



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERIA

CARRERA DE INGENIERIA DE MINAS

“ELECTRORREMEDIACIÓN 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.”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero de Minas

Autores:

Br. Escobar Misahuaman, Alexander Jhonson
Br. Ocas Izquierdo, Segundo Martin

Asesor:

Mg. Ing. Gary Christiam Farfán Chilicaus

Cajamarca – Perú
2016

APROBACIÓN DE LA TESIS

El asesor y los miembros del jurado evaluador asignados, **APRUEBAN** la tesis desarrollada por ellos Bachilleres: **Alexander Jhonson Escobar Misahuamán y Segundo Martin Ocas Izquierdo**, denominada:

**ELECTRORREMEDIACIÓN 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.”**

Ing. Gary Christiam Farfán Chilicaus
ASESOR

Ing. Victor Eduardo Alvarez León
JURADO
PRESIDENTE

Ing. Juan Carlos Flores Cerna
JURADO

Ing. Danger Girón Palomino
JURADO

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedicamos a Dios, quién supo guiarnos por el buen camino, darnos fuerzas para seguir adelante y no desalentarnos en los problemas que se presentaban, enseñándonos a sobrellevar las adversidades, sin perder nunca la dignidad, ni desfallecer en el intento.

A nuestros padres, con afecto, respeto y eterna gratitud; quienes con abnegación y sacrificio hicieron posible nuestra formación profesional.

A nuestro asesor, Ingeniero Gary Christiam Farfán Chilicaus, por su gran apoyo ofrecido y motivación para la elaboración de esta tesis, por su tiempo compartido y por impulsar el desarrollo de nuestra formación profesional.

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios, por habernos permitido llegar hasta este punto y habernos dado salud para lograr nuestros objetivos, además de su infinita bondad y amor.

Expresamos nuestro más profundo agradecimiento y gratitud al Ingeniero Gary Christiam Farfán Chilicaus, por su apoyo para el desarrollo del presente Trabajo de Investigación; asimismo, hacemos propicia la oportunidad, para hacer llegar nuestro agradecimiento a toda persona el cual colaboró con nuestra investigación.

Con profunda gratitud a los docentes de la Carrera ingeniería de minas de la Universidad Privada del Norte – Cajamarca, quienes compartieron con nosotros su experiencia y conocimientos. A nuestros queridos compañeros, por compartir con nosotros sus vivencias, luchas y esfuerzos por alcanzar la meta de ser profesionales.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Realidad problemática.....	11
1.2. Formulación del problema.....	12
1.3. Justificación.....	12
1.4. Limitaciones.....	12
1.5. Objetivos.....	13
1.5.1. Objetivo general.....	13
1.5.2. Objetivos específicos.....	13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	13
2.1. Antecedentes.....	13
2.2. Bases teóricas.....	16
2.2.1. Industria minera.....	16
2.2.2. Relación de la actividad minera y su impacto al ambiente.....	17
2.2.3. Suelos.....	20
2.2.4. Contaminación del suelo con metales pesados.....	24
2.2.5. Tecnologías para remediación de suelos contaminados por metales pesados.....	25
2.2.6. Electrorremediación.....	31
2.2.7. Densidad de corriente.....	39
2.2.8. Ácido acético.....	40
2.2.9. Digrama de purbaix para la electrorremediación.....	41
2.3. Hipótesis.....	43
CAPÍTULO 3. GENERALIDADES	43
3.1. Ubicación:.....	43
3.2. Historia.....	44
3.3. Población.....	44
3.4. Accesibilidad:.....	44
3.5. Recursos naturales.....	45
3.6. Geología.....	46
3.6.1. Geología regional.....	46
3.6.2. Geología local.....	49
CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA	49
4.1. Operacionalización de variables.....	49
4.2. Diseño de investigación.....	51
4.2.1. Tratamiento de datos.....	52
4.3. Unidad de estudio.....	53
4.4. Población.....	53
4.5. Muestra (muestreo o selección).....	53
4.6. Métodos y técnicas.....	53
4.7. Procedimientos de recolección de datos.....	53
4.8. Instrumentos.....	54
4.8.1. Equipos.....	54

