

# FACULTAD DE INGENIERÍA



Carrera de Ingeniería de Minas

“APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELECTRÓLISIS  
PARA LA RECUPERACIÓN DE PLOMO EN  
DRENAJES DE LA MINA ALGAMARCA -  
CAJAMARCA 2022”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Octavio Chilon Chuquimango  
Abelardo Villalta Chambi

Asesor:

Mg. Ing. Oscar Arturo Vásquez Mendoza

Cajamarca - Perú

2022

## DEDICATORIA

Dedico a Dios por que supo guiarme por el mejor sendero, dándome las fuerzas y la esperanza para seguir adelante y no desfallecer en las vicisitudes que se presentaban, enseñándome a confrontar con valentía y optimismo cada adversidad que se me presentaba sin perder la integridad y los valores en el intento de ser el profesional que él deseaba para mí. También a mi esposa e hija que gracias a ellas soy mejor persona cada día, por su comprensión y apoyo incondicional, que a pesar de las dificultades supimos salir adelante en los momentos más difíciles, con un solo fin de conseguir nuestros objetivos en la vida.

Gracias también a mis familiares y queridos compañeros por su apoyo y consejos de superación durante mi vida universitaria.

Abelardo Villalta Chambi

Dedico de una manera especial a Dios todopoderoso por haberme guiado y dado fuerzas en todo tiempo de mi desarrollo profesional, así mismo, también a mis padres, esposa y mi hijo Joaquín Chilon Ayay la cual amo infinitamente y por su apoyo incondicional y comprensión a pesar de las dificultades, así salir adelante y cumplir con mi objetivo planteado para el bienestar de mi familia.

Octavio Chilon Chuquimango

## **AGRADECIMIENTO**

A mi Alma Mater la Universidad Privada del Norte donde me estoy formando como profesional y a todos los docentes que con su sabiduría y enseñanzas contribuyeron en mi formación académica profesional y que me sirvieron como motivación para alcanzar las metas que me propuse desde un inicio, también doy gracias al Ing. Oscar Vásquez por su apoyo constante para el desarrollo de la presente investigación.

Abelardo; Octavio

## Tabla de contenidos

<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>6</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS.....</b>	<b>25</b>
<b>CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>34</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>37</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>39</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables de estudio.....	21
Tabla 2. Matriz de diseño experimental.....	21
Tabla 3. Densidad de corriente durante el método de electrólisis.....	25
Tabla 4. Resultados del análisis de características físico químicas para el plomo (pb).....	26
Tabla 5. Resultados después de la aplicación de electrolisis.....	27
Tabla 6. Cálculo de remoción de Plomo en función al tiempo.....	28
Tabla 7. Análisis de retención en función al tiempo y densidad de corriente.....	29
Tabla 8. Sumatoria de ejes.....	30
Tabla 9. Consideración para los cálculos del proceso de electrolisis.....	31
Tabla 10. Cálculos con sumatoria de cuadrados.....	31
Tabla 11. Tratamiento para la remoción de plomo.....	32
Tabla 12. Resultados de la remoción de plomo por electrolisis.....	33
Tabla 13. Resultados de remoción según tabla de Fisher.....	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Método donde se basa el tratamiento de las aguas ácidas.....	13
Figura 2. Esquematización de la migración de dichas especies cargadas durante el proceso de electrólisis.....	13
Figura 3. Sistema experimental de electrólisis.....	14
Figura 4: electrodo a utilizar para el proceso de electrólisis.....	23
Figura 5: Porcentaje de remoción del Plomo en función a la densidad de corriente y tiempo de retención.....	29

## RESUMEN

La presente tesis titula Aplicación del método de electrólisis para la recuperación de plomo en drenajes de la mina Algamarca, Cajamarca 2022. Tiene como objetivo principal. Aplicar el proceso de electrólisis para la recuperación de plomo en drenajes de la mina Algamarca – Cajamarca, 2022.

En el cual se realizó mediante el análisis de muestras en el laboratorio para determinar las propiedades físico químicas y posteriormente se aplicó el método de electrólisis para ver el porcentaje de recuperación de plomo en función a la densidad de corriente y tiempo de retención.

De acuerdo al análisis de propiedades físico químicas se determinó que para el caso dicha investigación se utilizó para hacer la remoción del plomo(pb) un 97.55%,siendo la muestra inicial de 0.386 mg/L de plomo(pb) y la final de 0.004 mg/L de plomo(pb).

Se determinó que los valores promedios en la remoción de plomo(pb), fue influenciadospor el tiempo de retención a diferencia de la densidad de corriente los cuales son para 1.8v una densidad de corriente de 10.21; para 2.4 v densidad de corriente de 20.07 y finalmente para 3.6 v densidad de corriente igual a 40.12. De la misma forma se determinó el porcentaje de remoción en función al tiempo para la remoción del Plomo por electrólisis el cual concluye que se tiene los tiempos en minutos de 15, 30 y 60.

Palabras clave: Electrólisis, remoción de plomo, drenajes ácidos.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad problemática

En la actualidad las malas prácticas mineras y el manejo inadecuado de sus residuos por parte de la minería informal tal es el caso de Algamarca, como también la inexistencia de normas técnicas precisas que regulen el cierre de minas, ha provocado la acumulación de pasivos ambientales mineros a lo largo de estos tiempos, asimismo, provocando contaminación de recursos naturales (suelos, agua y aire) cuyo uso puede poner en riesgo la salud pública. En las últimas décadas se ha incrementado el interés por desarrollar nuevas tecnologías que ayuden a solucionar los problemas de las aguas contaminadas, principalmente los que están ligados a la actividad minera (drenaje ácido), la mayoría de estas se han orientado hacia los procesos de remediación in situ, dentro de los cuales se propone el electro remediación (electrolisis) por su capacidad de remover contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos.

