density.

Keyword: Electroremediation, Pb, tailings, current density

# Índice

	Pag.
<i>Dedicatoria</i>	<i>iv</i>
<i>Resumen</i>	<i>v</i>
<i>Abstract</i>	<i>vi</i>
<i>Índice</i>	<i>vii</i>
<i>Lista de Tablas</i>	<i>ix</i>
<i>Lista de Figuras</i>	<i>xi</i>
<i>Introducción</i>	<b>13</b>
<b>CAPITULO I</b>	<b>14</b>
10.1. Planteamiento del problema.	14
10.2. Formulación del problema.	19
10.3. Objetivos de la investigación.	20
10.3.1. Objetivo general.	20
10.3.2. Objetivo específico.	20
10.4. Justificación.	20
<b>CAPITULO II</b>	<b>22</b>
<b>MARCO TEORICO</b>	<b>22</b>
2.1. Antecedentes de la investigación.	22
2.2. Bases teóricas.	26
2.3. Formulación de hipótesis.	41
2.4. Definición de términos.	41
2.5. Identificación de variables.	42
2.6. Operacionalización de variables.	42
<b>CAPITULO III</b>	<b>44</b>
<b>METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION</b>	<b>44</b>
3.1. Tipo de investigación.	44
3.2. Nivel de investigación.	44
3.3. Métodos de investigación.	44
3.4. Diseño de investigación.	45
3.5. Población, muestra y muestreo.	46
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	48
3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.	49

3.8. Descripción de la prueba de hipótesis.	49
<b>CAPITULO IV</b>	<b>51</b>
<b>PRESENTACION DE RESULTADOS</b>	<b>51</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>60</b>
<b>RECOMENDACIONES.</b>	<b>61</b>
<b>REFERENCIA</b>	<b>62</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>64</b>
<b>MATRIZ DE CONSISTENCIA</b>	<b>65</b>
<b>INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y BASE DE DATOS</b>	<b>67</b>
<b>TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.</b>	<b>73</b>

## Lista de Tablas

<b>Tabla N° 1.</b> Fases de la actividad minera y su impacto al ambiente.	27
<b>Tabla N° 2.</b> Cuadro comparativo de tecnologías in situ para la remediación de suelos contaminados.	30
<b>Tabla N° 3.</b> Diseño de la información y diseño específico.	42
<b>Tabla N° 4.</b> Estimación del valor por prueba y error.	46
<b>Tabla N° 5.</b> Matriz de diseño experimental para los niveles de las variables de estudio.	47
<b>Tabla N° 6.</b> Modelo matricial para el experimento bifactorial.	48
<b>Tabla N° 7.</b> Valores de porcentajes de remoción de Pb, en relaves de mina, tratados a diferentes densidades de corriente y al 0 M de ácido oxálico.	50
<b>Tabla N° 8.</b> Valores de porcentajes de remoción de Pb, en relaves de mina, tratados a diferentes densidades de corriente y al 5 M de ácido oxálico.	50
<b>Tabla N° 9.</b> Valores de porcentajes de remoción de Pb, en relaves de mina, tratados a diferentes densidades de corriente y al 10M de ácido oxálico.	51
<b>Tabla N° 10.</b> Valores de porcentajes de remoción de Pb, en relaves de mina, tratados a diferentes densidades de corriente y al 15M de ácido oxálico.	51
<b>Tabla N° 11.</b> Ficha de reporte de análisis químico, del relave de mina	67
<b>Tabla N° 12.</b> Llenado de la ficha reporte.	68
<b>Tabla N° 13.</b> Tabla resumen de los valores porcentuales de la remoción del Pb.	69
<b>Tabla N° 14.</b> Ficha de reporte de medición de pH, del relave de mina.	69
<b>Tabla N° 15.</b> Valores de pH, después del proceso de electrorremediación, con respecto a la distancia entre los electrodos.	70

<b>Tabla N° 16.</b> Valores de pH de las muestras de relave	70
<b>Tabla N° 17.</b> Distribución Porcentual del tamaño de partícula del relave (suelo).	71
<b>Tabla N° 18.</b> Cuadro resumen del análisis de varianza para un diseño bifactoria.	72
<b>Tabla N° 19.</b> Datos obtenidos del proceso de electrocoagulación y remoción de plomo (Pb).	72
<b>Tabla N° 20.</b> Análisis de Varianza de los resultados experimentales	77

## Lista de Figuras

- Figura N°1.** Observatorio de conflictos sociales en Cajamarca por pasivos ambientales de paredones. 17
- Figura N°2.** Esquema básico del proceso de electroremediación, las especies iónicas migran por la acción del campo eléctrico. El frente ácido se forma en el ánodo y migra hacia el cátodo. 33
- Figura N°3.** Esquema básico del fenómeno de electroósmosis, las especies iónicas migran por la acción del campo eléctrico, las partículas en suspensión migran junto con el electrolito hacia uno de los polos eléctricos 35
- Figura N°4.** Secuencia experimental a seguir para el proceso de electrocoagulación 45
- Figura N°5.** Grafico representativo de los valores del porcentaje de remoción de Pb, en relaves de mina. 52
- Figura N°6.** Medición del pH al final del proceso de electroremediación con densidad de corriente de 10 mA/cm<sup>2</sup>. 53
- Figura N°7.** Medición del pH al final del proceso de electroremediación con densidad de corriente de 20 mA/cm<sup>2</sup>. 54
- Figura N°8.** Medición del pH al final del proceso de electroremediación con densidad de corriente de 30 mA/cm<sup>2</sup> 55
- Figura N°9.** Triángulo textural de USDA 70
- Figura N°10.** Medición, corte y montaje de placas de madera dentro de la celda.76

<b>Figura N°11.</b> Lijado de la superficie de placas metálicas, conexión con alambre N° 8 (ánodo y cátodo).	79
<b>Figura N°12.</b> Homogenización y secado del relave de mina.	80
<b>Figura N°13.</b> Proceso de electroremediación y extracción de muestras.	81
<b>Figura N° 14.</b> Proceso de análisis granulométrico al relave de mina.	80

## Introducción

El desarrollo tecnológico, el consumo masivo e indiscriminado y la producción de desechos principalmente mineros, ha provocado la presencia de muchos metales en cantidades importantes en el ambiente, provocando numerosos efectos sobre la salud y el equilibrio de los ecosistemas. Se incorporan con los alimentos o como partículas que se respiran y se van acumulando en el organismo (bioacumulación), hasta llegar a límites de toxicidad.

Estos desechos, debido al lento desarrollo, a la ineficiencia o inexistencia de las técnicas de manejo, han generado una gran cantidad de sitios contaminados con metales pesados, compuestos orgánicos y otros materiales peligrosos (Ibarra, Navarro, Teran, & Vizcarra, 2015). En los últimos años se han desarrollado diversas tecnologías para la remediación de suelos contaminados aplicándose exitosamente. Sin embargo, en nuestro país este tipo de investigación no ha tenido la importancia que requiere. La remediación de nuestros suelos demanda la investigación detenida de los factores que influyen en la eficiencia y eficacia de la técnica y método a ser aplicado. Las variables tanto físicas como químicas son complejas por lo que las técnicas en investigación cada día van sufriendo modificaciones, la remediación, específicamente la electrorremediación también tiene que tener en cuenta estas variables para su análisis.

La electrorremediación es una alternativa para el tratamiento y recuperación de suelos contaminados con metales pesados. En el país especialmente en el sector minero se requiere de la aplicación e investigación de esta técnica y otras.

## **CAPITULO I**

### **EI PROBLEMA**

#### **1.1. Planteamiento del problema.**

El incremento en los niveles de contaminación ambiental, nos da como resultado un aumento en las investigaciones y el desarrollo de tecnologías más efectivas para su eliminación. Como resultado, la introducción de tecnologías limpias en los procesos industriales.

Para ser más específicos, en nuestro país existen varias actividades económicas que poseen potencial de contaminación, principalmente el suelo; tales como la actividad minera, actividad forestal, actividad petrolera de refinación, u otras actividades. En especial la actividad minera, uno de los pilares más importantes de nuestra economía, tiene un alto potencial de producir impactos ambientales de diferente índole, entre ellos la contaminación del suelo. Estos impactos se deben principalmente a la gran cantidad de residuos generados tanto en los procesos de extracción del mineral como en la etapa de procesamiento. Uno de los grupos de contaminantes generado por estos procesos son los metales, los cuales se pueden dispersar mediante un medio líquido, como sucede en la lixiviación de residuos mineros, dispuestos en botaderos o relaves. Otro aspecto a considerar es que se ha generado una problemática relacionada con los “pasivos ambientales mineros”, que corresponde a todas las faenas mineras abandonadas, incluyendo sus residuos, y que constituyen un factor de riesgo para la seguridad y salud de las personas que viven en zonas mineras.

“Un ejemplo claro es la relavera de la mina Paredones, ubicado a hora y media de la ciudad de Cajamarca, la cual ha sido abandonada por aproximadamente 47 años por la empresa “Northern Perú Mining Corporation” que realizó sus explotaciones y dejando gran cantidad de relaves mineros acumulados a la intemperie, sin ningún tipo de protección y sin tomar ninguna precaución sobre las consecuencias que estos desechos pueden generar en las personas que viven cerca, es preciso señalar que los desechos se encuentran depositados a pocos metros del río San Pablo”<sup>1</sup>. Es por ello que se hace indispensable un método de remediación para evitar problemas con el medio ambiente y la comunidad.

La inexistencia de información de análisis de remoción de metales pesados de pasivos minero nos lleva a la necesidad de aplicar una evaluación de efecto de remoción de metales pesados, donde las muestras serán extraídas y caracterizadas, además de determinar los parámetros fisicoquímicos del calidad de los relaves; para obtener una línea base y así establecer una relación entre la calidad de suelos.

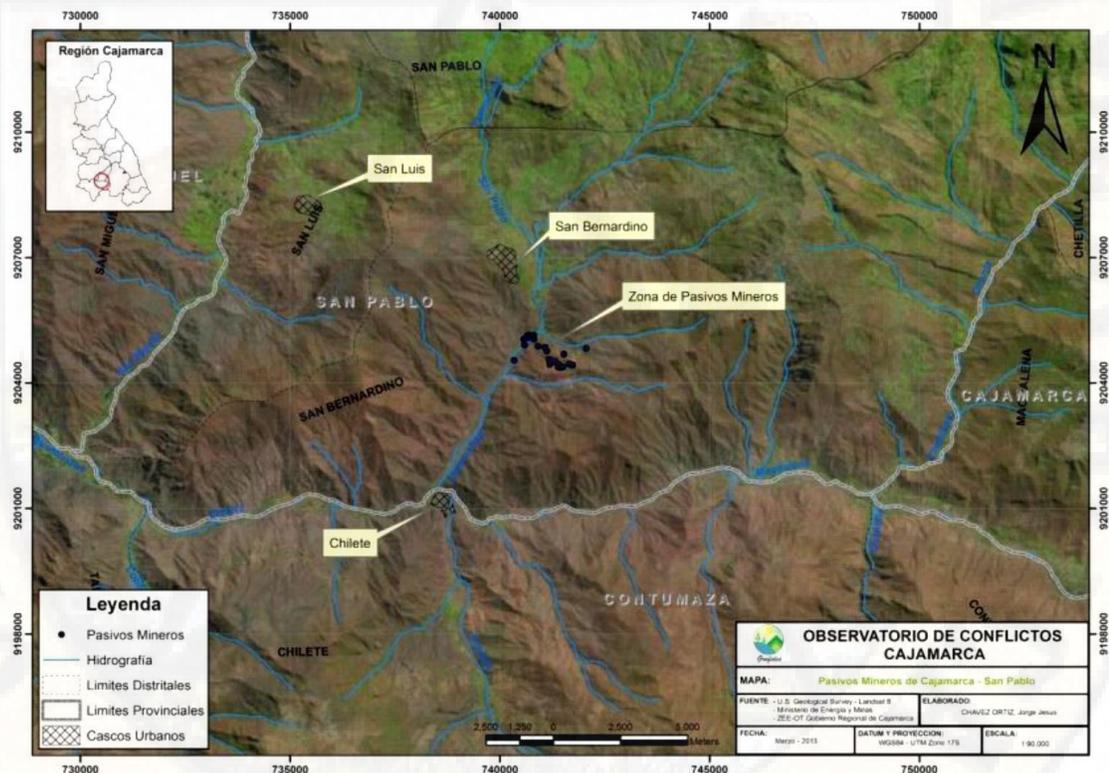
Según Quijada, menciona que: *“A marzo del 2015, se han registrado 8616 pasivos ambientales mineros –en adelante PAMs- en el país, donde el 50% de ellos son altamente riesgosos. La información que se tiene sobre estos pasivos es muy limitada, y no hay un registro ni instrumentos para el manejo de los pasivos de la pequeña minería y minería artesanal. Por ende, la pronta remediación de los PAMs existentes y la no generación de nuevos PAMs resultan absolutamente necesarias, por cuanto nos encontramos*

---

<sup>1</sup> (Benites Mostacero R, 2015)

transitando entre PAMs que contienen sustancias tóxicas y bioacumulables (efectos adversos a largo plazo) hacia PAMs que además, podrían contener o generar sustancias letales (efectos adversos a muy corto plazo).”<sup>2</sup>

Estos pasivos ambientales mineros dan oportunidad para que nazcan los conflictos sociales como podemos apreciar en lo siguiente. “En la zona de Paredones, en la provincia de San Pablo, distrito de San Bernardino, existen 29 pasivos ambientales mineros, correspondientes a plantas de procesamiento, desmontes de mina, campamentos, oficinas, talleres, relaves y bocaminas, que estarían afectando a la cuenca del Jequetepeque.”<sup>3</sup>



<sup>2</sup> (Quijada, 2015)

<sup>3</sup> (Grufides, 2015)

**Figura N° 1.** Observatorio de conflictos sociales en Cajamarca por pasivos ambientales de paredones.

**Fuente:** (Grufides, 2015)

*“Desde 1987 en los Estados Unidos de Norteamérica se han aplicado técnicas de Electrorremediación a nivel comercial para restaurar suelos contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos (residuos peligrosos y radioactivos, metales, solventes, entre otros), así mismo se han realizado demostraciones a nivel piloto y de campo para determinar la efectividad de la técnica”<sup>4</sup>* ,actualmente en Estados Unidos de Norteamérica y Europa existen compañías que ofrecen en sus portafolios como remediación de suelos contaminados. Como hace mención “En los siguientes ejemplos se muestra el potencial de la tecnología de electrorremediación para remover diversos tipos de contaminantes:

- Según Perez.D, hace mención tres estudios que reportan lo siguiente.