4.8.2.	Instrumentos:	55
4.8.3.	Materiales	55
4.8.4.	Materiales de laboratorio.....	55
4.8.5.	Reactivos	55
4.9.	Procedimientos de análisis de datos	56
4.9.1.	Proceso experimental	56
4.9.2.	Cálculos de la densidad de corriente	57
4.9.3.	Para el ácido acético.....	57
CAPÍTULO 5. RESULTADOS		58
5.1.	Tipo de materiales en la ejecución de los ensayos de electrorremediación.....	58
5.2.	Establecimiento del diseño de la celda para los ensayos de electrorremediación	59
5.3.	Cálculo del área de los electrodos durante el metodo de electrorremediación	59
5.4.	Cálculos de la densidad de corriente durante el método de electrorremediación	60
5.5.	Resultado del análisis granulométrico de la muestra- relave Paredones.....	60
5.6.	Resultado del plomo inicial del relave mina Paredones obtenido antes de los ensayos de electrorremediación.....	63
5.7.	Resultados del plomo obtenidos después de la electrorremediación de suelo.	64
5.8.	Resultado del cálculo de porcentaje de disminución de plomo	65
5.9.	Resultados de análisis de varianza (ANVA) para la remoción de plomo mediante electrorremediación.....	66
CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN		69
6.1.	Caracterización del relave de Paredones.....	69
6.1.1.	Métales presentes en el relave	69
6.1.2.	Granulometría	69
6.1.3.	Contenido de humedad.....	70
6.2.	Para el tipo de materiales en los ensayos de electrorremediación	71
6.3.	Para los resultados de remoción de plomo	72
6.4.	Análisis ANVA.	74
CONCLUSIONES		76
RECOMENDACIONES		77
APÉNDICE		78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		85
ANEXOS		87
DEFINICIÓN DE TERMINOS BÁSICOS		104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 : Fases de la actividad minera y su impacto al ambiente	17
Tabla 2: Pasivos ambientales mineros.	18
Tabla 3: Propiedades granulométricas de suelos.....	23
Tabla 4: Tabla comparativa de tecnologías in situ para la remediación de suelos contaminados.....	27
Tabla 5: Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación in situ y ex situ.	28
Tabla 6: Ventajas y limitaciones de la electroremediación.....	36
Tabla 7: Evolución de las operaciones en minas Paredones.	44
Tabla 8: Matriz de operacionalización de variables.....	50
Tabla 9: Modelo matricial para el experimento bifactorial.....	51
Tabla 10: Características de las calicatas.	54
Tabla 11: Niveles de las variables de estudio.	56
Tabla 12: Matriz de diseño experimental.....	56
Tabla 13: Materiales en la ejecución de los ensayos de electroremediación	58
Tabla 14: Densidad de corriente durante el método de electroremediación.	60
Tabla 15: Valores de los pesos del ensayo granulométrico.	60
Tabla 16: Tabulación de los valores para obtener el % que pasa.	61
Tabla 17: Tabulación de los valores para obtener el % que pasa.	61
Tabla 18: Cantidades % que presenta en su composición la muestra.	62
Tabla 19: Cantidades % que presenta en su composición la muestra.	62
Tabla 20: Resultado del plomo inicial del relave mina Paredones.	63
Tabla 21: Reporte de análisis de laboratorio de servicios a la comunidad e investigación de la Universidad Nacional de Trujillo después de la electroremediación.....	64
Tabla 22: Cálculo de remoción de plomo.	65
Tabla 23: Remoción de plomo con sus dos variables (ácido acético y densidad de corriente).	65
Tabla 24: Análisis ANVA.	66
Tabla 25: Sumatoria de ejes.....	66
Tabla 26: Consideración para los cálculos.	66
Tabla 27: Cálculos con sumatoria de cuadrados y comprobación de error.....	67
Tabla 28: Tratamiento de las variables para la remoción de plomo	67
Tabla 29: ANVA para la remoción de plomo	67
Tabla 30: Valores según tabla de Fisher.....	67
Tabla 31: Resultados de hipótesis	68
Tabla 32: Resumen de análisis geoquímico realizados en SGS.....	69
Tabla 33: Cantidades % que presenta en su composición la muestra.	70
Tabla 34: Materiales en los ensayos de electroremediación.....	71
Tabla 35: Remoción de plomo según los ensayos, con muestra inicial y luego del proceso de electroremediación	72
Tabla 36: Resultado de remoción de plomo después de los ensayos de electroremediación	73
Tabla 37: Remoción de plomo en base a sus dos variables (la concentración del ácido acético y la densidad de corriente).....	74
Tabla 38: Datos utilizados en los ensayos de electroremediación	78
Tabla 39: Costo de Hidrandina según los Kilowatt consumidos	78
Tabla 40: Cálculo de los costos según a los voltajes utilizados en los experimentos de electroremediación.....	79
Tabla 41: Porcentaje de remoción de plomo por electroremediación	81
Tabla 42: Sumatorias Y_i , Y_j y Y_{ij}	81
Tabla 43: Cuadro de resumen del análisis de varianza para la remoción de plomo.	83
Tabla 44: Cuadro de cálculo de puntos porcentuales	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Observatorio de conflictos sociales en Cajamarca por pasivos ambientales de Paredones	14
Figura 2: Actividad minera y sus efectos.....	19
Figura 3: Clasificación de rocas sedimentarias por el tamaño de los clastos.....	23
Figura 4: Tamaño de tamiz para los distintos tipo de suelos.....	24
Figura 5: Clasificación de tecnologías de remediación.	26
Figura 6: Electrólisis del agua, principio que se basa la electrorremediación.....	33
Figura 7: Esquematización de la migración de dichas especies cargadas durante el proceso de electrorremediación.	35
Figura 8: Esquema básico del proceso de electrorremediación.	35
Figura 9: Sistema experimental de electrorremediación.	38
Figura 10: Diagrama de instalaciones experimentales a escala de laboratorio de electrorremediación de suelo.....	39
Figura 11: Diagrama de Purbaix.....	42
Figura 12: Diagrama de purbaix de plomo	43
Figura 13: Ubicación Paredones.	45
Figura 14: Cuadro estratégico de la región de Cajamarca.	48
Figura 15: Presentación del área del electrodo a utilizar para los cálculos	59

RESUMEN

Las viejas prácticas mineras y el manejo inadecuado de sus residuos, 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 suelos contaminados, principalmente los que están ligados a la actividad minera (relaves mineros), la mayoría de estas se han orientado hacia los procesos de remediación in situ, dentro de los cuales se propone la electrorremediación por su capacidad de remover contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos. La presente investigación ofrece un estudio fisicoquímico en una celda de electrorremediación experimental, 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 electrorremediación para remover el plomo.

Utilizando la técnica de electrorremediación se puede disminuir la toxicidad del relave minero de Paredones que está calificado como muy alto riesgo para la salud humana, por parte del Ministerio de Energía y Minas. Por ende, con estas demostraciones se puede optar por utilizar la electrorremediación como una tecnología limpia y como una alternativa para tratar relaves mineros y hacer un cierre de minas exitoso, ayudando así a bajar los índices de conflictos sociales en nuestra región.

ABSTRACT

The outdated mining practices and the inappropriate manage of waste, as well as the absence of detailed technical laws that regulates mining closure (the end of any mining activity) has caused the growth of environmental hazardous waste sites in mining throughout these times, also, causing pollution (Soil, water and oxygen) whose, their use may endanger public health.

In the last decades, interest has been increased to develop of new technologies that helps to solve problems of polluted soils, mainly who are related to mining activity (Tailing Basin), most of them have been focused towards the remediation "In Situ" processes, in which the "electroremediation" is proposed for its capacity to eliminate both organic and inorganic pollutants. The following research work offers a physicochemical study in an experimental "electroremediation" cell of a real sandy soil (65%) wich is a Tailing Basin, that comes from the "Paredones" mine located at San Bernardo town, in San Pablo city of Cajamarca. We used water (as a soil humectant) and acetic acid (0.01, 0.02 y 0.03 M) (electrolytic), a continuous potential of 10-25 Volts was used for about 24 hours. When finishing the tests the soil was recovered, the pH was determined, finally we observed that the soil presented a great capacity of damping.

At the end of the 36 experiments, we get a 45.85% lead removal from the "Pardones" tailing basins, reducing toxicity. Likewise, through the ANVA analysis we determined that the concentration of acetic acid and the current density affects notably the electroremediation process to remove lead.

Using the "electroremediation" technique we can reduce the toxicity of Paredones tailing basins which is appraised as a very high risk to human health by The Energy and Mines Ministry of Peru. Therefore, with these demonstrations, we can make the choice to use "electroremediation" as a clean technology and as an alternative to treat tailing basins and to do a successful mining closure, helping to get lower the rates of social conflicts in our region.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

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”. (Benites Mostacero R, 2015). 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.