(Alilo et al. 2012), evaluó el tratamiento por electrocoagulación de agua subterránea contaminada con arsénico. Se realizó en un proceso batch, utilizo placas de aluminio como ánodo y de hierro como cátodo, con una separación de placas de 1.0 cm; con una superficie activa de aluminio de 13.36 cm<sup>2</sup>. La remoción más alta de 99% de arsénico fue a un pH entre 5-8 con 2-5 mg/L de concentración inicial de arsénico en un tiempo de proceso de 12 min a 3 voltios, reduciéndose la concentración de arsénico a valores de 0.010 mg/L y en general la eficiencia de remoción para bajas concentraciones de arseniato es mucho más que en concentraciones altas (>5mg/L). Los resultados experimentales determinaron la posibilidad de remover arsénico por el mecanismo de adsorción con hidróxido de aluminio generado por electrocoagulación.

Según (EM, 2012). Con el fin de proteger el medio ambiente de las descargas de agua contaminada proveniente de la extracción y refinación de los minerales pesados que se realizan es necesario que las empresas implementen un programa eficaz de monitoreo de la calidad del agua. Este programa debe incluir tanto el monitoreo de las descargas de aguas ácidas en el medio ambiente como el monitoreo de las aguas receptoras

Ait [et al.], (2012, p. 98 - 101), planteó en su investigación titulada “Integración de electrocoagulación y adsorción para el tratamiento de aguas residuales de curtiduría - El caso de una fábrica argelina, Rouiba”, la remoción de cromo (VI), DQO, disminución de la turbidez para lo cual, en primer lugar, se caracterizó la calidad de agua residual de acuerdo a los parámetros contaminantes descritos anteriormente a través de métodos de laboratorio ya estandarizados. La electrocoagulación tuvo parte en una celda de vidrio con capacidad de 800 ml, pero siendo el volumen óptimo para el proceso de 500 ml y los electrodos utilizados fueron de placas de aluminio. El efluente de curtiembre con 1920 mg/l de DQO, se sometió al proceso de electrocoagulación con una corriente de 1,5 A y la duración del proceso de electrolisis fue de 2 horas con treinta minutos, logrando remover un 50% de DQO. Así mismo el autor concluyó que la combinación de ambos métodos de adsorción y electrocoagulación mejoró significativamente el proceso de remoción de cromo, DQO y turbidez obteniendo 92%, 75% y 96.1%, respectivamente por debajo de 50 mg/L de cromo cumpliendo los estándares de la American Protección Agency (APA).

(Barboza G, 2011, p. 04), en la tesis titulada “Reducción de la carga de contaminantes de las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá – Ayacucho empleando la técnica de electrocoagulación”. Planteó como metodología, caracterizar la calidad

de agua de la PTAR y luego se aplicó el tratamiento por electrocoagulación utilizando electrodos de aluminio. Obteniendo la remoción de 94,65% de turbidez, 65,1% de coliformes fecales y 64,8% de DBO5, mediante 12,5 mA/cm<sup>2</sup> y 21 – 23 V, con pH ajustado a 7,33 – 7,34 y con 25 minutos de tratamiento. Se concluye que se puede obtener remoción de coliformes fecales hasta en un 93% con un tiempo de 45 minutos, del mismo modo concluyó, que el electrodo de aluminio es óptimo en utilizar la totalidad de sus iones mediante el proceso de electrocoagulación.

Castillo y Oliden, (2017) en la tesis titulada “Influencia de la distancia entre electrodos y densidad de corriente en la disminución de carga contaminante de residuos líquidos de pelambre por electrocoagulación”, emplearon la electrocoagulación para disminuir la concentración de sulfuro y DQO, usando un reactor hecho de acrílico con electrodos de aluminio. Las variables electroquímicas fueron la distancia entre electrodos, con rangos de 1.0 y 1.5 cm y la densidad de corriente con intervalos de 60,80 y 100 A/m<sup>2</sup>. Los datos obtenidos con el tratamiento revelan que la máxima remoción de sulfuro y DQO a una distancia entre electrodos de 1.0 cm y con densidad de corriente de 80 y 100 A/m<sup>2</sup>, respectivamente, fue de 54.8% y 34,36%. Sin embargo, con una distancia entre electrodos de 1.5 cm, el porcentaje mayor de remoción es de 46,47% para sulfuro y 36.45% para la DQO con densidades de corriente de 60 y 100 A/m<sup>2</sup>. Se concluyó con la investigación que no existe relación de remoción entre la densidad de corriente y la distancia entre electrodos para ambos contaminantes.

(Deghles y Kurt 2016, p.43 - 50), en su artículo de investigación “Tratamiento de aguas residuales de curtiduría mediante un proceso híbrido de electrocoagulación/ electrodiálisis” tuvo como objetivo principal evaluar el rendimiento de un proceso

híbrido de electrocoagulación / electrodiálisis para eliminar DQO, NH<sup>3</sup>-N, Cr y color

de las aguas residuales. Las variables de estudio fueron la densidad de corriente y el tiempo de electrolisis, utilizando en el proceso electrodos de aluminio y hierro. La metodología de investigación, fue una integración del proceso de electrocoagulación (EC) y electrodiálisis (ED). Obteniendo como resultados con el proceso de ED remoción al 92% de DQO, 100% de NH<sub>3</sub>-N, 100% de Cr y 100% de color, trabajando a condiciones de conductividad de 0,371 mS/cm a 45 minutos. En el caso de la EC, trabajando con electrodos de hierro, con un valor de conductividad de 1,5 mS/cm a 75 minutos, se obtuvo un 87% de DQO, 100% de NH<sub>3</sub>-N, 100% de Cr y 100% de color. La investigación, concluyó que la integración de las técnicas de EC – ED, remueve porcentajes similares para el mismo parámetro.