En 1995 Geokinetics International Inc. reportó la remediación de un sitio de 213 m<sup>2</sup> y 1 m de profundidad, contaminado con cadmio, cobre, níquel, plomo y Zinc, en 18 meses de electrorremediación, obteniendo eficiencias diferenciadas para cada elemento (desde 75 % para el cobre hasta 99 % para el plomo) con un costo desde 300 hasta 500 dólares por yarda cúbica.

En 1996 se realizó una demostración de extracción de plomo de un campo de pruebas balísticas de la armada norteamericana. Los resultados

---

<sup>4</sup> (Perez.D, 2007)

mostraron una disminución del nivel de contaminación de 4500 mg/Kg a menos de 300 mg/Kg de plomo en 30 semanas de operación.

En 1997 la empresa Environmental & Technology Services reportó la remediación de un sitio de 3700m<sup>2</sup> y 21m de profundidad, contaminado con compuestos orgánicos volátiles, BTEX e hidrocarburos totales derivados del petróleo, en 12 meses. Se obtuvieron eficiencias mayores al 90 % con un costo entre 17 y 50 dólares por tonelada de suelo”.

Sin embargo según Perez. D, hace mención que: *“El concepto de Electrorremediación de suelos es aparentemente simple, sin embargo, al encontrarse involucrados diversos procesos fisicoquímicos, así como características del suelo se eleva la complejidad de la técnica. Se han desarrollado técnicas mejoradas para aumentar la eficiencia de la tecnología. Las mejoras se enfocan en el control del pH para mantener los contaminantes en solución, en utilizar materiales y arreglos de electrodos adecuados para cada caso, en facilitar la desorción de los contaminantes del suelo y en el acoplamiento de biotecnologías en el caso de contaminantes orgánicos, que ayuden a la degradación de los mismos. La electrorremediación tiene un gran potencial para descontaminar diversos tipos de suelos contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos en un amplio rango de concentraciones. Aunque en diversos estudios, tanto de laboratorio como de campo se han obtenido buenos resultados, todavía es necesario avanzar en las investigaciones para tener un mejor entendimiento*

*de los fenómenos de transporte involucrados. De esta manera se podrán desarrollar en el futuro mejores técnicas híbridas que aprovechen las capacidades de la Electrorremediación y obtener altas eficiencias de remoción en campo”.*

Según Garcia Hernández & Vargas Ramirez, indica que: *“En trabajos recientes, reportan una remoción de iones Pb(II) de un suelo limo-arcilloso, contaminado artificialmente, con separaciones del 70% con respecto a la concentración inicial, en la región cercana al ánodo, y de 20 % en las regiones catódicas, a un tiempo de tratamiento de 24 horas a un potencial constante de 20 Voltios.”*<sup>5</sup>

El presente trabajo de investigación está orientado que se determine de manera técnica la remoción de plomo del relave minero Paredones por electrorremediación. Asimismo la influencia que tiene la densidad de corriente y el ácido acético en el proceso.

Con el fin de tratar relaves mineros por la minería antigua que es principal ente para que nazcan los conflictos sociales en nuestra región. Por otro lado esta tecnología se puede aplicar en cierre de minas, teniendo una gran ventaja que es una tecnología limpia.

## **1.2. Formulación del problema.**

¿Cómo influye la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico sobre la remoción de plomo por electroremediación del relave de la empresa minera paredones?

---

<sup>5</sup> (Garcia Hernández, 2011)

### **1.3. Objetivos de la investigación.**

#### 1.3.1. Objetivo general.

Determinar la influencia de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico sobre la remoción de plomo por electroremediación del relave de la empresa minera Paredones.

#### 1.3.2. Objetivo específico.

- Analizar las condiciones iniciales de contaminación por plomo del relave de minas Paredones.
- Determinar el rango de la densidad de corriente para la máxima remoción de plomo por electroremediación.
- Determinar la concentración del ácido oxálico para la máxima remoción de plomo por electroremediación.

### **1.4. Justificación.**

En la mina Paredones encontramos gran cantidad de desechos sólidos provenientes de los procesos mineros realizados anteriormente y con ello el aumento progresivo de la toxicidad, pues su tiempo de residencia en los suelos es alto, a la vez poniendo en peligro el medio ambiente y a las comunidades aledañas.

Estos niveles crecientes de contaminación representan un peligro latente para futuras generaciones en la medida en que se sigan acumulando desechos (relave minero) que aumentan los contenidos de metales pesados

y otros contaminantes; actualmente la zona que rodea a la mina de Paredones, se he convertido en un ambiente que por factores sociales se he poblado cada vez más, y más aún un afluente (río San Pablo) que alimenta a la presa Gallito Ciego, con lo cual las comunidades aledañas estan expuestos a una contaminacion inminente en el tiempo. Adicionalmente, por efecto de lluvias y arrastre de sólidos estos contaminates (metales pesados) pueden llegar a aguas subterráneas y desembocar en afluentes que tengan más impacto en la población.

Bajo esta perspectiva y teniendo en cuenta el gran impacto ambiental ocasionado por su acumulación (metales pesados), se propone utilizar una tecnología conocida como la electrorremediación para la remoción del metal más concentrado en dicho relave minero, ya que en estudios anteriores se obtuvieron resultados satisfactorios en cuanto a la disminución de plomo en los mismos suelos.

## CAPITULO II

### MARCO TEORICO

#### 2.1. Antecedentes de la investigación.

##### **Internacionales:**

Según Pérez (2017), en su tesis denominada “Disminución de la concentración de plomo en el suelo con la técnica de electroremediación en una celda construida en el laboratorio”, el objetivo del presente trabajo fue determinar la disminución de la concentración de plomo en el suelo con la técnica de electrorremediación en una celda construida en el laboratorio. Se construyó una celda con medidas de 20 x 10 x 5 cm obteniendo un volumen de 1000 cm<sup>3</sup>, para la electrorremediación del suelo contaminado por plomo. Las condiciones para realizar los experimentos fueron aplicando una corriente de 20 y 40 V, con un amperaje de 1 y 2, utilizando como solvente agua destilada y ácido acético por un tiempo de 24 horas. Los resultados de la concentración de Plomo en suelo, de los 9 experimentos realizados, solo 2 de los tratamientos obtuvimos mejores resultados de concentración del metal. En el experimento E aplicando un voltaje de 20, 2 Amper, con agua destilada fue posible la remoción del Plomo y el experimento H aplicando un voltaje de 40, 1 Amper, con ácido acético fue posible la remoción del Plomo. La mejor diferencia entre la sección con menor concentración y la de mayor concentración fue el experimento H con un voltaje de 40 y 2 Amper, utilizando como solvente ácido acético con un tiempo de 24 horas con una diferencia de 469 ppm

Según Alcaino (2012) en su tesis denominada “Análisis y comparación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales” tuvo como objetivo analizar y comparar tecnologías de remediación a suelos contaminados con metales. Las tecnologías propuestas para esto son: el lavado de suelos, la bioestabilización y la electrorremediación, las cuales fueron seleccionadas en base a una estrategia de remediación diseñada que se enfoca tanto en el estrato aerobio y anaerobio del suelo, con el objetivo de analizar la remoción o estabilización del cobre y del arsénico en el suelo.

Según García, Vargas & Reyes (2011) en su tesis denominada “Electrorremediación de suelos arenosos contaminados por Pb, Cd y As provenientes de residuos mineros, utilizando agua y ácido acético como electrolitos”, se realizaron estudios potencioestáticos en una celda de electrorremediación experimental, de un suelo real tipo arenoso (93% arena) contaminado por la oxidación residuos mineros proveniente de la zona de Zimapán Hidalgo, se utilizó agua desionizada,  $\text{CH}_3\text{COOH}$  y  $\text{CH}_3\text{COONH}_4$  0.001 M, ya sea como humectante del suelo o como electrolitos, se aplicó un potencial constante de 20 V durante 24 horas. Al final de los experimentos se logró una remoción de 12 % (98 ppm) para Pb, 20 % (7 ppm) para Cd y 22 % para As (79 ppm). Así mismo, Se obtuvo remoción de Pb en todos los experimentos, con mejores resultados cuando se utilizó ácido acético como anolito y catolito (experimento II), alcanzando una remoción del 12 % al final de las 24 horas de tratamiento. La

concentración de Pb disminuyó con respecto al inicial en todos los experimentos y secciones del suelo, pero se encontraron mejores resultados cuando se utiliza ácido acético como anolito y catolito.

En 1997 la empresa Environmental & Technology Services reportó la remediación de un sitio de 3700 m<sup>2</sup> y 21 m de profundidad, contaminado con compuestos orgánicos volátiles, BTEX e hidrocarburos totales derivados del petróleo, en 12 meses. Se obtuvieron eficiencias mayores al 90 % con un costo entre 17 y 50 dólares por tonelada de suelo (Loo & Chilingar, 1997).

En 1996 se realizó una demostración de extracción de plomo de un campo de pruebas balísticas de la armada norteamericana. Los resultados mostraron una disminución del nivel de contaminación de 4500 mg/Kg a menos de 300 mg/Kg de plomo en 30 semanas de operación (USAEC, 1997).

En 1995 Geokinetics International Inc. Reportó la remediación de un sitio de 213 m<sup>2</sup> y 1 m de profundidad, contaminado con Cd, Cu, Ni, Pb, y Zn, en 18 meses de electrorremediación, obteniendo eficiencias diferenciadas para cada elemento (desde 75 % para el cobre hasta 99 % para el plomo) con un costo desde 300 hasta 500 dólares por yarda cúbica (USEPA, 1995).

### **Nacionales:**

Según Escobar & Ocas (2016), en su tesis denominada “Electroremediación en función de la densidad de corriente y la concentración de ácido acético, como alternativa para la disminución de plomo en relaves mineros - mina Paredones, Cajamarca, 2016”, en la que concluyen que de un suelo real tipo arenoso (65%) (Relave minero), provenientes de la mina Paredones ubicada en el distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, departamento de Cajamarca. Se utilizó agua (como humectante para el suelo) y ácido acético (0.01, 0.02 y 0.03 M) (electrolítico), al cual se le aplicó un potencial constante de 10 a 25 Voltios durante 24 horas. Al terminar los experimentos se recuperó el suelo, se determinó el pH, observando que el suelo presenta una gran capacidad de amortiguamiento. Al final de los 36 experimentos se logró una remoción de 45.85 % de plomo del relave minero de Paredones, disminuyendo así la toxicidad. Asimismo mediante el análisis ANVA se determinó que la concentración del ácido acético y la densidad de corriente afectan notablemente en el proceso de electroremediación para remover el plomo.

Según Yauri (2014) en su informe de suficiencia para optar el título de Licenciado en Química, denominado “Estudio de técnicas electroquímicas para remediación de suelos” concluye afirmando que para la remoción de Plomo (Pb). Dónde se utilizó ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) y nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ), como solución en la celda y como solución electrolítica respectivamente aplicando un potencial constante de

aproximadamente 10V durante 30 minutos. La concentración de plomo en el suelo se determinó a través de Voltametría de Redisolución Anódica antes y después de la aplicación de la técnica de remoción, para poder determinar el porcentaje de rendimiento del método, dónde se obtuvo una remoción de 47.90 % de Pb para la muestra.

## **2.2. Bases teóricas.**

### **Industria minera**

La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en Perú - Cajamarca, que contribuye en gran medida con el desarrollo económico del país, suministrando insumos a una serie de industrias (construcción, metalúrgica, siderúrgica, química y electrónica). De acuerdo con información de la Dirección General de Minas, la industria minera nacional es mayoritariamente metálica, y se dedica principalmente a la producción de oro, cobre, zinc, plata y plomo. Debido al desarrollo y modernización en los procesos de extracción y procesamiento de los recursos minerales, así como a la generación de grandes cantidades de residuos provenientes de sus procesos, la industria minera en Perú – Cajamarca ha generado por décadas una gran cantidad de desechos y sitios contaminados a lo largo de todo el país.

### **Relación de la actividad minera y su impacto al ambiente**

Como dice Grufides: *“En la provincia de San Pablo hay pasivos ambientales que generan aguas ácidas producidas por una mina abandonada en la zona de Paredones, distrito de San Bernardino. Al respecto de acuerdo a un informe de la*

*dirección técnica de la Dirección General de Minería se emitió el día 9 de febrero del 2015 la Resolución Ministerial 045 - 2015 MEM/DM donde dispone que el estado asumirá la remediación de los pasivos ambientales a través de la Dirección General de Minería de la zona de Paredones y otras zonas del país por ser calificadas de muy alto riesgo y alto riesgo.”<sup>6</sup>*

La relación que existe entre la minería y su impacto con el medio ambiente se detalla en la siguiente tabla.