1.2. Formulación del problema

¿De qué manera influye la electroremediación en base a la densidad de corriente y la concentración de ácido acético, para la disminución de plomo en el relave de la mina Paredones, distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo y departamento de Cajamarca?

1.3. 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 ha convertido en un ambiente que por factores sociales se ha poblado cada vez más, y mas aun un afluente (río San Pablo) que alimenta a la presa Gallito Ciego, con lo cual las comunidades aledañas están expuestas a una contaminación inminente en el tiempo. Adicionalmente, por efecto de lluvias y arrastre de sólidos estos contaminantes (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 electroremediación 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.

1.4. Limitaciones

El presente trabajo involucra una serie de actividades, desde un trabajo de gabinete a un trabajo de campo, que varían en su complejidad, y que deben llevarse a cabo de una manera ordenada a fin de evitar sesgos en la información y obtener unos resultados válidos. Siendo el análisis de remoción de plomo el punto que mayor importancia reviste, ya que es en este donde se sustenta todo el trabajo, además la recolección de las muestras debe cumplir con una metodología definida para todo el trabajo. Se deben considerar también factores extrínsecos a la labor propia de la investigación, como son:

- Condiciones climatológicas, ya que eventos inesperados podrían interrumpir las actividades de muestreo y así aplazar el cronograma de actividades ya establecido.
- Permisos existentes hacia la comunidad para ingresar a la zona de estudio ya que se encuentra restringida.
- Falta de laboratorio especializado en la ciudad de Cajamarca para los análisis correspondientes.
- Poca información en el tema de electroremediación.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar la remoción de plomo del pasivo mineros de Paredones en función de la densidad de corriente y la concentración de ácido acético por electroremediación.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar el rango de la densidad de corriente para la remoción de plomo por electroremediación.
- Determinar la concentración del ácido acético para la remoción de plomo por electroremediación.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

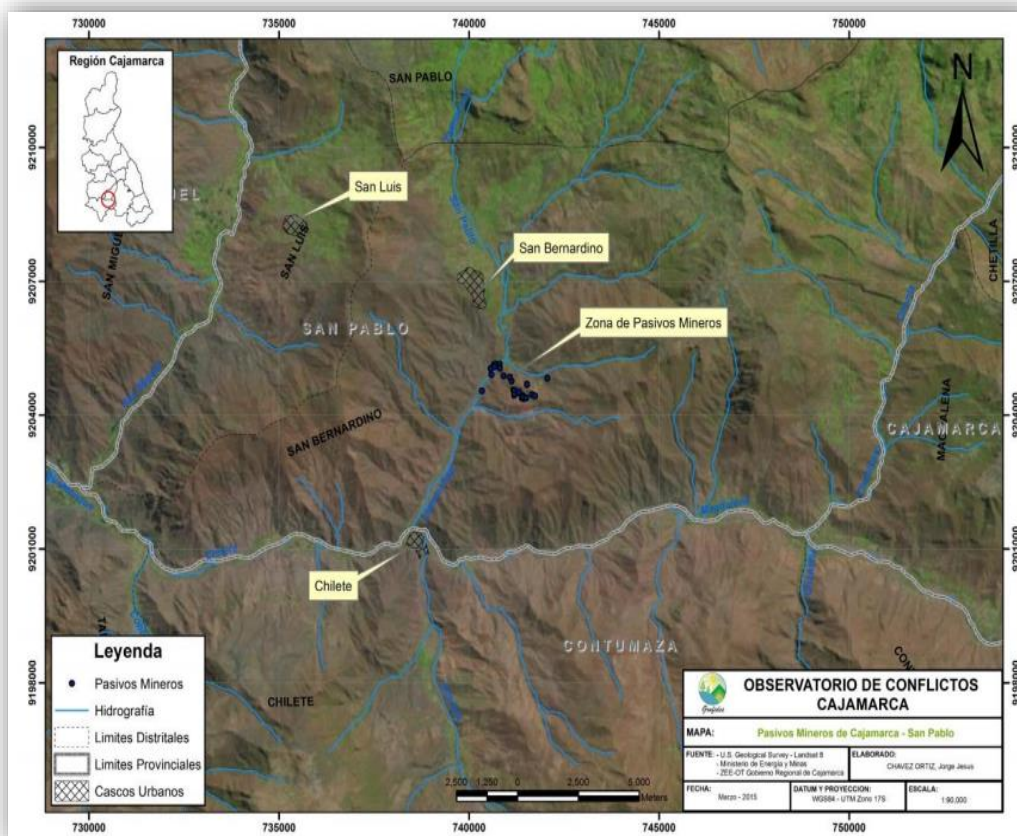
2.1. Antecedentes

- Según Ministerio E., (2008). “Distritos mineros remotos empezaron a florecer en muchas partes del Perú, atrayendo el desarrollo agrícola como complemento. Esto alimentó conflictos sobre el uso del agua y su disponibilidad ya que los relaves acumulados empezaron a obstruir los canales de irrigación y a contaminar las tierras de cultivo aguas abajo.”
- Según Quijada, (2015) 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 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).”

- 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.” (Grufides, 2015)

Figura 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” (Pérez.D, 2007), 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, (2007) hace mención tres estudios que reportan lo siguiente.
 - “En 1995 Geokinetics International Inc. reportó la remediación de un sitio de 213 m² 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 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 3700m² 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, (2007) 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 García Hernández & Vargas Ramírez, (2011) 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.”

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, evaluando los costos, teniendo una gran ventaja que es una tecnología limpia.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. 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.

2.2.2. Relación de la actividad minera y su impacto al ambiente

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

Tabla 1 : Fases de la actividad minera y su impacto al ambiente

FASE	DESCRIPCIÓN	IMPACTO AMBIENTAL
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.

Fuente: (Minas M. d., 2008)

- Como dice Grufides, (2015). "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."

2.2.2.1. Pasivos Ambientales Mineros

- Como indica el Ministerio de Energía de Minas, (2004) hace mención: "Son considerados pasivos ambientales aquellas instalaciones, efluentes, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad." Asimismo el Ministerio de Energía y Minas de la república del Perú a través de su página web, menciona y detalla los pasivos ambientales minero, con sus coordenadas, titular minero, concesión, y estado actual de dichos entes, así como podemos apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 2: Pasivos ambientales mineros.