Mayta y Mayta (2017), en la tesis titulada “Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación”, planteó analizar la influencia del tiempo de residencia, voltaje y diluciones en la remoción de cromo y DQO de aguas residuales de curtiduría por el método de electrocoagulación, empleando intervalos de tiempo de 15 a 45 minutos, voltajes de 5 a 10 voltios y diluciones de 0 a 2. El reactor de tratamiento fue de tipo batch, de operación discontinua construido a base de material de acrílico y tuvo una capacidad de 1,3 litros. Asimismo, se utilizó 6 electrodos de aluminio y se trabajó con una fuente de poder de 14 voltios y 9 amperios. El máximo porcentaje de remoción alcanzó el 98% para cromo y el 48% para la DQO, a condiciones técnicas de 45 minutos con 10 voltios y dilución de 2.

La generación del drenaje ácido de mina (DAM) y los botaderos de desmonte es un problema en los yacimientos polimetálicos peruanos, perjudican severamente la vida acuática de los ríos y la ecología de su entorno de la flora fauna y seres humanos.

Causan conflictos sociales con las empresas mineras que están en explotación, también a los proyectos mineros nuevos, vale decir la actividad minera es mal vista y rechazada. (zevallos, 2016)

según Pérez, (2007) hace mención que: “El concepto de electrolisis de aguasácidas 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 agua y en el acoplamiento de biotecnologías en el caso de contaminantes orgánicos, que ayuden a la degradación de los mismos. La electrolisis tiene un gran potencial para descontaminar diversos tipos de aguas acidas. 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.

Los drenajes ácidos de la minería metálica son una de las principales fuentes de contaminación de las aguas superficiales y subterráneas en el Perú, y el mundo, debido que este problema puede persistir durante décadas e incluso cientos de años una vez finalizado el ciclo productivo. La generación del drenaje ácido de mina (DAM) y los botaderos de desmonte es un problema en los yacimientos polimetálicos peruanos, perjudican severamente la vida acuática de los ríos y la ecología de su entorno de la flora fauna y seres humanos. Causan conflictos sociales con las empresas mineras que están en explotación, también a los proyectos mineros nuevos, vale decir la actividad minera es mal vista y rechazada. (zevallos, 2016)



Figura 1. Método donde se basa el tratamiento de las aguas ácidas

Fuente: (zevallos, 2016)

Según Volke V., (2012) menciona que sus principios se basan: “en la aplicación de una corriente directa de baja intensidad a través del suelo contaminado, con el uso de electrodos divididos en extremos anódicos y catódicos La corriente eléctrica genera la formación de un frente ácido en el ánodo y uno básico en el cátodo a partir de la disociación de algunas moléculas de agua; esta generación de condiciones ácidas puede ayudar a la desorción, disolución y transporte de algunos contaminantes metálicos hacia sistemas de recolección ubicados en el cátodo.

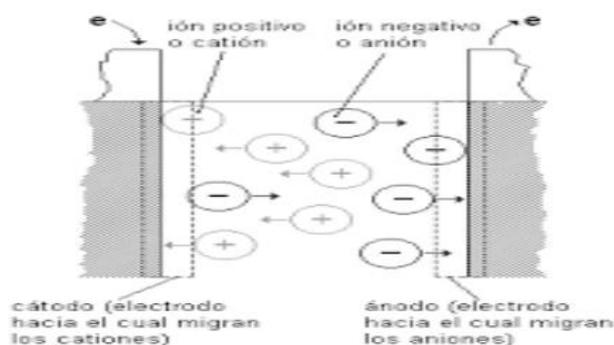


Figura 2. Esquematización de la migración de dichas especies cargadas durante el proceso de electrólisis.

Fuente: (zevallos, 2016)

Según (Alcalino comcha, 2012) menciona que. “El sistema de estudio para desarrollar esta técnica consiste en una celda electrolítica de dimensiones 33cmx7cmx7cm, compuesto por un compartimento que contiene el agua, dos electrodos y contactos eléctricos. Además, El compartimento para el agua puede contener una muestra de agua de aproximadamente 600 kg/L. Los electrodos utilizados son de acero inoxidable 316, ya que es un material resistente a la oxidación y también accesible económicamente.



Figura 3. *Sistema experimental de electrólisis*

Fuente. (Alcaino Concha, 2012)

Densidad de corriente: Es el resultado entre la intensidad de corriente que atraviesa por un conductor y la sección recta de dicho conductor. (Mantell, 2003, p. 15). La cantidad de corriente suministrada al sistema de electrocoagulación, permite que los electrodos utilizados desprendan mayor cantidad de iones en el medio acuoso. Al aplicar corrientes muy altas al proceso electroquímico, la energía eléctrica se convierte en energía calorífica que calienta el agua. Una densidad de corriente alta disminuye la eficiencia de la electrocoagulación. Es por ello que al elegir la densidad de corriente

óptima debe tenerse en cuenta las demás variables de operación como pH, y temperatura, (Arango, 2005, p. 49 - 56).

Conductividad: Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. La adición de algunos electrolitos tales como NaCl o  $\text{CaCl}_2$  genera un aumento en la conductividad del agua residual. (Arango, 2005, p. 49 - 56).

Electrodos: Se define electrodo como “Un elemento conductor de electricidad que cierra un circuito y entre cuyos extremos se establece una diferencia de potencial. Desde el punto de vista electroquímico es un elemento conductor de electricidad que establece el contacto eléctrico entre un circuito externo, conectado a otro(s) electrodo(s), y una solución electrolítica”. (Martínez & Hernández, 2005)

Ánodo: El ánodo es el polo positivo de un terminal conductor o un electrodo en un proceso electroquímico que toma electrones de los aniones en la solución y está conectado al terminal positivo de la fuente de corriente directa. (Lee, 2005). El ánodo es el electrodo donde se pierden electrones, se produce la oxidación (Vera, 2007). Respecto al ánodo los autores antes mencionados hacen un aporte diferenciado, sin embargo se debe agregar que el ánodo es el electrodo donde ocurre la semirreacción de oxidación proceso químico caracterizado por la pérdida de electrones, por lo tanto, se generan especies iónicas con estado de oxidación menor que en su estado inicial, así el aluminio de ser empleado como ánodo pasa de su estado de oxidación cero ( $\text{Al}^0$ ) a un estado de oxidación +3 ( $\text{Al}^{+3}$ ) observándose una pérdida de electrones el que caracteriza a esta semirreacción