**Tabla N° 1.** Fases de la actividad minera y su impacto al ambiente.

<b>FASE</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>IMPACTO AMBIENTAL</b>
Exploración	Barrenación, obras y perforaciones	Dstrucción de vegetación
Explotación	Obras diversas: tiros, socavones, patios para depósito de minerales, zonas para descarga de materiales	Operación de presas de jales: arrastre de residuos peligrosos; descarga de aguas residuales, relaves.
Beneficio	Concentración, trituración y molienda, tratamientos previos	Generación de ruido, vibración y emisión de polvo
Fundición y refinación	Obtención de metales y sus aleaciones (uso de hornos industriales)	Emisiones a la atmosfera, residuos peligrosos y aguas residuales

<sup>6</sup>(Grufides, 2015)

## **Relaves Mineros**

- Según Diamire, menciona que relaves mineros: "Son desechos tóxicos subproductos de procesos mineros y concentración de minerales, usualmente una mezcla de tierra, minerales, agua y roca. Los relaves contienen altas concentraciones de químicos y elementos que alteran el medio ambiente, por lo que deben ser transportados y almacenados en "tanques o pozas de relaves" donde lentamente los contaminantes se van decantando en el fondo y el agua es recuperada o evaporada"<sup>7</sup>

## **Contaminación del suelo con metales pesados**

La principal contaminación por metales pesados es principalmente por la actividad minera, como se detalla a continuación: *"Metales pesados son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Tienen aplicación directa en numerosos procesos de producción de bienes y servicios. Los más importantes son: arsénico, cadmio, cobalto, cromo, cobre, mercurio, níquel, plomo, estaño y zinc. Metales tóxicos son aquellos cuya concentración en el ambiente puede causar daños en la salud de las personas. Los términos metales pesados y metales tóxicos se usan como sinónimos pero sólo algunos de ellos pertenecen a ambos grupos. Algunos metales son indispensables en bajas concentraciones, ya que forman parte de sistemas enzimáticos, como el cobalto, zinc, molibdeno, o como el hierro que forma parte de la hemoglobina. Su ausencia causa enfermedades, su exceso intoxicaciones. El desarrollo tecnológico, el consumo masivo e indiscriminado y la producción de desechos principalmente urbanos, ha provocado la*

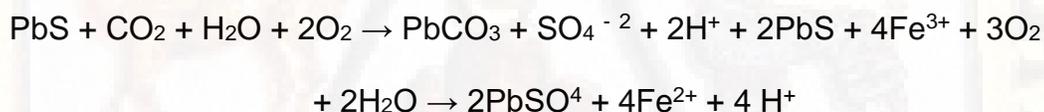
---

<sup>7</sup>(DIAMIRE, 2014)

*presencia de muchos metales en cantidades importantes en el ambiente, provocando numerosos efectos sobre la salud y el equilibrio de los ecosistemas. Se incorporan con los alimentos o como partículas que se respiran y se van acumulando en el organismo, hasta llegar a límites de toxicidad. Si la incorporación es lenta se producen intoxicaciones crónicas, que dañan los tejidos u órganos en los que se acumulan.”<sup>8</sup>*

### **Contaminación del suelo con plomo**

“El plomo se encuentra presente en un gran número de minerales, siendo la forma más común el sulfuro de plomo (galena: PbS). También son comunes, aunque en orden decreciente, la cersusita (PbCO<sub>3</sub>) y la anglesita (PbSO<sub>4</sub>). El plomo es un metal difícilmente movilizable, y bajo condiciones oxidantes la galena da origen a minerales tales como la cersusita y anglesita:



Así, el principal riesgo relacionado con la minería del plomo no radica en la posible puesta en solución de este metal (precipita rápidamente como carbonato o sulfato), sino en lo que concierne a los procesos metalúrgicos de las menas (compuestos minerales) de plomo (fundiciones). Cabe destacar que el problema con el plomo no es nuevo (ni siquiera de comienzos de la revolución industrial). Estudios en Suecia revelan que por lo menos el 50 % de la contaminación en suelos del país fue depositada en períodos anteriores al año 1800. El particulado de plomo relacionado con problemas metalúrgicos

---

<sup>8</sup> (Jorge F., 2001)

constituye el problema principal, pero existen otras fuentes que entrañan también una peligrosidad extrema. En los años 90 se constató en la ciudad de Antofagasta (Chile) que había niños que presentaban altos contenidos de plomo en la sangre. La fuente del problema pudo ser determinada, y eran minerales y concentrados de plomo que se acumulaban sin protección en las instalaciones portuarias (pertenecientes a Bolivia), para su posterior envío. Esto nos lleva a encaminar nuestra mirada no solo a las fundiciones, sino también a las zonas donde se acumulan minerales o concentrados de plomo.<sup>9</sup>

#### **Definición de Electrorremediación:**

- Según Perez. D, señala que: *“La Electrorremediación es una tecnología para restaurar suelos contaminados que se basa en la generación de un campo eléctrico a partir de imponer corriente directa. Para la aplicación de una diferencia de potencial, o una corriente directa, se requiere el empleo de electrodos (ánodo y cátodo), los cuales son colocados en pozos excavados en el suelo, usualmente estos se humectan con un electrolito para mejorar las condiciones de conducción del campo eléctrico. La acción del electrolito permite transportar el contaminante hacia los pozos en donde será extraído. Al contrario del arrastre de fluidos, esta técnica permite establecer una migración dirigida, la cual evita la dispersión del contaminante fuera de la zona de tratamiento”*<sup>10</sup>

---

<sup>9</sup> (Jorge F., 2001)

<sup>10</sup> (Perez.D, 2007)

La técnica de electro-remediación consiste en la descontaminación, especialmente de metales pesados y otros compuestos iónicos, de suelos o lodos provenientes de algún tratamiento previo, contaminados con estas especies. La técnica implica la aplicación de un campo eléctrico continuo entre dos electrodos enterrados, para el caso del suelo, durante un cierto tiempo. Con la aplicación de este campo eléctrico se consigue, dependiendo de diversos factores como el grado de humedad del terreno, acidez, etc., movilizar las especies cargadas hacia los electrodos correspondientes, ánodo o cátodo (Vasquez, 2015).

Esta técnica es especialmente útil en aquellas zonas donde se disponga de energía eléctrica de bajo costo, pudiendo incluso adaptarse un sistema de energías alternativas (energía solar y/o eólica, almacenando energía en acumuladores) que permita el funcionamiento de manera más o menos autónoma y con bajo costo (Vasquez, 2015)..

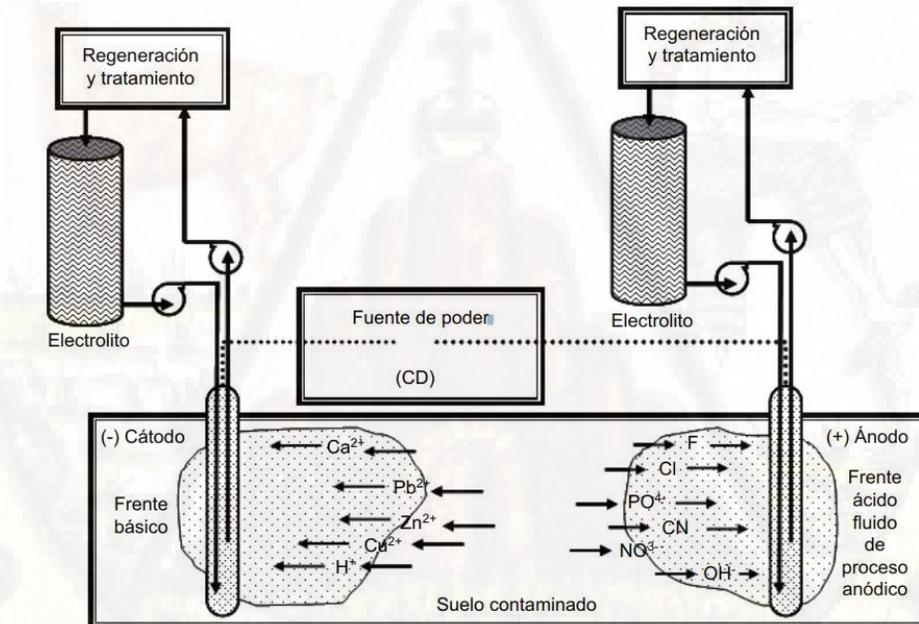
La electro-remediación permite, en comparación con otras técnicas de limpieza, una menor exposición de los operadores a los contaminantes, realizando una acumulación de los mismos en las cercanías de los electrodos permitiendo una posterior disposición de los residuos así concentrados (Vasquez, 2015).

**Tabla N° 2.** Cuadro comparativo de tecnologías *in situ* para la remediación de suelos contaminados (De la Rosa, Teulit Leon, & Ramirez, 2010).

Parámetro	Electro-remediación	Arrastre de fluidos	Extracción forzada con vapores	Oxidación química	“Landfarming”
Remoción de compuestos orgánicos	Ha demostrado ser eficiente para diversos compuestos orgánicos	Puede remover una cantidad limitada de compuestos orgánicos	Remueve sólo los que muy efectiva de para combustibles	No es para una presión vapor baja	Es muy eficiente para la mayoría de los contaminantes orgánicos
Remoción de compuestos inorgánicos	Es muy eficiente para contaminantes inorgánicos	Es eficiente, aunque puede dispersar el contaminante	No es efectiva para contaminantes inorgánicos	No suele ser efectiva para transformar el contaminante en otra forma de menor	No es efectiva para contaminantes inorgánicos
Factibilidad de aplicación en suelos	Puede aplicarse a una gran variedad de suelos	Sólo se puede aplicar a suelos de alta permeabilidad	Sólo se puede aplicar a suelos de alta permeabilidad	Puede aplicarse a una gran variedad de suelos	Puede aplicarse a una gran variedad de suelos
Estado del suelo después del tratamiento	Dependiendo del tipo de suelo puede requerirse la regeneración (fertilización y adición de	Dependiendo del tipo de suelo puede requerirse la regeneración (fertilización y adición de	El suelo no requiere de acciones de regeneración	El suelo requiere de una profunda etapa de regeneración	El suelo no requiere de acciones de regeneración

## Mecanismos de remoción

Los mecanismos principales por los cuales el campo eléctrico conduce los contaminantes hacia los electrodos son: electromigración, electroósmosis y electroforesis. Siendo los dos primeros los que ejercen la mayor influencia en el transporte del contaminante. A continuación se describe cada uno. Electromigración. Es un fenómeno en el cual los iones en solución y los coloides que tienen carga eléctrica se mueven a través del campo eléctrico con una velocidad que es proporcional al producto de la fuerza del campo eléctrico y la movilidad del ión o partícula, un esquema se presenta en la figura 1. La ecuación básica que describe la electromigración de iones a través de un capilar es (Ibarra, Navarro, Teran, & Vizcarra, 2015):



**Figura N° 2.** Esquema básico del proceso de electroremediación, las especies iónicas migran por la acción del campo eléctrico. El frente ácido se forma en el ánodo y migra hacia el cátodo.

Donde  $\mu_m$  = la velocidad de un ión [ $m\ s^{-1}$ ]

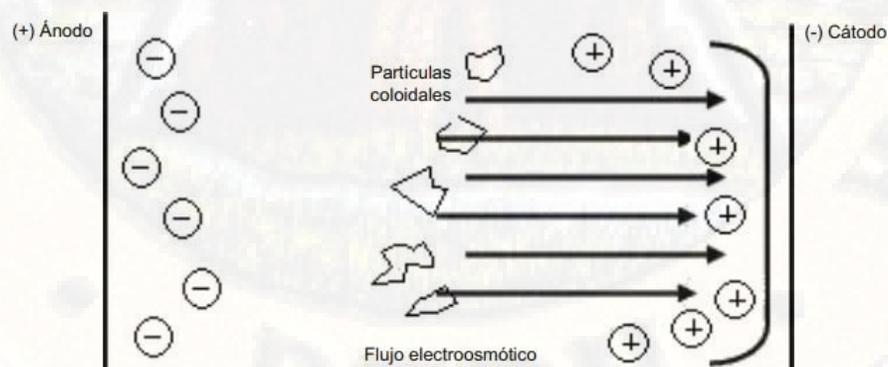
$v$  = movilidad iónica [ $m^2\ s^{-1}\ V^{-1}$ ]

$E$  = fuerza del campo eléctrico (negativo de la diferencia de potencial),  $V\ m^{-1}$

Típicamente, los valores de movilidad en suelos se encuentran alrededor de  $3 \times 10^{-8}\ m^2\ s^{-1}\ V^{-1}$  (excepto para  $H^+$  ó  $OH^-$ , que tienen movilidad con un orden de magnitud de  $10^{-7}$ ). Si el contaminante es un compuesto inorgánico y la fuerza iónica es grande, entonces el potencial  $z$  ( $\zeta$ ) es pequeño y por lo tanto los fenómenos de transporte son conducidos principalmente por electromigración.

### Electroósmosis

Es un fenómeno de transporte en el cual el líquido saturado junto con las sustancias que se suspenden en él (coloides con y sin carga eléctrica), fluyen hacia uno de los electrodos (normalmente hacia el cátodo), un esquema se muestra en la figura 2. La tasa de este flujo es proporcional al producto de la fuerza del campo eléctrico aplicado y al potencial  $\zeta$  de la interfase sólido-líquido. El valor del potencial  $\zeta$  es función de las propiedades del suelo, así como de la fuerza iónica y el pH del electrolito.



**Figura N° 3.** Esquema básico del fenómeno de electroósmosis, las especies iónicas migran por la acción del campo eléctrico, las partículas en suspensión migran junto con el electrolito hacia uno de los polos eléctricos

**Fuente:** <http://www.epistemus.uson.mx/revistas/articulos/18-ELECTROBIORREMEDIACION.pdf> (Ibarra, Navarro, Teran, & Vizcarra, 2015).

### **Electroforesis**

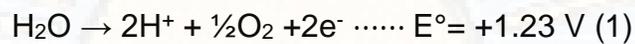
Este mecanismo se observa cuando hay partículas o coloides con carga eléctrica, de forma que los contaminantes ligados a este material particulado pueden ser transportados por el campo eléctrico. En principio se espera que la aplicación de la electroremediación en un sitio contaminado con metales sea sencilla debido al rápido transporte por electromigración y a que no es afectada por las variaciones de potencial  $\zeta$ . En suelos contaminados con metales, la electromigración tiene un mayor impacto que la electroósmosis, para que un metal sea transportado por el fenómeno de electromigración debe de estar en solución y tener una carga eléctrica, la cual no debe de cambiar mientras migra hacia uno de los electrodos (Ibarra, Navarro, Teran, & Vizcarra, 2015).

### **Factores que influyen en el proceso de electroremediación**

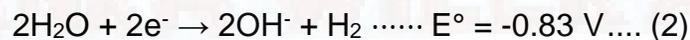
La electroremediación es una técnica que aparenta ser sencilla, sin embargo existen varios factores fisicoquímicos que influyen en el transporte de los contaminantes, y por ende en una efectiva remediación del suelo contaminado; los factores de mayor importancia se explican a continuación.

- **pH.**

Los cambios de pH promueven reacciones de los metales con otras sustancias que se encuentran en el suelo de forma natural, este factor regula la movilidad de los contaminantes en el proceso de electroremediación. La hidrólisis del agua produce una disociación que genera iones hidrógeno ( $H^+$ ) en el ánodo e iones hidroxilo ( $OH^-$ ) en el cátodo, liberando oxígeno e hidrógeno respectivamente (Ec. 1 y 2).



Reacción de hidrólisis que genera iones de hidrógeno en el ánodo



Reacción de hidrólisis que genera iones hidroxilo en el cátodo

$E^\circ$  = diferencia de potencial en el electrodo. La disociación genera un pH ácido cerca del ánodo y alcalino cerca del cátodo. Debido a la mayor movilidad del ión  $H^+$  sobre el ión  $OH^-$ , el frente ácido viaja con mayor velocidad y por lo tanto el flujo electro osmótico se dirige preferencialmente hacia el cátodo. En el caso de existir metales adsorbidos, estos son solubilizados por el frente ácido y transportados hacia el cátodo. Cuando no se aplica lavado en los pozos, el frente alcalino penetrará a una velocidad menor a la del frente ácido y cuando ambos frentes se encuentran se genera una zona en donde el pH cambia bruscamente (zona de transición), dando como resultado una frontera con un marcado cambio de pH (de 2 a 13 en menos de 0.5 cm), en esta zona los contaminantes se acumulan debido a que frecuentemente precipitan como hidróxidos metálicos.