Pasivos Ambientales Mineros

Fecha: 09/03/2015
Pag.: 303 de 890



Nº	Id	Pasivo Ambiental Minero	Tipo	Subtipo	Cuenca	Provincia	Distrito	Coordenadas		Zona	Datum	Código Derecho Minero	Nombre del Derecho Minero	Nombre del Titular del Derecho Minero	Nombre del Responsable del Pasivo	Estudios Ambientales
								Este	Norte							
CAJAMARCA																
2955	6819	OLORTEGUI (LLAUCANO)	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	LLAUCANO	HUALGAYOC	HUALGAYOC	765,243	9,252,904	17	PSAD56	03000374x01 010009372U 010236794	NEPTUNO SAN AGUSTIN Nº1 SAN JOSE Nº 1	COMPAÑIA MINERA COLQUIRRUMI S.A. CONSOLIDADA DE HUALGAYOC S.A. GOLD FIELDS LA CIMA S.A.A. VIDALON PAREJA, JAIME DAVID	No identificado	Ninguno
2956	13022	PAREDONES	INFRAESTRUCTURA	PLANTAS DE PROCESAMIENTO	JEQUETEPEQUE	SAN PABLO	SAN BERNARDINO	740,673	9,205,085	17	PSAD56	03002115x01 060002396	OCCIDENTAL 1 SAN BERNARDINO TRES	GADNA TAFUR, SEGUNDO LORENZO S.M.R.L. OCCIDENTAL 2 DE CAJAMARCA	No identificado	Ninguno
2957	13050	PAREDONES	LABOR MINERA	BOCAMINA	JEQUETEPEQUE	SAN PABLO	SAN BERNARDINO	741,738	9,204,432	17	PSAD56	010273204 060002396	LUMINOSA NUMERO 2A SAN BERNARDINO TRES	GADNA TAFUR, SEGUNDO LORENZO S.M.R.L. INCOGNITA 2005 TERAN VIGO, HILDEBRANDO	No identificado	Ninguno
2958	13024	PAREDONES	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	JEQUETEPEQUE	SAN PABLO	SAN BERNARDINO	740,809	9,205,148	17	PSAD56	03002115x01 060002396	OCCIDENTAL 1 SAN BERNARDINO TRES	GADNA TAFUR, SEGUNDO LORENZO S.M.R.L. OCCIDENTAL 2 DE CAJAMARCA	No identificado	Ninguno
2959	13025	PAREDONES	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	JEQUETEPEQUE	SAN PABLO	SAN BERNARDINO	741,123	9,204,764	17	PSAD56	010273204 03002115x01 060002396	LUMINOSA NUMERO 2A OCCIDENTAL 1 SAN BERNARDINO TRES	GADNA TAFUR, SEGUNDO LORENZO S.M.R.L. INCOGNITA 2005 S.M.R.L. OCCIDENTAL 2 DE CAJAMARCA TERAN VIGO, HILDEBRANDO	No identificado	Ninguno
2960	13026	PAREDONES	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	JEQUETEPEQUE	SAN PABLO	SAN BERNARDINO	741,308	9,204,502	17	PSAD56	010071904 010163405 010273204 03002138x01 060002396	ANA BEBE V LUMINOSA 2005 A LUMINOSA NUMERO 2A OCCIDENTAL-3 SAN BERNARDINO TRES	CASTRO CASTRO, FLAVIO CISNEROS GONZALES, JOSE CARLOS JESUS GADNA TAFUR, SEGUNDO LORENZO S.M.R.L. INCOGNITA 2005 S.M.R.L. OCCIDENTAL 2 DE CAJAMARCA TEJEDA MOSCOSO, JORGE HECTOR FRANCISCO TERAN VIGO, HILDEBRANDO	No identificado	Ninguno
2961	13027	PAREDONES	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	JEQUETEPEQUE	SAN PABLO	SAN BERNARDINO	741,166	9,204,566	17	PSAD56	010273204 060002396	LUMINOSA NUMERO 2A SAN BERNARDINO TRES	GADNA TAFUR, SEGUNDO LORENZO S.M.R.L. INCOGNITA 2005 TERAN VIGO, HILDEBRANDO	No identificado	Ninguno
2962	13028	PAREDONES	RESIDUO MINERO	DESMONTE DE MINA	JEQUETEPEQUE	SAN PABLO	SAN BERNARDINO	741,658	9,204,464	17	PSAD56	010273204 060002396	LUMINOSA NUMERO 2A SAN BERNARDINO TRES	GADNA TAFUR, SEGUNDO LORENZO S.M.R.L. INCOGNITA 2005 TERAN VIGO, HILDEBRANDO	No identificado	Ninguno
2963	13029	PAREDONES	INFRAESTRUCTURA	CAMPAMENTO S, OFICINAS, TALLERES	JEQUETEPEQUE	SAN PABLO	SAN BERNARDINO	740,814	9,205,051	17	PSAD56	03002115x01 060002396	OCCIDENTAL 1 SAN BERNARDINO TRES	GADNA TAFUR, SEGUNDO LORENZO S.M.R.L. OCCIDENTAL 2 DE CAJAMARCA	No identificado	Ninguno
2964	13030	PAREDONES	INFRAESTRUCTURA		JEQUETEPEQUE	SAN PABLO	SAN BERNARDINO	740,660	9,205,133	17	PSAD56	03002115x01 060002396	OCCIDENTAL 1 SAN BERNARDINO TRES	GADNA TAFUR, SEGUNDO LORENZO S.M.R.L. OCCIDENTAL 2 DE CAJAMARCA	No identificado	Ninguno
2965	13031	PAREDONES	RESIDUO MINERO	RELAVES	JEQUETEPEQUE	SAN PABLO	SAN BERNARDINO	740,567	9,205,045	17	PSAD56	03002115x01 060002396	OCCIDENTAL 1 SAN BERNARDINO TRES	GADNA TAFUR, SEGUNDO LORENZO S.M.R.L. OCCIDENTAL 2 DE CAJAMARCA	No identificado	Ninguno
2966	13032	PAREDONES	RESIDUO MINERO	RELAVES	JEQUETEPEQUE	SAN PABLO	SAN BERNARDINO	740,342	9,204,545	17	PSAD56	010273204 03002115x01 060003195	LUMINOSA NUMERO 2A OCCIDENTAL 1 OCCIDENTAL CUATRO	S.M.R.L. INCOGNITA 2005 S.M.R.L. OCCIDENTAL 2 DE CAJAMARCA TERAN VIGO, HILDEBRANDO	No identificado	Ninguno

Fuente: (Ventanilla Virtua-MEM, 2015)

- Según Isla, (2015) a nivel de la minería, los pasivos ambientales: “ son instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras abandonadas e inactivas en la actualidad y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema y la propiedad.