Cátodo: Es un electrodo a través del cual la corriente eléctrica fluye de un dispositivo eléctrico polarizado. El cátodo por lo general es el electrodo con carga negativa, en la que se da la reacción de reducción, donde su estado de oxidación se reduce debido a que recibe electrones. (González, 2010). El cátodo, es el electrodo en el que tiene lugar la reducción. (Vera, 2007). Sobre el cátodo, Gonzáles como Vera concuerdan en establecer que el cátodo es un electrodo donde ocurre la reacción de reducción, es decir que, en este electrodo, por ejemplo, el agua ( $H_2O$ ) sufre hidrolisis donde el hidrógeno con estado de oxidación +1 ( $H^+$ ) pasa a un estado de oxidación cero ( $H_2O$ ), que es su estado termodinámico más estable del hidrógeno a condiciones estándar, ocurriendo la reducción del hidrógeno del agua con ganancia de electrones.

Voltaje o diferencia de potencial: La energía necesaria para separar las cargas depende del voltaje, y de la cantidad de cargas movidas o transportadas. De manera que, de esta definición, se establece que 1 Joule es la energía necesaria para trasladar una carga de 1 Coulomb de un punto a otro punto. El potencial entre estos dos puntos es conocido como voltaje, cuyo valor puede determinarse a partir de la ecuación  $V = W / Q$  (Voltios). Dónde: W es la energía (Julios), Q es la carga (Coulomb) y el resultado es la Diferencia de Potencial. (Arce, J, 2018). El voltaje es la medida de la fuerza producida por esta diferencia en carga, la cual es capaz de mover los electrones a través del alambre desde el extremo con carga negativa hasta el extremo con carga positiva (Dominguez, 2017). El voltaje es una magnitud física, es la responsable de impulsar a los electrones a través de un conductor. Es decir, es aquella que conduce con mayor o menor potencia la energía eléctrica (Bembibre, 2009)

Conductividad: De modo general la conductividad eléctrica de un conductor se define como la inversa de su resistencia, de manera que es indiferente que nos refiramos ya sea a la conductividad o su resistencia para expresar su comportamiento al paso de la corriente eléctrica. (Babor & Ibarz, 2016)

Voltaje es lo mismo que diferencia de potencial entre dos puntos. El potencial eléctrico se define como la energía potencial por unidad de carga. La unidad del potencial eléctrico Joules/coulomb es la misma que la unidad de la diferencia de potencial, y 1 Joul/coulomb es igual a 1 volt., en honor de Alejandro Volta (1745-1827), quien inventó la batería eléctrica. El voltio se abrevia V, la diferencia de potencial, medida en volt., es conocido como voltaje (Giancoli, 2006).

pH: El pH en la electrocoagulación está relacionado directamente en la eficiencia de la corriente y al nivel que éste se encuentre en el medio acuoso permitirá la disolución del hidróxido del metal. La eficiencia de la electrocoagulación depende del tipo de contaminante, sin embargo, se ha identificado que existe buenos niveles de remoción, utilizando pH, cercanos a 7. En aguas ácidas el pH, suele incrementarse, pero disminuir en aguas básicas. En aguas acidas el pH aumenta debido a la reacción del hidrógeno en el cátodo dada por  $\text{H}_2\text{O} + 2\text{e} \rightarrow \text{H}^2 + 2\text{OH}^-$  (Arango, 2005, p. 49 - 56).

Temperatura: La temperatura en la electrocoagulación aumenta hasta llegar aproximadamente a los 60°, de acuerdo a la cantidad de corriente aplicada y luego desciende. Cuando la temperatura es alta, existe mayor destrucción de la película de óxido de aluminio, lo cual desprende mayor cantidad de iones que interactúan con los contaminantes. (Arango, 2005, p. 49 - 56).

## **1.2. Formulación del problema**

¿Cómo influye el método de electrólisis en la recuperación de plomo en la mina, Algamarca – Cajamarca, 2022?

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Aplicar el método de electrolisis para la remoción de plomo en la mina Algamarca – Cajamarca, 2022.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- ✓ Evaluar las características físico químicas del drenaje acido de mina
- ✓ Determinar el rango de la densidad de corriente para la remoción del Plomo por electrolisis.
- ✓ Determinar el rango de tiempo de retención para la remoción del Plomo por electrolisis.

## **1.4. Hipótesis**

### **1.4.1. Hipótesis general**

Es posible realizar la recuperación de plomo mediante el uso del método de electrolisis en la mina Algamarca Cajamarca 2022.

## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

### 2.1. Tipo de investigación

Según (Hernández et al., 2017), el tipo de investigación es la siguiente:

**Por su finalidad:** Aplicada, porque se enfoca en la resolución de problemas de manera práctica y sencilla.

**Por su diseño:** Experimental, ya que evidenciara si una o más variables independientes afectan a una o más variables dependientes.

**Por su enfoque:** Cuantitativa, porque se basa en la obtención de datos numéricos los cuales serán utilizados en procesos estadísticos para su verificación.

**Por su fuente:** De Campo, ya que es un proceso de análisis científico que dará a conocer la realidad de los hechos y las problemáticas encontradas.

### 2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

#### **Población**

La población involucrada para el presente trabajo de investigación serán los drenajes ácidos de la mina Algamarca - Cajamarca, 2022.

#### **Muestra:**

La muestra para el trabajo de investigación será de 15 litros de drenaje ácido para realizar el proceso de electrolisis.

## 2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

### 2.3.1. Técnicas

**Observación:** Esta técnica se usó para la recolección de datos y de muestras.

**Análisis documental:** Se investigó antecedentes relacionados al tema en investigación que es; electrólisis para la remoción de plomo en drenaje ácido de mina para el cual se utilizó los buscadores digitales y bibliotecas virtuales.