Después de un tiempo, se observa que el suelo se acidifica, excepto en la región cercana al cátodo (Hahladakis, Lekkas, & Smponias, 2013).

Existiendo algunas excepciones cuando: (i) el suelo es muy alcalino, (ii) cuando existen sustancias amortiguadoras como fosfatos y carbonatos, y (iii) cuando los electrodos están hechos de materiales reactivos (electrodos de hierro). Una remoción exitosa dependerá de mantener el contaminante inorgánico en solución evitando los cambios súbitos de pH; en el caso de algunos contaminantes orgánicos (como ácidos y fenoles, entre otros) las condiciones óptimas de remoción serán aquellas en las que el pH logra desplazar el equilibrio de disociación de la sustancia hacia la forma disociada.

- ***Contenido de agua.***

El movimiento del electrolito por electroósmosis es función del contenido de agua; por lo tanto, el grado de saturación del suelo es un factor indispensable para llevar a cabo el proceso electrocinético. Una distribución irregular de humedad en el suelo contaminado puede observarse durante la electrorremediación, ya que el electrolito se mueve hacia uno de los electrodos, incrementando la humedad en este y disminuyéndola en el electrodo contrario. Esta disminución está asociada con el desarrollo de poros de presión negativos, variaciones en el pH y por lo tanto en la fuerza del campo eléctrico, lo cual resulta en tasas de flujo electro osmótico irregulares. Por tanto es necesario mantener una humedad adecuada agregando electrolito a la misma tasa electro osmótica a la que es drenado

del sistema. Por otro lado, un contenido bajo de agua puede generar la sequedad del suelo, debido a efectos de calentamiento o al desarrollo de algunas reacciones químicas exotérmicas (Ibarra, Navarro, Teran, & Vizcarra, 2015).

- **Conductividad eléctrica.**

La conductividad eléctrica es diferente para cada tipo de suelo, está definida como la capacidad de un medio o espacio físico de permitir el paso de la corriente eléctrica. Para conocer la conductividad eléctrica de un suelo, es necesario ponerlo en suspensión acuosa y medirla con un conductímetro. La medida obtenida (siemens) es el inverso de la resistencia a la conducción por centímetro de material, la cual tiene una relación empírica con la concentración de iones capaces de conducir la electricidad en solución acuosa ( $1\mu\text{S}/\text{cm} \approx 0.52$  a  $0.64$  ppm de sales). En electrorremediación, los cambios de pH del suelo modifican la conductividad global del medio por lo que se forman perfiles de voltaje. En algunos experimentos con suelos industriales contaminados, la conductividad del suelo se incrementa con el tiempo, debido a la penetración de los frentes ácido y alcalino, así como por la solubilización de las especies iónicas ya sea como resultado de los cambios de pH o por un aumento de temperatura (Hahladakis, Lekkas, & Smponias, 2013).

- **Potencial zeta ( $\zeta$ ).**

Es la medida que determina la carga de un coloide (volts), en función de la superficie cargada y la naturaleza y composición del medio en el que está suspendido; las sales iónicas que pueden solubilizarse totalmente en

medios acuosos no pueden ser clasificadas como coloides ya que se encuentran en la fase continua y por lo tanto su  $\zeta$  es muy pequeño. En la mayoría de los suelos el potencial  $\zeta$  es negativo debido a que la superficie del suelo generalmente tiene carga negativa. Con el incremento de la acidez  $\zeta$  disminuye su negatividad y, en algunos casos, pueda alcanzar valores positivos. Estos cambios afectan la velocidad del flujo electrosmótico, ya que se ha observado que la tasa de flujo decrece cuando el pH del electrolito se acerca a la neutralidad o se incrementa la alcalinidad. En trabajos donde se incluye una descripción del efecto del pH sobre el potencial  $\zeta$  se utilizó kaolinita contaminada artificialmente; sin embargo no todas las arcillas se comportan igual, por ejemplo los suelos illíticos y bentónicos no muestran efectos derivados de los cambios en las concentraciones iónicas del fluido saturado.

- ***Naturaleza y química del suelo.***

La electrorremediación se ha probado exitosamente en ensayos de laboratorio con suelos de granulometría muy fina (limos y arcillas) y baja permeabilidad. También puede ser aplicada en suelos arenosos, siempre y cuando exista un horizonte impermeable debajo del suelo contaminado, el cual impedirá que el electrolito drene a estratos más profundos. En la cinética de remoción del contaminante influyen las siguientes características del suelo: la capacidad de adsorción, intercambio iónico y de amortiguamiento del pH; en el caso de suelos arcillosos y limosos, estos ofrecen mayor superficie de contacto, por lo que los metales y sustancias iónicas (sulfato, nitrato, amonio) pueden ser

adsorbidos con mayor facilidad en sus superficies, lo cual dificulta su remoción. Por otro lado, la mayoría de las arcillas exhiben carga superficial negativa y retienen por atracción iónica la mayoría de los contaminantes metálicos. Un suelo tratado por electrorremediación puede exhibir cambios en su granulometría, contenido de materia orgánica, cantidad de sales solubles, conductividad eléctrica. Un suelo electrorremediado generalmente tiende a acidificarse y a disminuir o perder su contenido de sales inorgánicas como nitrato, fosfato y sulfato, por lo que se pudiera reducir o nulificar su fertilidad. Por esta razón, y dependiendo del uso de suelo, se puede recomendar su regeneración ya sea por fertilización o mejoramiento con materia orgánica o composta (Ibarra, Navarro, Teran, & Vizcarra, 2015).

- ***Naturaleza del contaminante.***

La especie química de los contaminantes es un factor que influye fuertemente sobre la eficiencia de la técnica. Los contaminantes pueden existir como sólidos precipitados, solutos disueltos, adsorbidos a partículas del suelo o sorbidos en materia orgánica. En la actualidad las especies químicas son evaluadas por extracción secuencial o lixiviación selectiva y se ha demostrado que las formas intercambiables migran con mayor rapidez que las absorbidas en la materia orgánica o en la fracción residual (Ibarra, Navarro, Teran, & Vizcarra, 2015).

- ***Naturaleza y arreglo de los electrodos.***

Con la finalidad de evitar introducir contaminantes en el sistema, para la fabricación de los electrodos generalmente se eligen materiales inertes

como titanio con cubierta electro catalítico de varios óxidos; sin embargo, también pueden elegirse materiales reactivos como el hierro o el grafito. La estructura de los electrodos debe ser porosa para establecer un buen contacto con los electrolitos y para poder liberar los gases producidos por la electrólisis del agua. El tamaño, forma y arreglo de los electrodos, así como la distancia entre ellos afectan las tasas de remoción de contaminantes, han modelado arreglos mono dimensionales (un par de electrodos) y arreglos bidimensionales (varios electrodos); sin embargo, al ser la electrorremediación un sistema multivariable, no se han encontrado estrategias universales para aplicarse a gran escala. La principal limitación en la elección del tipo de electrodos es el costo, seguido de la facilidad de fabricación y su robustez, sin embargo los estudios previos a la remediación a gran escala son determinantes en la selección y viabilidad del tipo de material a utilizar (De la Rosa, Teulit Leon, & Ramirez, 2010).

### **2.3. Formulación de hipótesis.**

A medida que se incrementan la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico, aumentará la remoción de plomo por electroremediación del relave de la empresa Minera Paredones.

### **2.4. Definición de términos.**

#### ***Electrocoagulación.***

Es un método alternativo para la depuración de aguas residuales. Consiste en un proceso de desestabilización de los contaminantes del agua ya estén

en suspensión, emulsionados o disueltos, mediante la acción de corriente eléctrica directa de bajo voltaje y por la acción de electrodos metálicos de sacrificio, normalmente aluminio/hierro.

**Remoción.**

Acción de remover o removerse.

Efecto de remover o removerse.

**Relave**

Corresponde al residuo, mezcla de mineral molido con agua y otros compuestos, que queda como resultado de haber extraído los minerales sulfurados en el proceso de flotación.

**2.5. Identificación de variables.**

- Variables independientes:
  - Densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>)
  - Acido Oxálico (mol/L)
- Variable dependiente:
  - Remoción de Plomo. (%)

**2.6. Operacionalización de variables.**

**Tabla N° 3.** Diseño de la información y diseño específico.

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
----------	-----------------------	-------------	-------------

<p>VI: Densidad de Corriente</p>	<p>La densidad de corriente eléctrica se define como una magnitud vectorial que tiene unidades de corriente eléctrica por unidad de superficie, es decir, intensidad por unidad de área. Matemáticamente, la corriente y la densidad de corriente se relacionan.</p>	<p>J: Densidad de corriente.  S: Superficie de estudio.</p>	<p>(mA/cm<sup>2</sup>)</p>
<p>VI: Acido oxálico</p>	<p>El ácido oxálico o ácido etano dioico es un ácido di carboxílico con dos átomos de carbono. Su fórmula molecular es H<sub>2</sub>C<sub>2</sub>O<sub>4</sub> y su fórmula desarrollada HOOC-COOH.</p>	<p>Concentración molar</p>	<p>mol/L</p>
<p>VD: Remoción de Plomo</p>	<p>Es reducir el porcentaje de plomo que existe en esta relavara, mediante el proceso de electroremediacion.</p>	<p>Disminución de plomo</p>	<p>% de reducción de plomo</p>

## CAPITULO III

### METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

#### 3.1. Tipo de investigación.

El tipo de investigación que se pretende desarrollar es: Experimental

#### 3.2. Nivel de investigación.

##### **Factor X: Acido Oxálico (mol/L)**

x<sub>1</sub>: 5

x<sub>2</sub>: 10

x<sub>3</sub>: 15

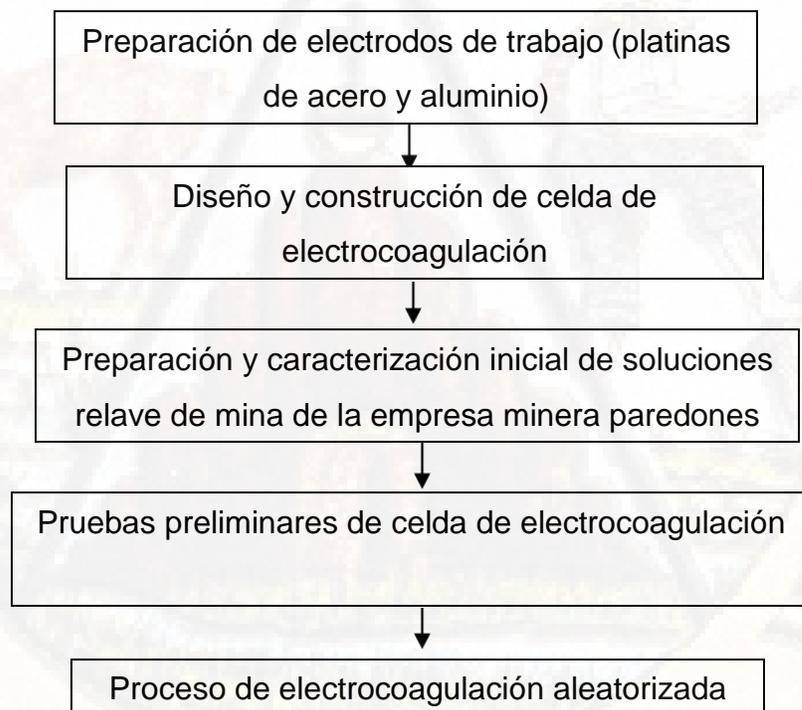
##### **Factor Y: Densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>)**

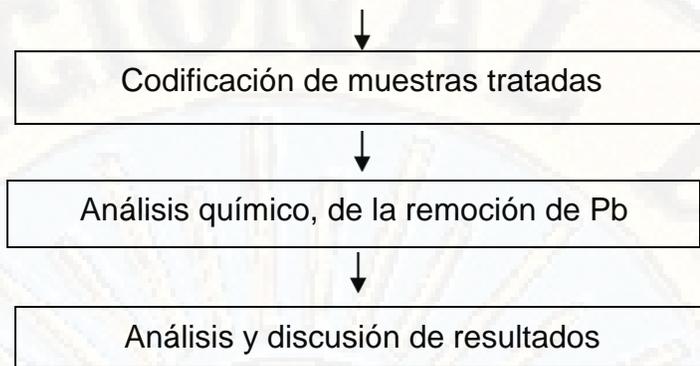
y<sub>1</sub>: 10

y<sub>2</sub>: 20

y<sub>3</sub>: 30

#### 3.3. Métodos de investigación.





**Figura N° 4.** Secuencia experimental a seguir para el proceso de electrocoagulación

### 3.4. Diseño de investigación.

#### **SEGÚN EL PROPOSITO:** APLICADA

Según el propósito es aplicada debido a que va a solucionar un problema práctico como es la descontaminación de un relave minero (Hernandez, Fernandez & Baptista, 1995)

#### **PARA EL ESTUDIO:** CO-RELACIONAL

Es co-relacional, porque mide el grado de relación que existe y cómo se comporta la remoción de plomo del relave de la mina Paredones en función de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico en la electroremediación.

#### **PARA EL DISEÑO:** EXPERIMENTAL / VERDADERO

Es experimental y verdadero, debido a que se manipulará las variables independientes: densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico, para analizar las consecuencias que generan sobre la remoción de plomo del relave de la mina Paredones, en una situación controlada.

### 3.5. Población, muestra y muestreo.

#### 3.5.1. Población

Para la presente investigación se tomó como población a los 6.40 millones de toneladas de relave procedente de la mina paredones ubicada en la ciudad de Cajamarca.

#### 3.5.1. Muestra y muestreo

Como muestra se obtuvo 50 kg de relave procedente de la mina paredones la cual se tomó como técnica de muestreo el No Probabilístico por Conveniencia la cual se realizó por pertenencia de selección de aquellas muestras que acepten ser incluidos. Esto, fundamentado en la conveniente caracterización para el investigador como fue en zonas en donde no permitía la visualización de crecimiento de materia biológica (Otzen & Manterola, 2017).