Figura 2: Actividad minera y sus efectos.



Fuente: Elaboración de los investigadores

- Características de los pasivos ambientales mineros en la región Cajamarca

- Como indica Grufides, (2015) hace mención. “Si analizamos las características de los pasivos ambientales de la región Cajamarca, podemos observar que la mayoría de los pasivos son, o bien bocaminas (449) o desmontes de minas (376), en menor medida hay trincheras, tajos, relaves, chimeneas, campamentos y oficinas y otros.”

2.2.2.1.1 Relaves Mineros

- Según Diamire, (2014) 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”

- Como menciona Minas, Publicaciones DGAAM, (2008). Se definen como el deshecho mineral sólido de tamaño entre arena y limo provenientes del proceso de concentración que son producidos, transportados o depositados en forma de lodo. Note que esta definición excluye otras formas de desechos mineros producidos en forma sólida.”

Dichos relaves mineros se convierten en suelos contaminados por metales pesados, por ende en infértiles: pero con un tratamiento se puede recuperar y aprovecharlo, es así que en esta investigación demostraremos la remoción de plomo del relave minero de paredones.

2.2.3. Suelos

- Según (wikipedia, 2016) menciona que: Se denomina suelo a la parte superficial de la corteza terrestre, biológicamente activa, que proviene de la desintegración o alteración física y química de las rocas y de los residuos de las actividades de seres vivos que se asientan sobre ella.

Son muchos los procesos que pueden contribuir a crear un suelo particular, algunos de estos son: la deposición eólica, sedimentación en cursos de agua, meteorización, y deposición de material orgánico.

2.2.3.1. Importancia del suelo

El suelo es aquello que pisamos, cultivamos, construimos, explotamos; es una parte importante para el desarrollo de la vida en muchos aspectos. La importancia del suelo es debido a las funciones que desempeña el medio ambiente y la socio economía.

2.2.3.2. Tipos de suelos y sus características

Los tipos de suelos que existen y sus características, porque nos servirá para nuestro estudio, ya que para el proceso de electrorremediación tendremos que tener en cuenta el tipo de suelo a tratar, al igual que para cualquier tipo de cierre de minas, es de vital importancia caracterizar el tipo de suelo a trabajar.

- Suelos arcillosos:

“ Formados fundamentalmente por arcilla. Es un tipo de suelo que, cuando está húmedo o mojado, resulta pegajoso pero, cuando está seco es muy fino y suave dado que la arcilla está formada por partículas diminutas de menos de 0.005 milímetros de diámetro. Son muy impermeables dado que no dejan pasar el agua o el aire, todo ello propicia que sean suelos donde el agua se estanque con facilidad por lo que en este tipo de suelo se necesita realizar un sistema de drenaje adecuado porque, después de las lluvias el agua queda retenida en la superficie. Presentan un color marrón oscuro. Los suelos arcillosos, al secarse, quedan muy compactos y duros y se caracterizan por la aparición de grietas. La ventaja principal es que son suelos que conservan fácilmente la forma que se le da al trabajarlos. (Jorge F., 2001)
- Suelos limosos:

“Son suelos que contienen una proporción muy elevada de limo. Es un tipo de suelo muy compacto, sin llegar a serlo tanto como los arcillosos. Estos suelos resultan de la sedimentación de materiales muy finos arrastrados por las aguas o depositados por el viento. Suelen presentarse junto a los lechos de los ríos y son muy fértiles. Se trata de suelos limosos porque, al igual que los arcillosos, permiten formar bolas aunque estas se rompen con facilidad. A diferencia de los arcillosos no permiten formar cintas entre los dedos (Jorge F., 2001)”
- Suelos arenosos:

“El suelo arenoso está formado principalmente por arena. La arena son partículas pequeñas de piedra de carácter silicio con un diámetro entre (0.02 y 2) mm. A diferencia de la arcilla cuando esta húmeda o mojada no se engancha. Los suelos arenosos no retienen el agua que rápidamente se hunde a capas más profundas. Son suelos considerados secos en donde hay muy poca humedad. A diferencia de los suelos anteriores requieren un riego continuo y un trabajo constante para darle una forma determinada porque la pierden con facilidad. Presentan colores claros. Sabemos que se trata de este tipo de suelo porque al coger un poco de él entre los dedos, somos incapaces de formar una bola. Este tipo de tierra, por mucho que lo

manipulemos, seguirá estando suelto. Suelos margosos: El suelo margoso es un suelo compuesto de arcilla, limo y arena con abundante cantidad de materia vegetal descompuesta (humus). Se trata de un suelo que presenta un color oscuro poco apelmazado y ligero. Podríamos decir que presenta las características positivas de los tres suelos anteriores: mantiene la suficiente humedad pero, al mismo tiempo, permite la permeabilidad hacia las capas inferiores. Es el tipo de suelo preferido por los jardineros (Jorge F., 2001).”

- Suelos gredosos:

“Un suelo gredoso es aquel que procede de la descomposición de las cretas o piedras calizas que contienen mucho carbonato cálcico. Es un tipo de tierra ligero y con un buen drenaje. Presenta un color marrón claro o blanquecino. - Suelos pantanosos: Se considera que un suelo es pantanoso a aquel que se ha formado en lugares que se encuentran habitualmente inundados. Son suelos que tienen muy poca riqueza mineral y con una acidez muy elevada. Su color es negro (Jorge F., 2001).”

2.2.3.3. Granulometría del suelo

Los residuos mineros tienen como características principales el tamaño de las partículas sólidas porque va a determinar sus posibilidades de aprovechamiento y recuperación. La granulometría va a depender de los procesos mineralógicos empleados para concentrar o extraer los minerales, por ejemplo en el caso carbón la separación por gravedad lleva consigo estériles más gruesos que la flotación. En operaciones con minerales de cobre, donde la recepción se hace por lixiviación, los residuos tienen una granulometría gruesa del tamaño de un grano de una grava. Por tanto, podemos decir que la granulometría de las partículas sólidas va a determinar el posible aprovechamiento o la calidad de los residuos.