**Estudio de campo:** Se efectuó la toma de muestras de drenaje ácido en diferentes puntos para luego ser puestos en la celda de remoción en diferentes tiempos y voltajes:

- Se determinó la densidad de corriente (voltaje)
- Se determinó el tiempo de remoción

### 2.3.2. Instrumentos

Los instrumentos que se utilizaron para la técnica de análisis de datos fueron:

- Ficha Excel para toma de datos

## 2.4. Procedimiento

El procedimiento para el desarrollo de la presente investigación se realizó mediante 3 etapas: las cuales se describen de la siguiente manera. etapa de pre campo, etapa de campo y etapa de post campo.

### 2.4.1. Etapa de pre campo

En esta etapa se realiza la revisión de antecedentes, estudios previos, realizados con referencia al tema en estudio el cual se da en diferentes ámbitos, tanto local, nacional como internacional, para lo cual se recurrió a los repositorios virtuales de las distintas universidades, lo cual nos permita tener referencia con respecto

al tema de Electrolisis para la recuperación de plomo en la mina, Algamarca, Cajamarca 2022.

### 2.4.2. Etapa de Campo

Para el análisis de la muestra se utilizará la siguiente tabla

Tabla 1.

*Variables de estudio.*

<b>Variables Independientes de Estudio</b>	<b>Niveles de Estudio</b>
Factor (A): Tiempo de Retención (Min)	X1, X2, X3
Factor (B): Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	Y1, Y2, Y3,
Variable Dependiente de Estudio	
Remoción de Plomo (% de reducción)	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.

*Matriz de diseño experimental.*

		DENSIDAD DE CORRIENTEN (mA/cm <sup>2</sup> )		
		Remoción del Plomo (% de reducción)		
		Y1	Y2	Y3
Tiempo de Retención (Min)	X1	M1	M1	M1
		M2	M2	M2
		M3	M3	M3
	X2	M1	M1	M1
		M2	M2	M2

		M3	M3	M3
	X3	M1	M1	M1
		M2	M2	M2
		M3	M3	M3

$$\begin{aligned} \text{Número total de pruebas} &= (\text{N}^\circ \text{ de matriz}) * (\text{N}^\circ \text{ de Réplicas}) + \text{Prueba Patrón} \\ &= (3) \times (3) \times (3) + (3) \\ &= 30 \end{aligned}$$

### **Cálculos de la densidad de corriente:**

Para el cálculo de la densidad de corriente utilizaremos las siguientes fórmulas.

$$\text{Densidad de corriente} = \text{Amperaje} / \text{área del electrodo}$$

Donde: El amperaje y voltaje nos da la fuente poder.

### **Tiempo de retención:**

En la siguiente investigación solo utilizaremos tres tiempos diferentes como son: 15, 30 y 60 minutos. Estos tiempos son prolongados y permiten, que se desarrollen los procesos biológicos y químicos.

### **Establecimiento del diseño de la celda para los ensayos de electrolisis**

Para la evaluación de los ensayos de electrolisis se empleó una celda de Polietileno de 15 cm de altura, de 9 cm de radio con una capacidad aproximadamente 300 ml, en la parte de la tapa se hicieron 4 agujeros de las dimensiones correspondientes al material que se colocaran para que sujetaría las placas de los electrodos de material acero inoxidable SS – AISI 304 de 30 mm de espesor, 50 mm x 50mm x 2mm de superficie), el establecimiento

principal para colocar la muestra el segundo agujero para poner el electrodo ( sulfato de cobre), y el siguiente para medir el pH metro, para un mejor entendimiento ver en el panel fotográfico ( fotografía N° 21 reactor para el proceso de electrolisis del drenaje de mina (DAM) utilizada en la presente investigación.)

### **Cálculos de la densidad de corrientes obtenidas durante el método de electrolisis:**

En la siguiente imagen se puede valorar las medidas de los electrodos utilizados, siendo el área efectiva utilizada la siguiente:  $2*((3*5) + (3*0.2) + 5*0.2)) \text{ cm}^2$ , lo que da un valor de  $33.2 \text{ cm}^2$ , por electrodo, como se utilizaron 2 electrodos por celda, eso significa que el área real expuesta por ensayo fue de  $66.4 \text{ cm}^2$

En la siguiente tabla se muestra los voltajes suministrados a las celdas de electrocoagulación, los amperajes registrados al aplicar el voltaje en cuestión y las densidades de corriente obtenidas de esto.

Voltajes suministrados a las celdas de electrocoagulación, los amperajes registrados.



*Figura 4:* electrodo a utilizar para el proceso de electrolisis.

### 2.4.3. Etapa de pos campo

En esta etapa final Se procesaron y tabularon de forma digital los datos obtenidos en los distintos ensayos con ayuda del programa programas Microsoft Word y Microsoft Excel, así mismo se elaboraron cuadros y gráficos de los resultados obtenidos, en donde se pudo identificar de forma más detallada la remoción del plomo con la ayuda del electrólisis.

### 2.5. Aspectos éticos

La presente investigación titulada “Aplicación del método de electrolisis para la recuperación de plomo en la mina Algamarca, Cajamarca 2022” se está desarrollando de acuerdo con los protocolos de la Universidad Privada del Norte.

En esta investigación las citas se realizaron de acuerdo con el manual de APA.

**Social:** Tendremos en cuenta la participación de la población en la toma de decisiones. Con el objetivo de enriquecer el patrimonio cultural de las comunidades, los valores colectivos, individuales y especialmente sociales.

**Medio Ambiente:** Mediante el desarrollo de la investigación se evitará conflictos sociales entre pobladores y lugar donde se desarrollan las operaciones de la minera.