Para el cálculo del tamaño de muestra y teniendo en cuenta que al cometer un error para aceptar la hipótesis nula es  $\beta \leq 0.05$ , se aplica la siguiente fórmula:

\_\_\_\_\_

Donde:  $r$  es el número de repeticiones,  $a$  es 3, debido a que son los niveles de la variable independiente o renglón (densidad de corriente o concentración de ácido oxálico);  $b$  es 3, debido a que son los niveles de la variable dependiente o columna (remoción de plomo);  $r$  es 3, debido a que es el número de repeticiones;  $D$  es 4, asumiendo que es la diferencia máxima entre dos medidas del factor columna,

con una desviación estándar  $\sigma$  igual a 2. Entonces, reemplazando datos queda lo siguiente:

Los grados de libertad del numerador ( ) y denominador ( ) se determina aplicando la siguiente fórmula:

Entonces, reemplazando datos queda lo siguiente:

Luego, calculando y para determinar cada valor de  $r$  que se va estimando con *curvas características de operación*, para un  $\alpha = 0.05$ .

**Tabla N° 4.** Estimación del valor por prueba y error.

$r$				$\beta$	$P(1-\beta)$
2	4	2,00	$3(3)(2-1) = 9$	0.28	0.72
3	6	2,45	$3(3)(3-1) = 18$	0.05	0.95

Por aproximaciones sucesivas, se decide por  $r = 3$  debido a que, a este valor,  $\beta = 0.05$  hallado, es igual que el  $\alpha = 0.05$ . En consecuencia el tamaño de muestra será:

Reemplazando datos queda  $N = 3*3*3 = 27$  pruebas o muestras para cada una de los datos encontrados para las remociones de plomo, la cual se muestra en la tabla 5.

**Tabla N° 5.** Matriz de diseño experimental para los niveles de las variables de estudio.

Niveles	Factor A: Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )					
	A1=10		A2=20		A3=30	
Factor B: Concentra ción de ácido oxálico (M)	B1 = 5		B1A1		B1A3	
	B1A1		B1A2		B1A3	
	B2 = 10		B2A1		B2A3	
	B2A1		B2A2		B2A3	
	B3 = 15		B3A1		B3A3	
	B3A1		B3A2		B3A3	

La tabla N° 5 servirá para plasmar los resultados que se obtendrán para la remoción de plomo.

### 3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Plantillas para recolección de datos.

### 3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.

Para la comprobación de la hipótesis, el modelo experimental utilizado será bifactorial con 3 niveles por variable independiente con un tamaño muestral de 3 repeticiones para cada nivel. El modelo matricial aplicado a los diferentes niveles, se muestra en la tabla N° 6.

**Tabla N° 6.** Modelo matricial para el experimento bifactorial.

	Y <sub>1</sub>			Y <sub>2</sub>			Y <sub>3</sub>		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
X <sub>1</sub>	M <sub>111</sub>	M <sub>112</sub>	M <sub>113</sub>	M <sub>121</sub>	M <sub>122</sub>	M <sub>123</sub>	M <sub>131</sub>	M <sub>132</sub>	M <sub>133</sub>
X <sub>2</sub>	M <sub>211</sub>	M <sub>212</sub>	M <sub>213</sub>	M <sub>221</sub>	M <sub>222</sub>	M <sub>223</sub>	M <sub>231</sub>	M <sub>232</sub>	M <sub>233</sub>
X <sub>3</sub>	M <sub>311</sub>	M <sub>312</sub>	M <sub>313</sub>	M <sub>321</sub>	M <sub>322</sub>	M <sub>323</sub>	M <sub>331</sub>	M <sub>332</sub>	M <sub>333</sub>

Dónde:

M : Medición a efectuar.

X<sub>1</sub>....X<sub>3</sub> : Concentración de ácido oxálico (mol/L)

Y<sub>1</sub>....Y<sub>3</sub> : Densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>)

Muestras totales: (3 x 3 x 3)+ 3 = 30

### 3.8. Descripción de la prueba de hipótesis.

#### Tratamiento de Datos

Para el análisis estadístico de la variable respuesta: remoción de Pb, se usará el análisis de varianza de los resultados obtenidos.

Se obtendrán la suma de cuadrados mediante las cuales calcularemos los resultados que se mostrarán en la Tabla de Análisis de Varianza que nos permitirá realizar dicho análisis a fin de predecir la influencia de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico evaluando en los datos observados.

$$SS_T = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y^2}{N}$$

$$SS_{Tr} = \sum_{i=1}^K \frac{y_i^2}{n} - \frac{y^2}{N}$$

$$SS_E = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \sum_{i=1}^K \frac{y_i^2}{n}$$

Luego se busca el valor  $F_{\alpha, V_1, V_2}$  de las Tablas de Distribución de Fisher, donde  $\alpha$  es el grado de confiabilidad (0.05),  $V_1$  es el grado de libertad entre grupos y  $V_2$  es el grado de libertad entre niveles.

Si  $F_0 > F_{\alpha, V_1, V_2}$  se acepta la hipótesis alternativa y si  $F_0 < F_{\alpha, V_1, V_2}$  se acepta la hipótesis nula.

## CAPITULO IV

### PRESENTACION DE RESULTADOS

#### 4.1. Remoción de Pb de los relaves de mina

En las siguientes pablas se presentan los valores en porcentaje de la remoción de Pb (plomo), de relaves de mina, tratada por el proceso de electroremediación.

**Tabla N° 7.** Valores de porcentajes de remoción de Pb, en relaves de mina, tratados a diferentes densidades de corriente y al 0 M de ácido oxálico.

Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje de remoción de Pb (%)			Promedio
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	10.66	11.77	11.20	11.21
20	13.38	14.86	13.92	14.05
30	15.66	16.82	17.25	16.58

**Tabla N° 8.** Valores de porcentajes de remoción de Pb, en relaves de mina, tratados a diferentes densidades de corriente y al 5 M de ácido oxálico.

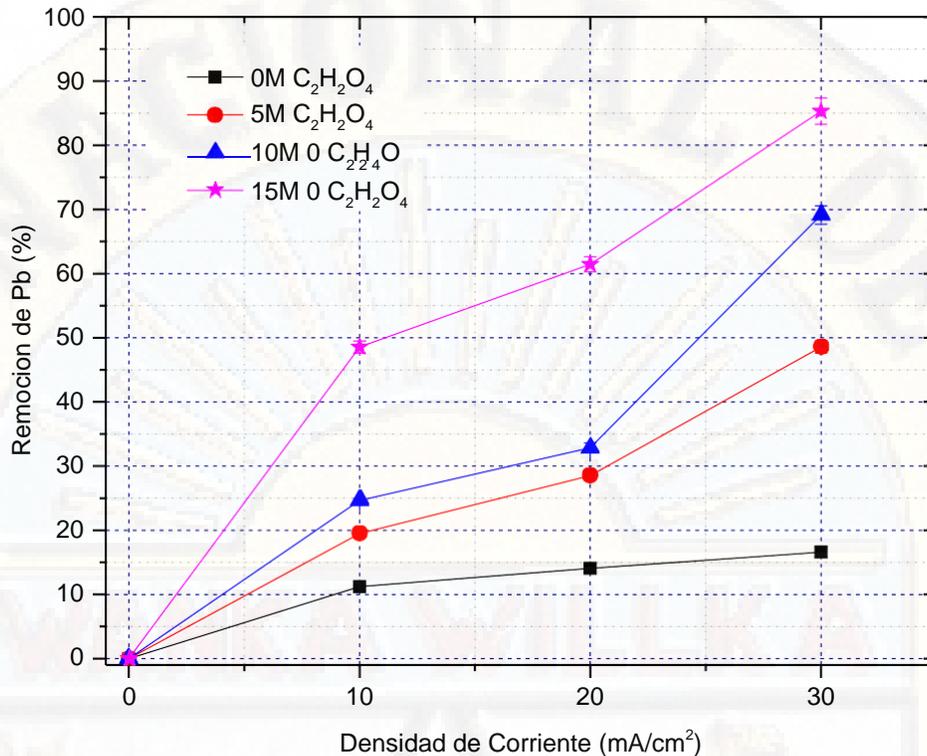
Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje de remoción de Pb (%)			Promedio
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	19.74	18.95	19.74	19.48
20	28.66	27.90	28.95	28.50
30	48.32	49.60	47.77	48.56

**Tabla N° 9.** Valores de porcentajes de remoción de Pb, en relaves de mina, tratados a diferentes densidades de corriente y al 10M de ácido oxálico.

Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje de remoción de Pb			Promedio
	(%)			
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	24.93	24.68	24.37	24.66
20	33.58	32.09	32.93	32.87
30	67.50	69.66	70.21	69.12

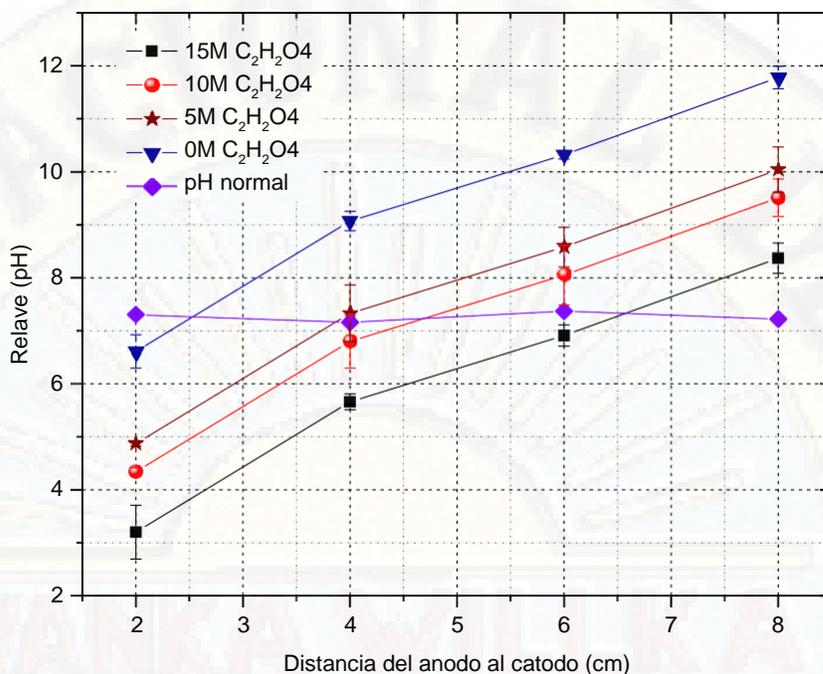
**Tabla N° 10.** Valores de porcentajes de remoción de Pb, en relaves de mina, tratados a diferentes densidades de corriente y al 15M de ácido oxálico.

Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje de remoción de Pb			Promedio
	(%)			
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	48.32	49.60	47.77	48.56
20	61.85	60.14	62.38	61.46
30	83.68	84.68	87.62	85.33



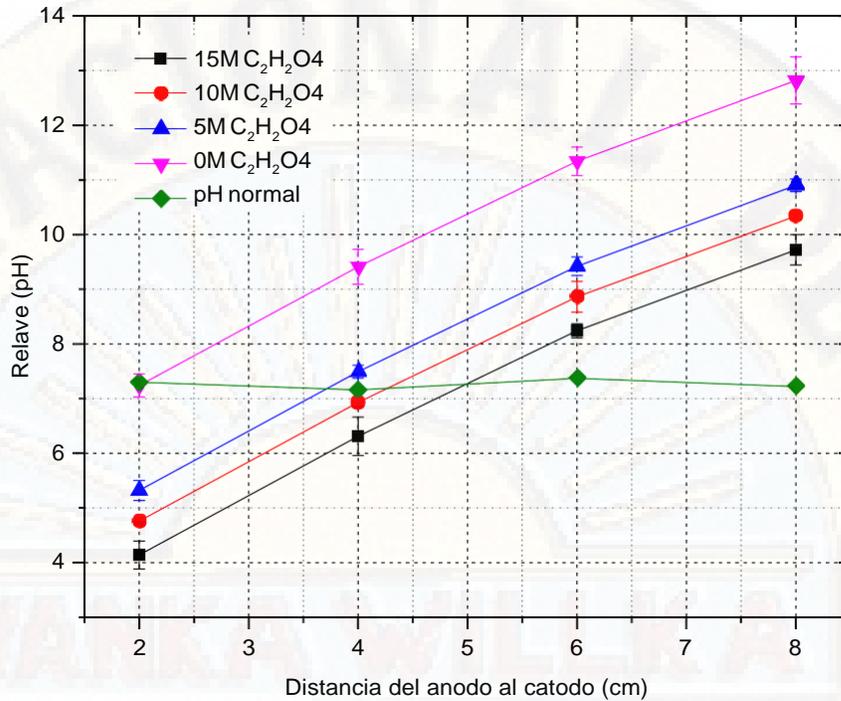
**Figura N° 4.** Grafico representativo de los valores del porcentaje de remoción de Pb, en relaves de mina.

En la gráfica que se presenta en la figura N° 5, se observa una clara tendencia de manera ascendente de la eficiencia de remoción del metal pesado de Pb (plomo), de esta grafica podemos deducir que la densidad de corriente (10, 20 y 30 mA/cm<sup>2</sup>), así como la adición molar de ácido oxálico (5, 10 y 15M de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), tienen una influencia positiva en la remoción de Pb. El valor máximo de remoción o el porcentaje máximo es de 85.33%, obtenido con una densidad de corriente de 30 mA/cm<sup>2</sup> y con adición de 15M de C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, y el porcentaje mínimo es de 16.58% en muestras sin adición de ácido oxálico y una densidad de corriente de 30 mA/cm<sup>2</sup>. Este último porcentaje representa el 414.65% menor con respecto al valor o porcentaje máximo de remoción.