2.2.3.3.1 Propiedades granulométricas de los relaves mineros

Tabla 3: Propiedades granulométricas de suelos.

Granulometría	% de paso	Calidad
Gruesos	0-15% menor de 74 ppm	Buenos
Medios	15-50% menor de 74 ppm	Generalmente buenos
Finos	50-80% menor de 74 ppm	Cuestionables
Limos	100% menor de 74 ppm y 25% menor de 200 ppm	Almacenados por presas convencionales.

Fuente: (Benites Mostacero R, 2015)

Figura 3: Clasificación de rocas sedimentarias por el tamaño de los clastos

según WENTWORTH			según DIN 4022	
Grano diámetro (mm)	Subdivisión	Denominación (roca)	Clasificación según DIN 4022	Grano diámetro (mm)
0,0002 mm	pelítica	Pelita	Arcilla	—
0,002 mm				
0,02 mm	psamítica	Psamita	Limo	fino 0,002 mm
0,2 mm				Arcilla fina gruesa
2mm	psefítica	Psefita	Arena	grueso 0,02 mm
2cm				Arena fina gruesa
20 cm	psefítica	Psefita	Gravas	fino 0,2 mm
				Grava fina gruesa
			Piedras	grueso 2mm
		Bloques		fino 6,3mm
				medio 20mm
				grueso 63mm

WG98/SED4022A.cdr

Fuente: (Rodríguez, 2001)

Figura 4: Tamaño de tamiz para los distintos tipo de suelos

Tamiz (ASTM)	Tamiz (N ch) (mm)	Abertura real (mm)	Tipo de suelo
3"	80	76,12	Grava
2"	50	50,80	
1 ½"	40	38,10	
1"	25	25,40	
¾"	20	19,05	
3/8"	10	9,52	
Nº 4	5	4,76	Arena gruesa
Nº 10	2	2,00	Arena media
Nº 20	0,90	0,84	
Nº 40	0,50	0,42	
Nº 60	0,30	0,25	Arena fina
Nº 140	0,10	0,105	
Nº 200	0,08	0,474	

Fuente: (wikipedia, 2016)

2.2.4. Contaminación del suelo con metales pesados

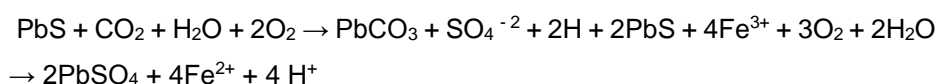
La principal contaminación por metales pesados es principalmente por la actividad minera, como se detalla a continuación.

“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 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.” (Jorge F., 2001).

2.2.4.1. 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 (PbCO₃) y la anglesita (PbSO₄). 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 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” (Jorge F., 2001).

2.2.5. Tecnologías para remediación de suelos contaminados por metales pesados

En la actualidad el desarrollo y la creación de nuevas tecnologías de remediación de suelos, principalmente para suelos de influencia minera, es de gran interés.

- Según menciona Volke V., (2005) en sus estudios: “Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras: con base en su estado de desarrollo (tradicionales e innovadoras), al lugar en donde se realizan (in situ y ex situ) y, en el caso de la contaminación por metales, con base en la alteración de propiedades del contaminante (separación/inmovilización o disolución/movilización).”

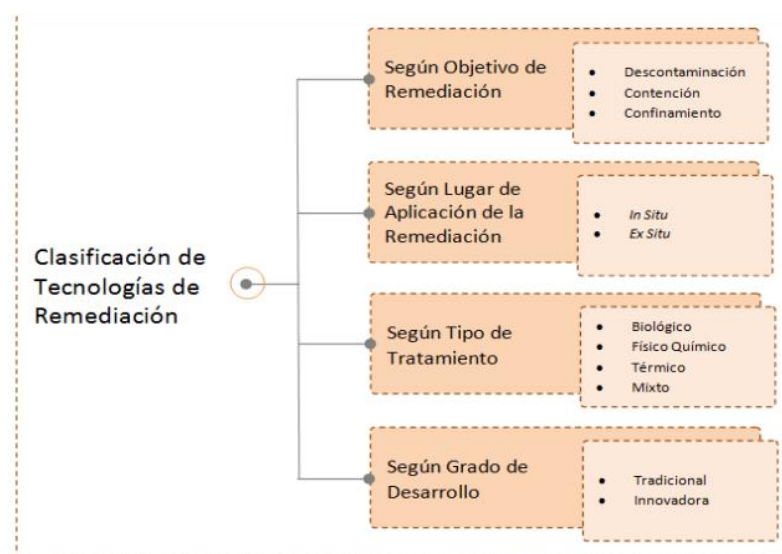
-Como expresa Perez.D, (2007) : “Dentro de este grupo de tecnologías destacan algunas como: Electrorremediación, arrastre de fluidos, extracción forzada con vapores, oxidación química y “landfarming”. En el caso de la electrorremediación, esta técnica ha demostrado su capacidad de remover algunos contaminantes orgánicos como tricloroetileno e hidrocarburos, ya sea en estudios de laboratorio, a nivel piloto y de campo, sin embargo, su principal aplicación ha sido en suelos contaminados con metales, para remover elementos como: cromo, cadmio, mercurio, plomo, manganeso, Zinc y Arsénico.” En nuestro estudio lo utilizaremos para la remocion de plomo.”

2.2.5.1. Clasificación de tecnologías para remediacion de suelos contaminados según al lugar donde se va a realizar

- Según Volke & J., (2002). “Las tecnologías de remediación pueden clasificarse de diferentes maneras, con base en los siguientes principios: (i) estrategia de remediación; (ii) lugar en que se realiza el proceso de remediación, y (iii) tipo de tratamiento. Es importante mencionar que cada una de estas clasificaciones proporciona diferente información acerca de las tecnologías de remediación.”

- Como expresa Volke V., (2005). “Existe una gran variedad de tecnologías de remediación, las cuales se pueden clasificar bajo distintos criterios: objetivo de la remediación, lugar en que se aplica el proceso de remediación y tipo de tratamiento utilizado. A continuación se muestra una tabla resumen para la clasificación de las tecnologías de remediación”

Figura 5: Clasificación de tecnologías de remediación.



Fuente: (Alcaino Concha, 2012)

En nuestra investigación la electrorremediación esta dentro del lugar de tratamiento (In situ). La clasificación de tecnologías para remediar suelos contaminados por metales (relaves mineros) han sido clasificados en función de la ubicación del suelo durante el tratamiento como son las siguientes:

- Técnicas in situ que se aplican directamente sobre el terreno.