### CAPÍTULO III. RESULTADOS

#### 3.1. Evaluar las características físico químicas del drenaje ácido de mina.

De acuerdo a los resultados brindados por el laboratorio regional del agua indican que la contaminación por metales pesados es causada cuando algunos metales como el arsénico, el cobalto, el cobre, el cadmio, el plomo, el oro, la plata y el zinc, estos son contenidos en las rocas excavadas o expuestos como se puede apreciar en el anexo 1.

#### 3.2. Determinar el rango de la densidad de corriente para la remoción del Plomo por electrolisis.

En la siguiente tabla se muestra los voltajes suministrados a las celdas de electrolisis, los amperajes registrados al aplicar el voltaje en cuestión y las densidades de corriente obtenidas de esto.

Tabla 3.

*Densidad de corriente durante el método de electrolisis.*

Voltaje aplicado (V)	Amperaje registrado (mA)	Área de electrodos (cm <sup>2</sup> )	Densidad de corriente
1.8	669.47	66.4	10.21
2.4	2754.00	66.4	20.07
3.6	5549.00	66.4	40.12

De acuerdo al análisis de características físico químicas del drenaje ácido de mina se tiene para el Plomo (pb), el cual se detalla en la siguiente tabla.

Tabla 4.

*Resultados del análisis de características físico químicas para el plomo (pb)*

MUESTRA	Plomo (Pb) mg/L
Plomo inicial	0.386

En la siguiente tabla se muestran los resultados del Plomo (Pb), obtenidos después del electrolisis de agua de Drenaje acido de mina.

Tabla 5.

Resultados después de la aplicación de electrólisis.

DENSIDAD DE CORRIENTE (mA/cm <sup>2</sup> )											
TIEMPO DE RETENCIÓN (MIN)		10	pH	T°	20	pH	T°	40	pH	T°	
	15		0.345	2.72	18.7	0.324	2.74	19.2	0.297	2.83	19.5
			0.339			0.312			0.261		
			0.335			0.304			0.245		
	30		0.232	2.75	20.6	0.201	2.77	21.3	0.178	2.8	24.6
			0.226			0.199			0.165		
			0.218			0.181			0.199		
	60		0.099	3.04	22.8	0.062	3.45	26.5	0.033	3.69	36.3
			0.096			0.047			0.016		
			0.075			0.039			0.004		

### 3.3 Resultados de porcentaje de remoción en función al tiempo para la remoción del Plomo por electrolisis.

Tabla 6.

*Cálculo de remoción de Plomo en función al tiempo.*

		DENSIDAD DE CORRIENTE (mA/cm <sup>2</sup> )		
		Porcentaje de Reducción		
		10 (Y <sub>1</sub> )	20 (Y <sub>2</sub> )	40 (Y <sub>3</sub> )
TIEMPO DE RETENCIÓN (MIN)	15 (X <sub>1</sub> )	10.62	16.06	23.06
		12.18	19.17	32.38
		13.21	21.24	36.53
	30 (X <sub>2</sub> )	39.90	47.93	53.89
		41.45	48.45	57.25
		43.52	53.11	48.45
	60 (X <sub>3</sub> )	74.35	83.94	91.45
		75.13	87.82	95.85
		80.57	89.90	97.55

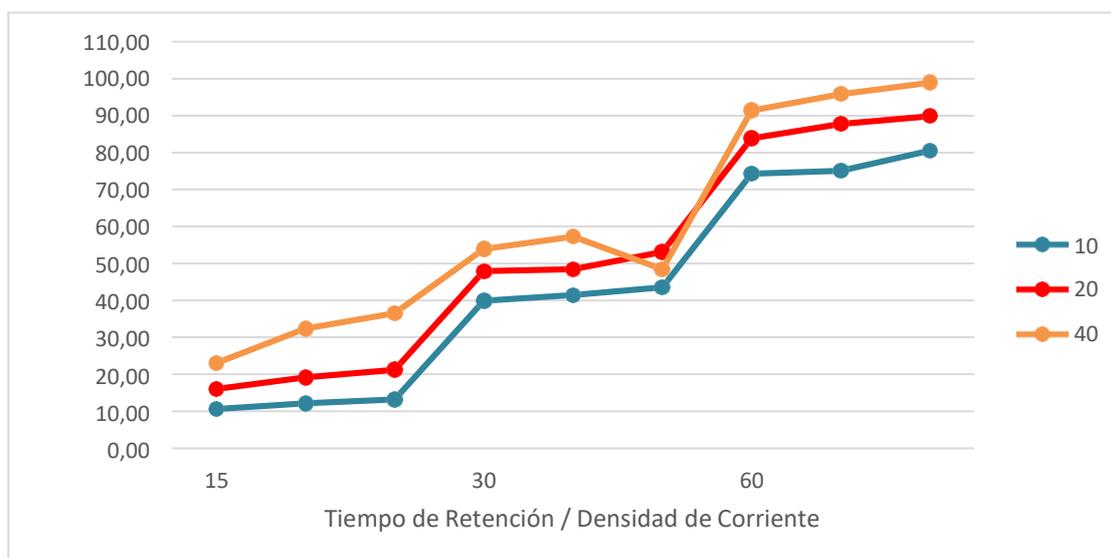


Figura 5: Porcentaje de remoción del Plomo en función a la densidad de corriente y tiempo de retención.

A continuación, se presenta los resultados individuales del tiempo de retención y de la densidad de corriente para la remoción del plomo de las aguas del drenaje ácido de Mina, (DAM).

Tabla 7.