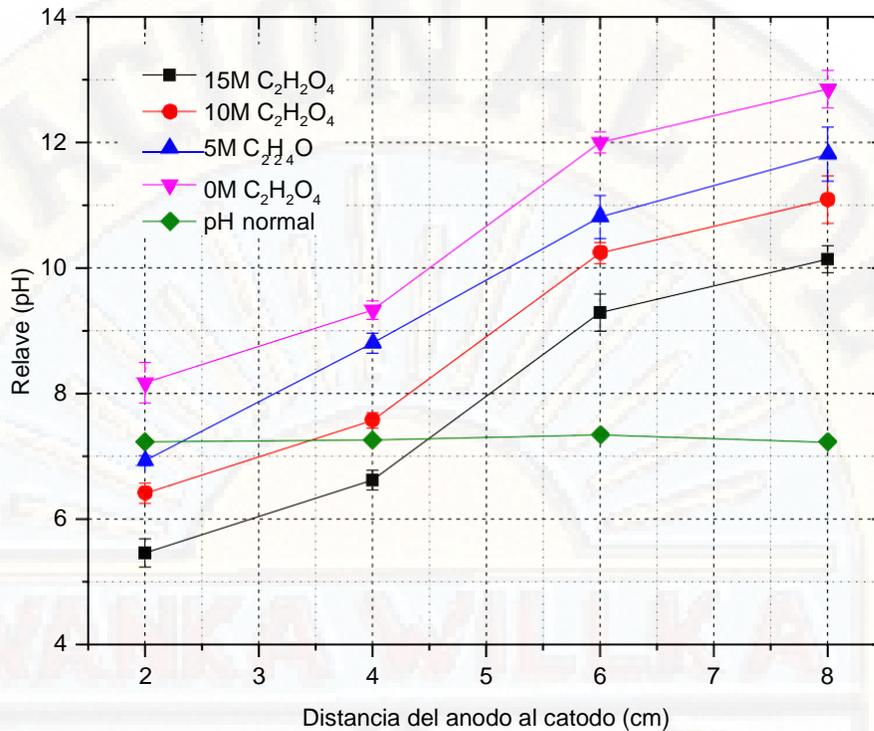
**Figura N° 5.** Medición del pH al final del proceso de electroremediación con densidad de corriente de 10 mA/cm<sup>2</sup>.

Se presenta en la figura N° 6, la representación graficas de los valores promedio de pH, tomados a lo largo o entre las distancia de los dos electrodos (ánodo y cátodo), como se puede apreciar el valor del pH se incrementa del ánodo hacia el cátodo. Los valores más bajos de pH es para la curva de color negro la cual representa a las muestras extraídas, después del proceso de electrorremediación con una concentración de ácido oxálico (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) de 15 M, dicho valor de pH es 3.2 y el pH máximo fue de 11.78, siendo este último un 72.84% mayor con respecto al pH mínimo.



**Figura N° 6.** Medición del pH al final del proceso de electroremediación con densidad de corriente de 20 mA/cm<sup>2</sup>.

En la figura N° 7, la representación grafica de los valores promedio de pH, tomados a lo largo o entre las distancia de los dos electrodos (ánodo y cátodo), como se puede apreciar el valor del pH se incrementa del ánodo hacia el cátodo. Los valores más bajos de pH es para la curva de color negro la cual representa a las muestras extraídas, después del proceso de electroremediación con una concentración de ácido oxálico (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) de 15 M, dicho valor de pH es 4.14 y el pH máximo fue de 12.82, siendo este último un 67.71% mayor con respecto al pH mínimo.



**Figura N° 7.** Medición del pH al final del proceso de electroremediación con densidad de corriente de 30 mA/cm<sup>2</sup>

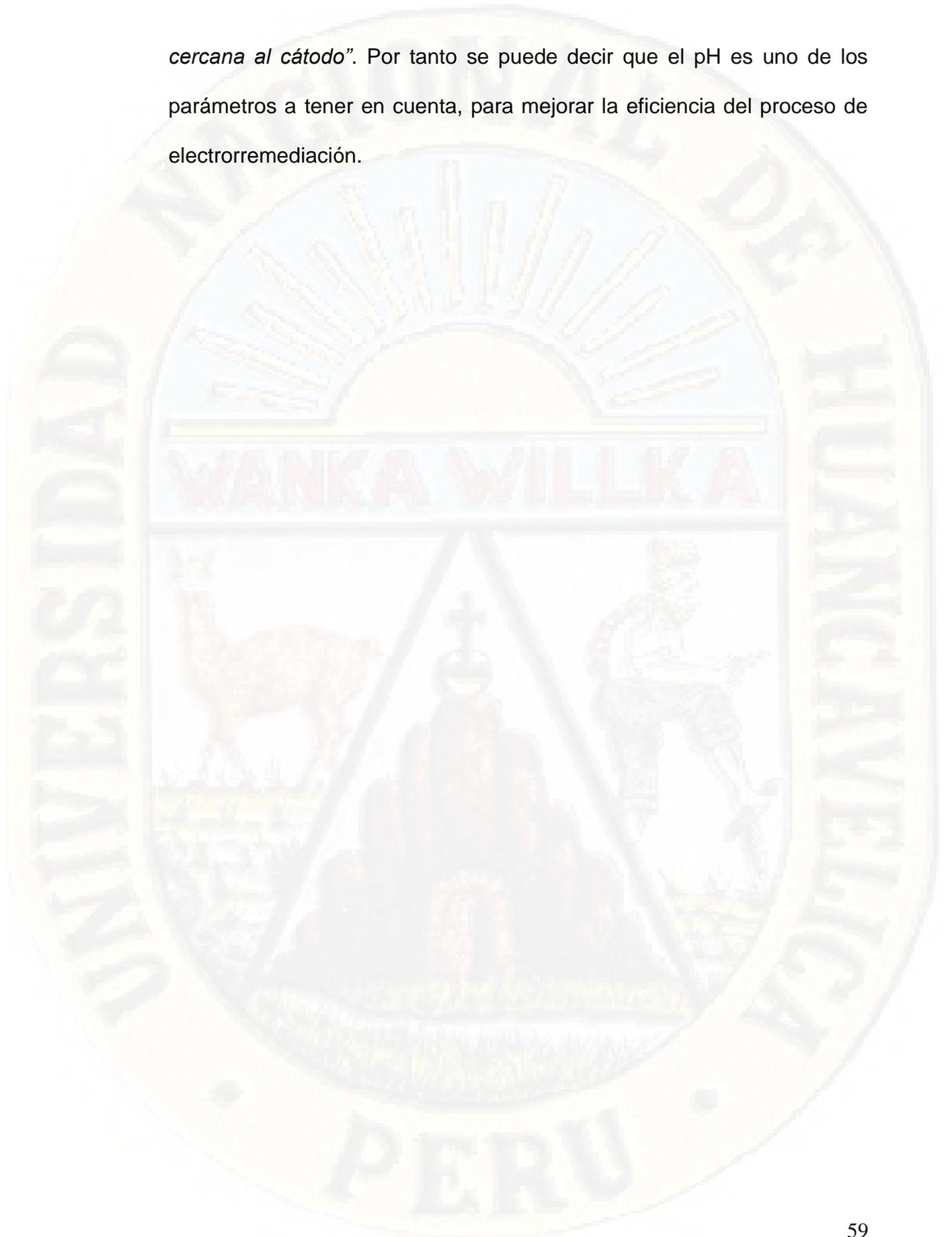
Por último en la presente figura N° 8, se está representando gráficamente los valores promedio de pH, tomados a lo largo o entre las distancias de los dos electrodos (ánodo y cátodo), como se puede apreciar el valor del pH se incrementa del ánodo hacia el cátodo. Los valores más bajos de pH es para la curva de color negro la cual representa a las muestras extraídas, después del proceso de electroremediación con una concentración de ácido oxálico (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) de 15 M, dicho valor de pH es 5.46 y el pH máximo fue de 12.85, siendo este último un 57.51% mayor con respecto al pH mínimo.

#### 4.2. Discusión de resultados.

Podemos decir que la efectividad del proceso se debe a que los suelos, arcillosos tienen la capacidad de retener mayor cantidad de agua, y por teoría se sabe la cantidad de agua es importante para el flujo de electrones, es por ello que en el presente trabajo se vio esto, al obtener buenos resultados en la remoción de Pb, a lo expresado (Hahladakis, Lekkas, & Sponias, 2013), en su artículo publicado en la revista Elsevier, que tiene como título "*Sequential application of chelating agents and innovative surfactants for the enhanced electroremediation of real sediments from toxic metals and PAHs*" expreso lo siguiente; *la capacidad de almacenamiento y retención de agua de la muestra está condicionada a su textura y esta influye mucho sobre las propiedades físicas y químicas, especialmente en la proporción y magnitud de las reacciones de los suelos, ya que define el espacio sobre el cual ocurrirán las reacciones. Las arcillas junto con la materia orgánica determinan la capacidad de intercambio catiónico (CIC). Los suelos arenosos no tienen la misma capacidad de almacenar y retener agua como las arcillas, y poseen una CIC de media a baja, en general son fragmentos de cuarzo (SiO<sub>2</sub>), feldspatos y micas y por eso su inactividad, por ello se podría decir que en el presente trabajo, se tiene un suelo "Arcillo arenoso" (ver Anexo análisis granulométrico), y posee un 51.12% de arcilla, con esto se deduce que la transferencia o capacidad catiónica es de media a alta. Por otro lado en las figuras N° 6, 7 y 8, se expresaron gráficamente los*

valores promedio del pH, de todas las muestras de relave, tratadas con densidades de corriente de 10, 20 y 30 mA/cm<sup>2</sup>, en todas estas gráficas y con diferentes densidades de corriente, el comportamiento del valor del pH se incrementa en todos los caso, desde un estado acido hasta llegar a un estado alcalino, hallando valores mínimos de pH de 3.2 y como máximo 12.85. El valor de pH se incrementa a medida que se disminuye la distancia del ánodo al cátodo, esto se debe que en el ánodo se da la siguiente reacción  $H_2O \rightarrow 2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^-$  y en el cátodos la reacción de hidrólisis que genera iones de hidrógeno en al ánodo  $2H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^- + H_2$ , la generación de iones H<sup>+</sup> es causa de la disminución del pH en esta zona, así mismo (De la Rosa, Teulit Leon, & Ramirez, 2010) hace referencia a los iones producidos en ambos electrodos y con ello al cambio del pH, el expresa que *“debido a la mayor movilidad del ión H<sup>+</sup> sobre el ión – OH<sup>-</sup>, el frente ácido viaja con mayor velocidad y por lo tanto el flujo electro osmótico se dirige preferencialmente hacia el cátodo. En el caso de existir metales adsorbidos, estos son solubilizados por el frente ácido y trasportados hacia el cátodo. Cuando no se aplica lavado en los pozos, el frente alcalino penetrará a una velocidad menor a la del frente ácido y cuando ambos frentes se encuentran se genera una zona en donde el pH cambia bruscamente (zona de transición), dando como resultado una frontera con un marcado cambio de pH (de 2 a 13 en menos de 0.5 cm), en esta zona los contaminantes se acumulan debido a que frecuentemente precipitan como hidróxidos metálicos. Después de un tiempo, se observa que el suelo se acidifica, excepto en la región*

*cercana al cátodo*”. Por tanto se puede decir que el pH es uno de los parámetros a tener en cuenta, para mejorar la eficiencia del proceso de electroremediación.



## CONCLUSIONES

- Se pudo determinar la influencia de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico sobre la remoción de plomo por electroremediación del relave de la empresa minera Paredones. Logrando obtener como resultado un 83.77% de eficiencia máxima en la remoción de metal pesado de Pb, presentes en relaves, dicho porcentaje máximo se obtuvo con una densidad de corriente de  $30 \text{ mA/cm}^2$  y de ácido oxálico al 15M, de esto podemos deducir que tanto la densidad como la cantidad de ácido oxálico, posee o tienen influencia sobre la eficiencia de remoción de Pb.
- Se realizó un análisis químico del contenido de plomo inicial, en las muestras de relave, esta concentración es de  $4637.24 \text{ mg/Kg}$ .
- Se pudo determinar el rango de la densidad de corriente para la máxima remoción de plomo por electroremediación, este rango está entre 20 y  $30 \text{ mA/cm}^2$ , aunque no se descarta que a mayores densidades el proceso aún mejore.
- Así mismo fue posible hallar y determinar la concentración del ácido oxálico para la máxima remoción de plomo por electroremediación. La concentración donde se pudo remover mayor cantidad de Pb, fue de 10M a 15M, aunque se deduce que esto podría no ser cierto y atribuir la remoción directamente o en mayor influencia a la densidad de corriente.

## RECOMENDACIONES.

- Se recomienda realizar estudios con varias concentraciones de ácido oxálico y mantener la mejor densidad de corriente, con el fin de ver si influye significativamente el ácido en el proceso de remoción de Pb.
- Realizar si los mismos parámetros del proceso de electroremediación son eficientes como en el presente trabajo, de no ser así encontrar la causa de ese déficit en la remoción del Pb.
- Investigar si los tipos de electrodos (ánodos y cátodos) tiene alguna influencia sobre el proceso de electroremediación, y ver que metal pesado se puede reducir mejor, o solamente del Pb.
- Se recomienda realizar investigación sobre la eficiencia de remoción de plomo (Pb) u otros metales pesados teniendo en cuenta la mejor densidad de corriente del presente trabajo, y como variable el tipo de electrodos, ya sea de grafito, aluminio y acero inoxidable.

## REFERENCIA

### HEMEROGRAFIA

BENITES Mostacero R, L. C. (2015). Medición de las propiedades geoquímicas y mecánicas del pasivo ambiental relave mina Paredones para su propuesta de utilización como relleno en pasta para labores mineras subterráneas. Cajamarca.