Tabla 4: Tabla comparativa de tecnologías in situ para la remediación de suelos contaminados.

Parámetro	Electro-remediación	Arrastre de Fluidos	Extracción forzada con vapores	Oxidación Química	Landforming
Remoción de compuestos orgánicos	Ha demostrado ser eficiente para diversos compuestos orgánicos	Puede remover una cantidad limitada de compuestos orgánicos	Remueve sólo los que tengan una presión de vapor baja	No es muy efectiva para combustibles	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 toxicidad	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 materia orgánica)	Dependiendo del tipo de suelo puede requerirse la regeneración (fertilización y adición de materia orgánica)	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

Fuente: (Pérez.D, 2007)

- Técnicas ex situ. Donde es necesaria la excavación del suelo para ser tratado, dragado o cualquier otro proceso para remover el suelo contaminado antes de su tratamiento que puede realizarse en el mismo sitio (on site) o fuera de él (off site).

Tabla 5: Ventajas y desventajas de las tecnologías de remediación in situ y ex situ.

	In situ	Ex situ
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Permiten tratar el suelo sin necesidad de excavar ni transportar - Potencial disminución en costos 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor tiempo de tratamiento - Más seguros en cuanto a uniformidad: es posible homogeneizar y muestrear periódicamente
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Mayores tiempos de tratamiento - Pueden ser inseguros en cuanto a uniformidad: heterogeneidad en las características del suelo - Dificultad para verificar la eficacia del proceso 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesidad de excavar el suelo - Aumento en costos e ingeniería para equipos - Debe considerarse la manipulación del material y la posible exposición al contaminante

Fuente: (Volke & J., 2002)

2.2.5.2. Factores que influyen en el proceso de remediación

-Según menciona Volke V., (2005) que: “Antes de considerar la aplicación de cualquier tecnología de remediación, es fundamental conocer ciertas características, tanto del suelo (ambientales), como del contaminante y de los organismos vivos (plantas, hongos, bacterias, etc.) presentes en el sitio, con potencial metabólico para degradar los contaminantes”. De esta manera, los procesos de remediación dependen de estos factores que detallaremos a continuación.

2.2.5.2.1 Factores ambientales.

Dentro de los factores más importantes para la remediación de un suelo se encuentran las condiciones ambientales y las características

fisicoquímicas del suelo. Para mejor entendimiento detallamos a continuación los principales factores.

- **Temperatura.** Puede afectar propiedades del contaminante así como la velocidad de un proceso de biorremediación, ya que la velocidad de las reacciones enzimáticas depende de ésta.
- **Humedad.** Una alta humedad en el suelo puede provocar problemas durante la excavación y el transporte así como aumentos en los costos durante el uso de métodos de térmicos. La humedad también puede afectar los procesos de biorremediación debido a que, en general, aunque todos los microorganismos necesitan agua para subsistir, debe existir un balance, ya que si el contenido de agua es muy bajo, la actividad microbiana se detiene, y si es muy alto, disminuye el intercambio gaseoso a través del suelo.
- **Tipo de suelo.** La capacidad de retención de agua de un suelo varía en función de las fracciones orgánicas y minerales. En general, los materiales no consolidados (arenas y gravas finas) son más fáciles de tratar. Asimismo, a mayor tamaño de partícula en la fracción mineral, la permeabilidad y la aireación son mayores. La capacidad de retención de agua en un suelo aumenta proporcionalmente al contenido de materia orgánica. Un suelo con alto contenido húmico disminuye la movilidad de compuestos orgánicos y con ello la eficiencia de ciertas tecnologías, como el lavado de suelos.
- **pH.** El pH afecta la solubilidad y disponibilidad de macro y micronutrientes, la movilidad de metales y la reactividad de minerales. Generalmente, los metales son móviles a pH bajo, en forma de especies iónicas libres o como órgano-metales solubles; al pH alcalino forman carbonatos o fosfatos minerales insolubles.
- **Permeabilidad.** Se refiere a la facilidad o dificultad con la que un líquido puede fluir a través de un medio permeable. La permeabilidad de un suelo es uno de los factores que controla la efectividad de tecnologías in situ. En general, una baja permeabilidad en el suelo disminuye la efectividad de la mayoría de las tecnologías de remediación.

2.2.5.2.2 Características de los contaminantes

La naturaleza y características del contaminante es otra variable de suma importancia para el éxito o fracaso de un proceso de remediación. Dentro de las más importantes se encuentran: toxicidad, concentración, disponibilidad, solubilidad y sorción del contaminante a las superficies sólidas. Así detallamos a continuación.

- **Toxicidad.** El factor clave para decidir la remediación de un sitio es la toxicidad para los seres vivos. La descarga de químicos tóxicos a un suelo implica, entre muchos otros problemas, que son generalmente resistentes a la biodegradación. La biorremediación se inhibe si un químico es tóxico para organismos degradadores.
- **Concentración.** La concentración de un compuesto en un suelo es un factor de gran importancia para definir el uso de una tecnología de remediación en particular. En general, altas concentraciones inhiben la actividad microbiana; Algunos químicos pueden ser inhibitorios en baja concentración ($\mu\text{g g}^{-1}$ de suelo seco), mientras que otros pueden serlo en cantidades mayores ($\mu\text{g g}^{-1}$ de suelo seco).
- **Solubilidad.** Es la cantidad de un elemento o compuesto que puede disolverse en agua. Los químicos difieren significativamente entre sí en cuanto a su solubilidad en agua. En general, ésta disminuye al aumentar el tamaño de la molécula y los compuestos polares son más solubles que los no polares. Mientras mayor es la solubilidad de un compuesto, mayor es su biodisponibilidad.
- **Sorción.** La sorción de un químico a la matriz sólida del suelo afecta su solubilidad y su biodisponibilidad. La sorción incluye la adsorción (retención superficial) y la absorción (captación hacia el interior de la matriz). Los cationes generalmente son sorbidos en sitios de intercambio catiónico en minerales arcillosos o superficies húmicas, mientras que los compuestos aniónicos y no iónicos quedan sorbidos en la materia orgánica. La sorción de un contaminante a las partículas del suelo puede no sólo provocar la falta de biodisponibilidad, sino que también dificultar su extracción química.