*Análisis de retención en función al tiempo y densidad de corriente.*

Factor		Densidad de Corriente		
Tiempo de Retención		10 (Y <sub>1</sub> )	20 (Y <sub>2</sub> )	40 (Y <sub>3</sub> )
15	1	10.62	16.06	23.06
	2	12.18	19.17	32.38
	3	13.21	21.24	36.53

30	1	39.90	47.93	53.89
	2	41.45	48.45	57.25
	3	43.52	53.11	48.45
60	1	74.35	83.94	91.45
	2	75.13	87.82	95.85
	3	80.57	89.90	97.55

A continuación, mostramos los resultados de las sumatorias del tiempo de retención y de la densidad de corriente:

Tabla 8.  
*Sumatoria de ejes*

sumatoria $Y_i$ (Horizontal)	sumatoria $Y_j$ (Vertical)	sumatoria $Y_{ij}$ (Combinación)		
184.45	391.93	36.01	56.47	91.97
434.95	467.62	125.87	149.49	159.59
777.97	537.82	230.05	261.66	286.26

Mostramos los valores de N, a, b, r y C, utilizados para cálculos.

Tabla 9.

*Consideración para los cálculos del proceso de electrolisis.*

Consideraciones Para Los Cálculos	
N = Número de variables	27
a = Densidad de Corriente	3
b = Tiempo de Retención	3
r = Replicas	3
C = $Y^2/N$	72320.108

Asimismo, se realizó, la suma de cuadrados.

Tabla 10.

*Cálculos con sumatoria de cuadrados.*

Cálculos	
$Y^2/N$ = Constante de corrección	72320.108
SS <sub>t</sub> = Sumatoria de cuadrados de los tratamientos totales	21236.87
SS <sub>a</sub> = Sumatoria de cuadrados del tiempo de retención	19728.85
SS <sub>b</sub> = Sumatoria de cuadrados de la densidad de corriente	1182.99
Subtotales=	20992.32
S <sub>se</sub> = Dispersión / error	2.45
SS <sub>ab</sub> =	322.58
Comprobación del error	2.45

Análisis de Varianza ANVA para la remoción del plomo (pb) del drenaje ácido de mina.

Tabla 11.

*Tratamiento para la remoción de plomo*

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F <sub>o</sub> (observado)	F <sub>TABULAR</sub>
Tratamiento A (Tiempo de Retención)	3	19728.85	9864.425	72479.24	3.16
Tratamiento B (Densidad de Corriente)	3	1182.99	591.495	4346.03	3.16
A x B	9	20992.32	80.645	592.54	2.46
Error	18	2.45	2.45		
Total	27	21236.87	14.98		

*Tabla 12.*

*Resultados de la remoción de plomo por electrolisis.*

Fuente de variación	Pb
Tratamiento A (Tiempo de Retención)	72479.24
Tratamiento B (Densidad de Corriente)	4346.03
Interacción AB (Tiempo de retención / Densidad de Corriente)	592.54

De la misma forma se utilizó la tabla de Fisher “F” nivel de significancia del 95%.

*Tabla 13.*

*Resultados de remoción según tabla de Fisher*

F0	F $\alpha$ , v1, v2	RESULTADO
FA	3.18	3.16
FB	3.18	3.16
FAB	9.18	2.46

## CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1 Discusión

Perozo y Abreu (2017) realizaron estudios a escala de laboratorio usando una celda electrolítica, con electrodos de hierro, aluminio y acero inoxidable, donde determinaron los porcentajes de remoción de color, turbidez y sólidos totales, para una configuración aluminio - acero inoxidable y para la segunda configuración hierro - acero inoxidable. Sus resultados mostraron que las eficiencias en remoción de turbidez y color utilizando ánodo de aluminio fueron de un 40% a un 80% bajo las mejores condiciones de voltaje aplicado, separación entre los electrodos y tiempo de tratamiento. En la presente investigación se determinaron las características físico químicas del drenaje ácido de mina Algamarca cuya muestra tiene un potencial elevado para el tratamiento de agua ácida de minería, en este caso dicha investigación se utilizó para hacer la remoción del plomo(pb) un 97.55%, siendo la muestra inicial de 0.386 mg/L de plomo(pb) y la final de 0.004 mg/L de plomo(pb).

Jaramillo (2012) en la cual diseñó y construyó un reactor de electrocoagulación para el tratamiento de agua residual de tintura y acabado textil, para tal propósito se utilizó también electrodos el cual es un sistema experimental genera movimiento de la fase líquida por un agente externo para reducir la acumulación de sarro en los electrodos, mientras que en el presente estudio se utilizó los electrodos móviles para este fin. Con una intensidad de corriente de 21 amperios y sus resultados de remoción no mejoraron, hecho que fue tomado en cuenta para el presente estudio en la selección de los niveles de voltajes utilizados de 3,6 y 9

voltios donde se observan que los valores de amperaje oscilan entre 0,21 a 0,62 amperios para evitar la excesiva formación de hidrogeno en el ánodo y consecuentemente mayor presencia de  $\text{OH}^-$  en el sistema dando apariencia de una no reducción. En nuestra investigación se determinaron que la densidad de corriente y el tiempo de retención para un adecuado proceso de remoción de plomo en drenajes ácidos mediante electrolisis los valores fueron para 1.8v una densidad de corriente de 10.21; para 2.4 v densidad de corriente de 20.07 y finalmente para 3.6 v densidad de corriente igual a 40.12. asimismo, se tiempo para la remoción del Plomo por electrolisis el cual se tiene los tiempos en minutos de 15, 30 y 60.

## 4.2 Conclusiones

De acuerdo al análisis de las características físico químicas del drenaje ácido de mina se determinó potencial elevado para el tratamiento de agua ácida de minería, en este caso dicha investigación se utilizó para hacer la remoción del plomo(pb) un 97.55%, siendo la muestra inicial de 0.386 mg/L de plomo(pb) y la final de 0.004 mg/L de plomo(pb).

Se determinó que los valores promedios en la remoción de plomo(pb), fue influenciados por el tiempo de retención a diferencia de la densidad de corriente los cuales son para 1.8v una densidad de corriente de 10.21; para 2.4 v densidad de corriente de 20.07 y finalmente para 3.6 v densidad de corriente igual a 40.12.

De la misma forma se determinó el porcentaje de remoción en función al tiempo para la remoción del Plomo por electrólisis el cual concluye que se tiene los tiempos en minutos de 15, 30 y 60.