### BIBLIO WEB

DIAMIRE. (2014). Diamire. Obtenido de Diamire:  
<http://www.diamire.com/relaves-mineros/>

GARCIA Hernández, L., & Vargas Ramirez, M. (21 de Febrero de 2011). Artículos académicos Scielo. Obtenido de Scielo web site:  
<http://www.scielo.org.mx/pdf/sv/v24n1/v24n1a6.pdf>

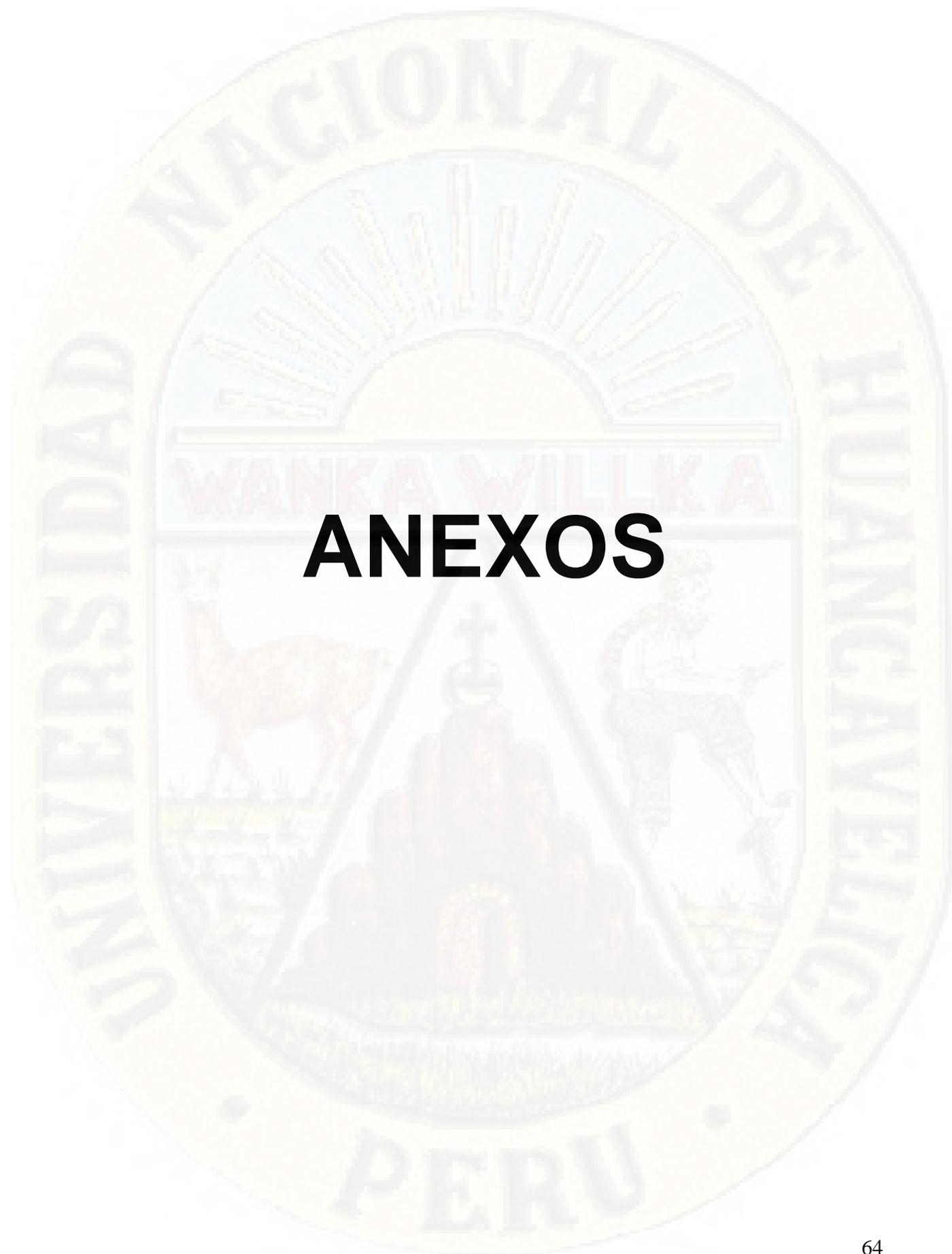
GRUFIDES. (2015). Centro de Documentación Grufides. Obtenido de Grufides web site:  
[http://www.grufides.org/sites/default/files//documentos/documentos/%5BV4.0%5D%20Informe%20-%20Pasivos%20ambientales%20presentes%20en%20la%20Regi%C3%B3n%20Cajamarca\\_2\\_0.pdf](http://www.grufides.org/sites/default/files//documentos/documentos/%5BV4.0%5D%20Informe%20-%20Pasivos%20ambientales%20presentes%20en%20la%20Regi%C3%B3n%20Cajamarca_2_0.pdf)

JORGE F., G. L. (12 de Febrero de 2001). Publicaciones Universidad Técnica Particular de Loja. Obtenido de Universidad Técnica Particular de Loja Web site:  
[http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/1562/3/UTPL\\_Granda\\_Laso\\_Jorge\\_Francisco\\_363X80.pdf](http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/1562/3/UTPL_Granda_Laso_Jorge_Francisco_363X80.pdf)

PEREZ.D, D. I. (Agosto de 2007). Google. Obtenido de Google:  
<http://www.scielo.org.mx/pdf/rca/v23n3/v23n3a3.pdf>

QUIJADA, M. C. (Octubre de 2015). Publicaciones Red de Propuestas y Acción Muqui. Obtenido de Red de Propuestas y Acción Muqui: <http://www.muqui.org/images/PUBLICACIONES/pasivosambientales2015.pdf>





# ANEXOS

## MATRIZ DE CONSISTENCIA

Planteamiento del Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables Indicadoras	Muestras	Diseño	Instrumento	Estadística
<p><b>Pregunta general</b></p> <p>¿Cómo influye la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico sobre la remoción de plomo por electroremediación del relave de la empresa minera Paredones?</p>	<p><b>Objetivo general</b></p> <p>Determinar la influencia de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico sobre la remoción de plomo por electroremediación del relave de la empresa minera Paredones.</p>	<p><b>Hipótesis General</b></p> <p>A medida que se incrementan la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico, aumentará la remoción de plomo por electroremediación del relave de la empresa Minera Paredones</p>	<p><b>Variable independiente 1</b></p> <p>Densidad de corriente (A/dm<sup>2</sup>)</p> <p><b>Variable independiente 2</b></p> <p>Concentración de ácido oxálico (mg/l)</p> <p><b>Variable Dependiente 1</b></p> <p>Remoción de plomo (%)</p>	<p><b>Población:</b></p> <p>6.40 millones de toneladas de relave minero, Mina Paredones.</p> <p><b>Muestra:</b></p> <p>50 kilogramos de relave minero- Mina Paredones..</p>	<p><b>Método</b></p> <p>Experimental</p> <p><b>Diseño de investigación</b></p> <p>Correlacional</p>	<p><b>Técnicas:</b></p> <p>Muestreo en campo y posterior análisis de concentraciones de plomo, en función de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico en la electroremediación.</p> <p><b>Instrumentos:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Equipo de Electroremediación.</li> <li>➤ Equipo de espectrofotometría.</li> <li>➤ GPS</li> </ul>	<p>Análisis de Varianza:</p> <p><math>F_{0A} = \text{---}</math></p> <p><math>F_{0B} = \text{---}</math></p> <p><math>F_{0AB} = \text{---}</math></p>
<p><b>Preguntas específicas</b></p>	<p><b>Objetivos Específicos</b></p> <p>a) Determinar el rango de la densidad de corriente para la</p>	<p><b>Hipótesis Específicos</b></p> <p>a) La densidad de corriente afecta la</p>					

	<p>máxima remoción de plomo por electroremediación.</p> <p>b) Determinar la concentración de ácido oxálico para la máxima remoción de plomo por electroremediación</p> <p>c) Determinar la interacción de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico en la remoción de plomo.</p>	<p>remoción de plomo.</p> <p>b) La concentración de ácido oxálico afecta la remoción de plomo.</p> <p>c) La interacción de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico afecta la remoción de plomo.</p>				<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ pH metro</li> <li>➤ Conductímetro</li> <li>➤ Balanza analítica</li> <li>➤ Fuente de poder</li> <li>➤ Electrodo de referencia</li> </ul>	
--	---	--	--	--	--	--	--

## INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y BASE DE DATOS

**Tabla N° 11.** Ficha de reporte de análisis químico, del relave de mina.

Tipo de Muestra				
Análisis de Laboratorio				
Acido Oxálico	Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )			
(M)	0	10	20	30
0				
5				
10				
15				

**Nota:** Concentración promedio de Pb inicial es de 4637.24 mg/Kg

**Tabla N° 12.** Llenado de la ficha reporte.

<b>Tipo de Muestra</b>	<b>Relaves de mina, tratadas por electroremediación</b>			
<b>Análisis de Laboratorio</b>	<b>Reducción de Pb</b>			
<b>Acido Oxálico (M)</b>	<b>Densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>)</b>			
	<b>0</b>	<b>10</b>	<b>20</b>	<b>30</b>
0	4638.30	4143.86	4017.70	3911.94
	4641.80	4092.37	3949.05	3858.14
	4628.50	4118.81	3992.65	3838.19
5	4618.11	3722.70	3308.96	2397.07
	4637.33	3759.34	3344.21	2337.70
	4666.82	3722.70	3295.51	2422.58
10	4637.91	3481.97	3080.76	1507.45
	4644.70	3493.57	3149.87	1407.26
	4621.32	3507.95	3110.91	1381.75
15	4652.10	2397.07	1769.51	756.97
	4655.93	2337.70	1848.83	927.66
	4670.00	2422.58	1744.93	574.22

**Cálculos del porcentaje de remoción**

Los cálculos del porcentaje de remoción de Pb, se realizó con la siguiente formula:

\_\_\_\_\_

Donde

Mi: Cantidad inicial de Pb presente en el relave.

Mf: Cantidad final de Pb presente en el relave, después del proceso de electroremediación.

**Tabla N° 13.** Tabla resumen de los valores porcentuales de la remoción del Pb.

Acido Oxálico (mol/L)	Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )			
	0	10	20	30
0	0	10.66	13.38	15.66
	0	11.77	14.86	16.82
	0	11.2	13.92	17.25
5	0	19.74	28.66	48.32
	0	18.95	27.9	49.6
	0	19.74	28.95	47.77
10	0	24.93	33.58	67.5
	0	24.68	32.09	69.66
	0	24.37	32.93	70.21
15	0	48.32	61.85	83.68
	0	49.6	60.14	80
	0	47.77	62.38	87.62

**Tabla N° 14.** Ficha de reporte de medición de pH, del relave de mina.

Molaridad (mol/L)	Distancia (A-->C)	Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )			pH normal
		10	20	30	
0M	2				
	4				
	6				
	8				
5M	2				
	4				
	6				
	8				
10M	2				
	4				
	6				
	8				
15M	2				
	4				
	6				
	8				

**Tabla N° 15.** Valores de pH, después del proceso de electroremediación, con respecto a la distancia entre los electrodos.

Molaridad (mol/L)	Distancia (A-->C)	Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )			pH normal
		10	20	30	
0M	2	6.61	7.24	8.17	7.3
	4	9.07	9.41	9.33	7.26
	6	10.32	11.34	12	7.31
	8	11.78	12.82	12.85	7.14
5M	2	4.87	5.32	6.93	7.21
	4	7.33	7.49	8.09	7.3
	6	8.58	9.42	10.76	7.11
	8	10.04	10.9	11.61	7.15
10M	2	4.34	4.76	6.41	7.31
	4	6.8	6.93	7.57	7.25
	6	8.05	8.86	10.24	7.06
	8	9.51	10.34	11.09	7.18
15M	2	3.2	4.14	5.46	7.22
	4	5.66	6.31	6.62	7.23
	6	6.91	8.24	9.29	7.38
	8	8.37	9.72	10.14	7.66

**Tabla N° 16.** Valores de pH de las muestras de relave.

Ácido Oxálico	Distancia (cm)	Valores de pH del ánodo hacia el cátodo								
		10 mA/cm <sup>2</sup>			20 mA/cm <sup>2</sup>			30 mA/cm <sup>2</sup>		
0 mol/l	2	2.67	3.25	3.68	4.36	3.86	4.2	5.27	5.71	5.4
	4	5.72	5.77	5.49	6.68	6.27	5.98	6.72	6.7	6.44
	6	6.93	7.1	6.7	8.37	8.24	8.11	9.14	9.1	9.63
	8	8.06	8.42	8.63	10.03	9.5	9.63	10.13	10.36	9.93
5 mol/l	2	4.38	4.25	4.39	4.77	4.82	4.69	6.26	6.58	6.39
	4	7.36	6.38	6.66	7.01	6.9	6.88	7.71	7.48	7.52
	6	7.4	8.35	8.4	9.17	8.79	8.62	10.11	10.18	10.43
	8	9.79	9.11	9.63	10.41	10.28	10.33	10.66	11.25	11.36
10 mol/l	2	4.88	4.82	4.91	5.12	5.48	5.36	6.88	6.89	7.02
	4	6.72	7.55	7.72	7.39	7.62	7.46	8.98	8.67	8.76
	6	8.18	8.92	8.64	9.26	9.6	9.4	11.09	10.92	10.43
	8	9.55	10.35	10.22	10.86	10.81	11.03	12.22	11.86	11.36
15 mol/l	2	6.84	6.25	6.74	7.09	7.15	7.48	7.83	8.21	8.47
	4	8.87	9.11	9.23	9.77	9.16	9.3	9.49	9.3	9.2
	6	10.28	10.41	10.27	11.64	11.2	11.18	11.94	11.87	12.19
	8	12.02	11.62	11.7	13.28	12.76	12.42	13.18	12.77	12.6

**Tabla N° 17.** Distribución Porcentual del tamaño de partícula del relave (suelo).

Tamaño de partículas ( $\mu\text{m}$ )	Porcentaje	
1700 >	1.38	23.95 % Arena gruesa
850 >	3.8	
600 >	4.38	
425 >	7.68	
300 >	6.71	
212 >	6.33	22.81 % Arena Fina
150 >	2.81	
106 >	3.39	
75 >	3.22	
53 >	2.99	
37 >	2.69	2.11 % Limo
25 >	1.38	
20-may	2.11	51.129% Arcilla
2 <	51.129	

Para la deducción del tipo de suelo que se está trabajando se procede a intersectar cada uno de estos porcentajes en el esquema o Triángulo textural de USDA

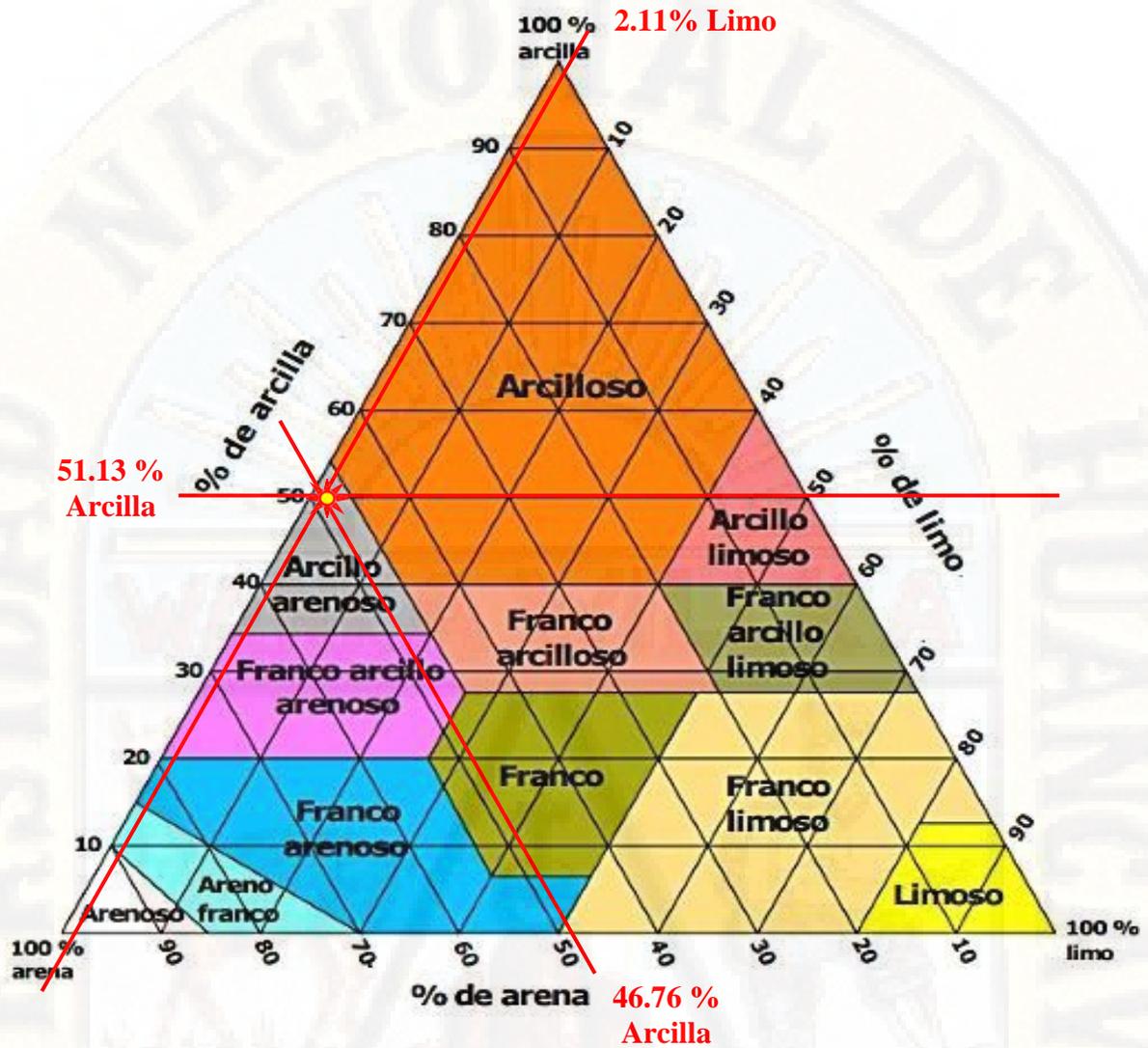


Figura N° 8. Triángulo textural de USDA

Por lo tanto podemos afirmar que estamos trabajando un relave con características de un suelo “Arcillo arenoso”.

## **TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.**

Calculo para el análisis de varianza (ANAVA) para proceso de electrocoagulación y remoción de Pb.

Permite determinar si las medidas de cada nivel o tratamiento son estadísticamente diferentes. Para su determinación se procedió como se indica a continuación.

### **Datos previos:**

#### **Planteamiento de hipótesis alterna**

**H1:** A medida que se incrementan la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico, aumentará la remoción de plomo por electroremediación del relave de la empresa Minera Paredones.

#### **Nivel de significancia**

En ingeniería se trabaja con un 95% de confianza ( $\alpha = 0.05$ )

#### **Criterio de rechazo**

Se rechaza la hipótesis si  $F_o > F_{\text{tabular}}$ , donde el  $F_o$  se obtiene experimentalmente y el  $F_{\text{tabular}}$  se obtiene de tablas.

**Tabla N° 18.** Cuadro resumen del análisis de varianza para un diseño bifactorial.

Factor de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	F <sub>o</sub>	F <sub>.05;V<sub>1</sub>;V<sub>2</sub></sub>
<b>A</b>	a - 1	SS <sub>A</sub>	MS <sub>A</sub>		
<b>B</b>	b - 1	SS <sub>B</sub>	MS <sub>B</sub>		
<b>Error</b>	a(n-1)	SS <sub>E</sub>	MS <sub>E</sub>		
<b>Total</b>	N - 1	SS <sub>T</sub>			

**Tabla N° 19.** Datos obtenidos del proceso de electrocoagulación y remoción de plomo (Pb).

Electrocoagulación de DAM			A Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )			SUMA B
			10	20	30	
			a1	a2	a3	
B (Ácido Oxálico (mol/L))	5	b1	3722.69	3308.96322	2397.07344	
			3759.34	3344.2143	2337.7032	
			3722.69	3295.51215	2422.58409	
		<b>SUMA</b>	<b>11204.74</b>	<b>9948.69</b>	<b>7157.36</b>	<b>6341.20</b>
	10	b2	3481.97	3080.76	1507.45	
			3493.57	3149.87	1407.26	
			3507.95	3110.91	1381.75	
		<b>SUMA</b>	<b>10483.48</b>	<b>9341.54</b>	<b>4296.46</b>	<b>5194.56</b>
	15	b3	2397.07	1769.51	756.97	
			2337.70	1848.83	927.66	
			2422.58	1744.93	574.22	
		<b>SUMA</b>	<b>7157.36</b>	<b>5363.27</b>	<b>2258.85</b>	<b>4224.61</b>

<b>SUMA A</b>	<b>28845.59</b>	<b>24653.49</b>	<b>13712.67</b>	<b>67211.7499</b> 8
---------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------------

**Grados de libertad**

a (niveles) = 3

b (niveles) = 3

r (número de repeticiones) = 3

**Grados de libertad de A:**

$$(a-1) = 3-1 = 2$$

**Grados de libertad de B:**

$$(b-1) = 3-1 = 2$$

**Grados de libertad del error:**

$$a*b (r-1) = 3*3*(3-1) = 18$$

**Suma de cuadrados para el factor A (Densidad de corriente (mA/cm<sup>2</sup>))**

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_i^2}{bxn} - \frac{Y_T^2}{axbxn} = 13565905.38$$

**Suma de cuadrados para el factor B (Ácido Oxálico (mol/L))**

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_j^2}{axn} - \frac{Y_T^2}{axbxn} = 10663685.13$$

**Calculo de la suma de cuadrados subtotales**

$$SS_{sub} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n \frac{Y_{ij}^2}{axn} - \frac{Y_T^2}{axbxn} = 24845675.9667$$

**Calculo de la suma de cuadrados de la interacción de factores AxB**

$$SS_{AxB} = 616085.4567$$



Para el factor AxB:

$$\text{---} = 30.90790841$$

Tabla N°20. Análisis de Varianza de los resultados experimentales.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F <sub>o</sub> (observado)	F <sub>TABULAR</sub>
A	2	13565905.38	6782952.692	1361.15455	3.554557146
B	2	10663685.13	5331842.564	1069.956123	3.554557146
A x B	4	616085.4567	154021.3642	30.90790841	2.927744173
Error	18	89698.22603	4983.234779		
Total	26	24935374.19			

Se puede concluir que en los valores de remoción de Pb, en el proceso de electrocoagulación, la variable de mayor influencia en este proceso, es la densidad de corriente ya que su valor de F<sub>o</sub>(A) es menor en comparación del valor de F<sub>o</sub>(B).

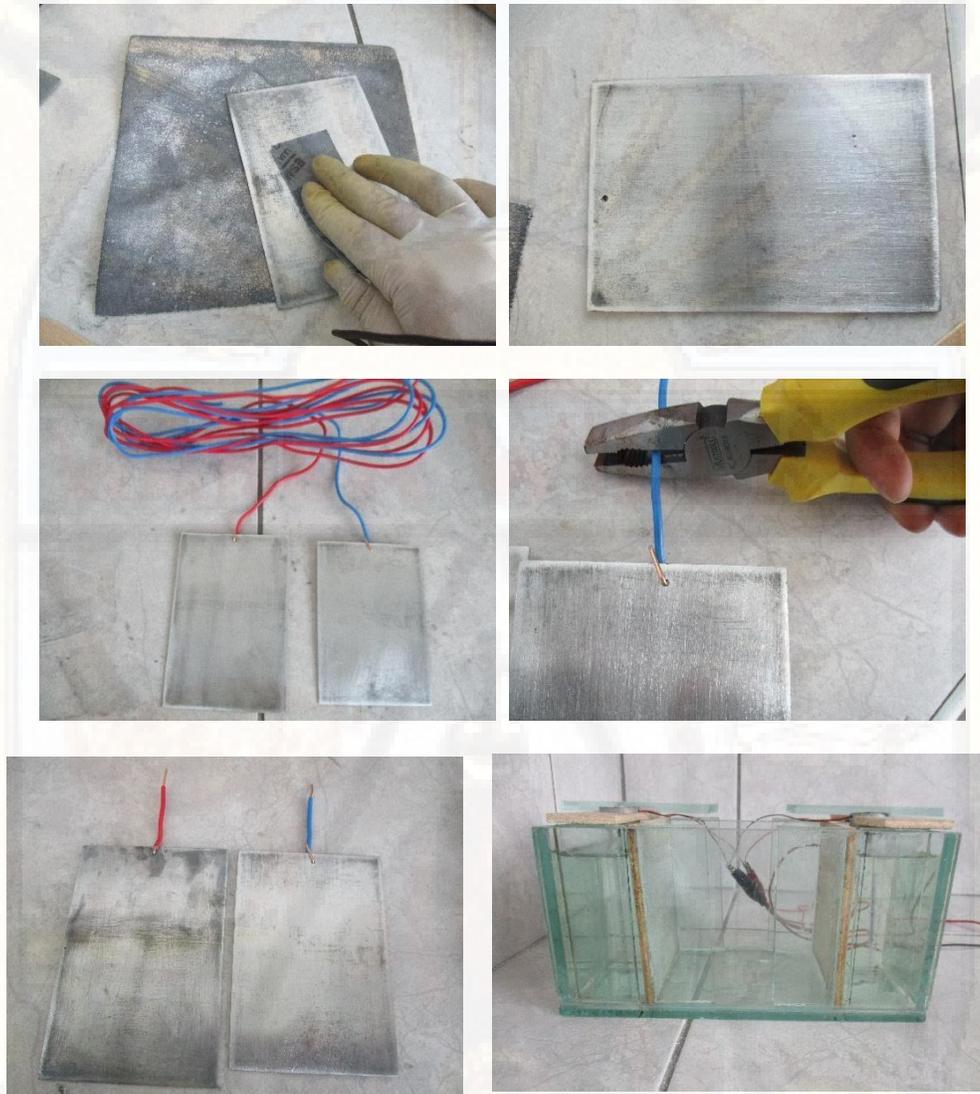
## Registro Fotográfico

### Construcción de la celda para el proceso de electroremediación



Figura N° 9. Medición, corte y montaje de placas de madera dentro de la celda.

## Preparación de Placas de acero (Ánodo y Cátodo)



**Figura N° 10.** Lijado de la superficie de placas metálicas, conexión con alambre N° 8 (ánodo y cátodo).

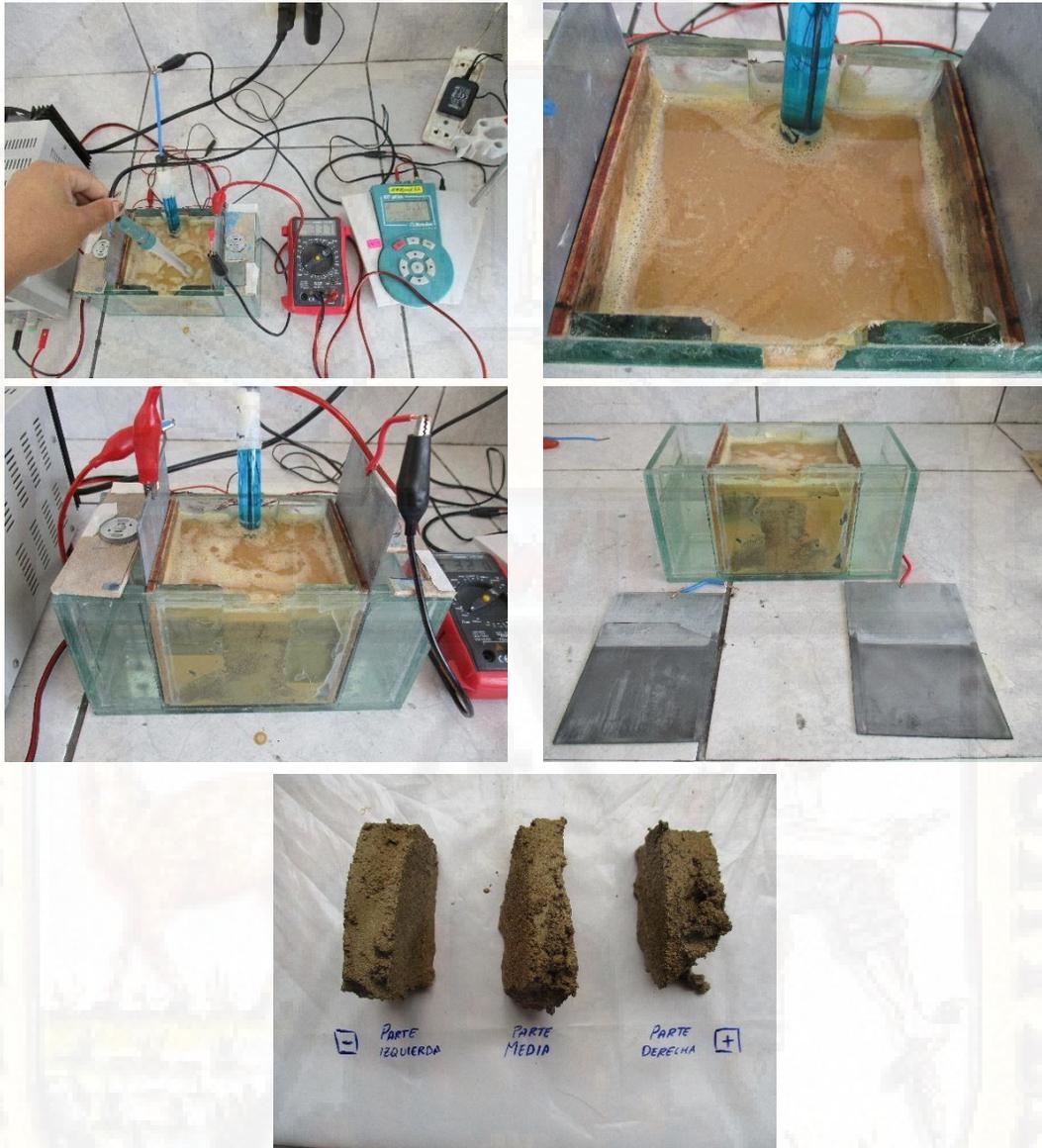
## Preparación del relave



**Figura N° 11.** Homogenización y secado del relave de mina.

NOTA. Esto con la finalidad de poder mezclar con el ácido oxálico.

## Proceso de electroremediación



**Figura N° 12.** Proceso de electroremediación y extracción de muestras.

## Análisis Granulométrico.



**Figura N° 13.** Proceso de análisis granulométrico al relave de mina.