## REFERENCIAS

- Alil I., Gupta V., Khan T. and Asin M. (2012). *Removal of Arsenate from Aqueous Solution by Electro-Coagulation Method Using Al-Fe Electrodes*. International Journal of Electrochemical Science.
- BARBOZA P, Gloria. *Reducción de la Carga de Contaminantes de las Aguas Residuales de la Planta de Tratamiento de Totorá –Ayacucho Empleando la Técnica de Electrocoagulación*. Tesis (Magister en ciencias). Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2011. 145 pp.
- Benhadji, Amel [et al]. *Electrocoagulación y efecto de los materiales del cátodo en la eliminación de contaminantes de aguas residuales de curtiduría de Rouiba*. Desalination [en línea]. 2001, n.º 277.
- Castro M. (2014). *Arsénico en el agua de bebida de América Latina y su efecto en la salud pública*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS-SB/SDE/OPS) - México.
- Cazco A. y Jarrín S. (2013). *Tesis Diseño, construcción y análisis de los parámetros de operación de un sistema de electrocoagulación*. Escuela Politécnica Nacional - Ecuador.
- David, P. (2017). *Remediación de aguas acidas*. Puebla, Pue., México: Instituto Nacional de Ecología, Dirección General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental.
- Gipalvas E. (2008). *Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales*. Escuela de Ingeniería Universidad EAFIT Medellín – Colombia.

Hernández L. et al. (2015). *Remoción de contaminantes biorefractarios en aguas residuales industriales mediante métodos electroquímicos*. Universidad Autónoma del Estado de México Quivera.

Machaca C. (2010). *Tratamiento de aguas residuales de la Laguna Espinar - Puno por electrocoagulación*. Tesis para optar el título de Ingeniero Químico, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.

Martínez L. y Gasquez J. (2005). *Arsénico en aguas: origen movilidad y tratamiento*. IV Congreso Hidrogeológico Argentino, Río Cuarto – Argentina.

MAYTA R. y MAYTA J. *Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación*.

Mayta R. (2012). *Efecto del proceso de electrocoagulación en las aguas residuales de la curtiembre de la Facultad de Ingeniería Química*. Tesis para optar el título de Ingeniero Químico, Universidad Nacional del Altiplano, Puno.

## ANEXOS

### Anexo 1. Resultados de análisis de características físico químicas del drenaje ácido.



**LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA**  
GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL  
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL-DA  
CON REGISTRO N° LE-084



### INFORME DE ENSAYO N° IE 1118651

ENSAYOS			QUÍMICOS					
Código Cliente	JTCH		-	-	-	-	-	-
Código Laboratorio	1118651-01		-	-	-	-	-	-
Matriz de Agua	RESIDUAL		-	-	-	-	-	-
Descripción	Industrial		-	-	-	-	-	-
Localización de la Muestra	Cerro Corona-Hualgayoc		-	-	-	-	-	-
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
Plata (Ag)	mg/L	0.021	<LCM	-	-	-	-	-
Aluminio (Al)	mg/L	0.025	10.48	-	-	-	-	-
Arsénico (As)	mg/L	0.005	4.242	-	-	-	-	-
Boro (B)	mg/L	0.022	0.404	-	-	-	-	-
Bario (Ba)	mg/L	0.003	0.044	-	-	-	-	-
Berilio (Be)	mg/L	0.002	<LCM	-	-	-	-	-
Calcio (Ca)	mg/L	0.124	323.4	-	-	-	-	-
Cadmio (Cd)	mg/L	0.002	0.86	-	-	-	-	-
Cobalto (Co)	mg/L	0.002	0.007	-	-	-	-	-
Cromo (Cr)	mg/L	0.006	0.021	-	-	-	-	-
Cobre (Cu)	mg/L	0.006	0.990	-	-	-	-	-
Hierro (Fe)	mg/L	0.020	830.4	-	-	-	-	-
Mercurio (Hg)	mg/L	0.003	<LCM	-	-	-	-	-
Potasio (K)	mg/L	0.005	1.469	-	-	-	-	-
Litio (Li)	mg/L	0.003	0.022	-	-	-	-	-
Magnesio (Mg)	mg/L	0.018	45.44	-	-	-	-	-
Manganeso (Mn)	mg/L	0.005	148.7	-	-	-	-	-
Molibdeno (Mo)	mg/L	0.003	0.012	-	-	-	-	-
Sodio (Na)	mg/L	0.021	1.879	-	-	-	-	-
Níquel (Ni)	mg/L	0.006	0.085	-	-	-	-	-
Fósforo (P)	mg/L	0.024	2.355	-	-	-	-	-
Plomo (Pb)	mg/L	0.004	0.386	-	-	-	-	-
Antimonio (Sb)	mg/L	0.007	0.10	-	-	-	-	-
Selenio (Se)	mg/L	0.021	<LCM	-	-	-	-	-
Silicio (Si)	mg/L	0.104	10.88	-	-	-	-	-
Estaño (Sn)	mg/L	0.041	<LCM	-	-	-	-	-
Estroncio (Sr)	mg/L	0.002	0.671	-	-	-	-	-
Titanio (Ti)	mg/L	0.005	0.037	-	-	-	-	-
Talio (Tl)	mg/L	0.004	0.007	-	-	-	-	-
Vanadio (V)	mg/L	0.004	0.072	-	-	-	-	-
Zinc (Zn)	mg/L	0.023	173.0	-	-	-	-	-

Cajamarca, 16 de Noviembre de 2018.

2 de 3

Anexo 2. Instrumento de recolección de datos.

---

**sumatoria  
 $Y_i$**

**sumatoria  $Y_j$**

**sumatoria  $Y_{ij}$  (Combinación)**

---

---

Anexo 3.

Galería fotográfica.



Aplicación del método de electrólisis para la recuperación de plomo en drenajes de la mina Algamarca, Cajamarca 2022.