- Volatilidad. Es la tendencia de un compuesto o un elemento para moverse de una fase líquida o sólida a una gaseosa. Entre los metales, el mercurio y el Selenio tienen formas volátiles.
- Polaridad y carga iónica. Los compuestos no polares tienden a ser hidrofóbicos y se concentran en la materia orgánica del suelo. Los compuestos no polares generalmente tienen menor movilidad en el suelo que los polares. La carga iónica determina la capacidad de un compuesto para su adsorción en un sólido.

2.2.6. Electrorremediación

2.2.6.1. Definición de Electrorremediación:

- Según Perez.D, (2007) 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”
- Como expresa G.I., (2012): “Electrorremediación es una técnica, es del tipo de descontaminación, generalmente aplicada In Situ y de tratamiento fisicoquímico. La remediación electrocinética es un método para descontaminar suelos que contienen metales pesados y compuestos polares orgánicos mediante el paso de una corriente directa a través del suelo”.
- Como menciona Alcaino Concha, (2012): “Esta técnica es del tipo de descontaminación, generalmente aplicada In Situ y de tratamiento fisicoquímico. La remediación electrocinética es un método para descontaminar suelos que contienen metales pesados y compuestos polares orgánicos mediante el paso de una corriente directa a través del suelo”
- Según Garcia Hernández & Vargas Ramirez, (2011) definen su concepto como: “Electrorremediación, es una tecnología emergente y promisoría que

aprovecha las propiedades conductivas del suelo, cuyo objetivo es separar y extraer contaminantes orgánicos e inorgánicos (metales) de suelos, lodos y sedimentos, con el uso de un campo eléctrico que permite remover las especies cargadas (iones). Implica la aplicación de una corriente directa de baja intensidad o potencial entre un electrodo positivo y uno negativo”

2.2.6.2. Objetivo de la Electrorremediación:

- Según menciona Perez.D, (2007) que el objetivo de la electrorremediación es: “Extraer metales pesados del suelo mediante el paso de una corriente directa a través del suelo, basada en los tres mecanismos descritos. En este caso la realización de esta técnica se enfocará a la remoción”.
- Según Alcaino Concha, (2012) aporta con un objetivo que detalla lo siguiente. “Extraer metales pesados del suelo mediante el paso de una corriente directa a través del suelo, basada en los tres mecanismos descritos. En este caso la realización de esta técnica se enfocará a la remoción de As y Cu.” En nuestra investigación será la remoción de plomo.
- Según Conocimiento, (2014) menciona que el unico objetivo de la electrorremediación es: “ Lograr la remoción del suelo contaminado en una fracción de tiempo, a condiciones controladas y con una mejor recuperación de suelos”

2.2.6.3. Fundamentos y sus principios basicos de la electrorremediación:

- Como expresa Laso, (2011) que: “El principio en que se basa la electrorremediación es la electrólisis, proceso en que las reacciones redox sólo tienen lugar si se les suministra energía por medio de una corriente eléctrica aplicada desde el exterior, que significa separación por electricidad. La electrólisis se realiza en las celdas electrolíticas, que son unos depósitos que contienen el electrolito disuelto o fundido y dos electrodos. Los electrolitos disueltos o fundidos conducen la corriente eléctrica por medio de los iones positivos y negativos, al mismo tiempo que se produce algún cambio químico en los electrodos. En cada electrodo de una celda electrolítica se produce una de las semirreacciones del proceso redox:
 - En el ánodo o electrodo positivo se descargan los aniones. Se produce la oxidación.

- En el cátodo o electrodo negativo se descargan los cationes. Se produce la reducción.

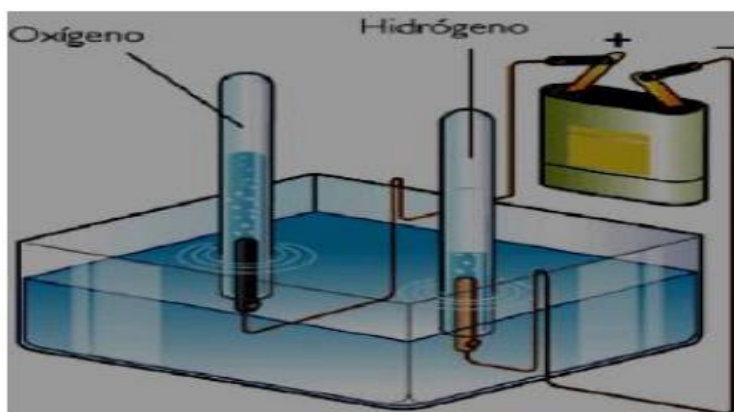
Un ejemplo importante de este tipo de proceso es la electrólisis del agua. El agua es una sustancia muy estable que se descompone en sus elementos mediante corriente eléctrica.

Figura 6: Electrólisis del agua, principio que se basa la electroremediación.

Corriente eléctrica Forzada



Fig. 2: Esquema de electrólisis del agua.



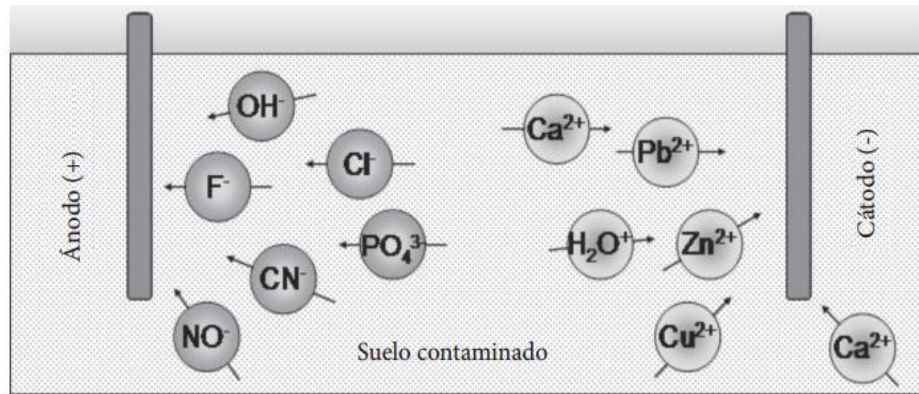
Fuente: (Laso, 2011)

La electrólisis del agua para producir hidrógeno y oxígeno se verifica al hacer pasar una corriente a través de una solución acuosa. Así, al cargar un acumulador de plomo o "pasarle carga" se producen mezclas potencialmente explosivas de H_2 y O_2 debido al flujo de corriente a través de la solución en la batería. Por eso es muy importante no producir una chispa cerca de ella al efectuar este proceso".

- De acuerdo a López R., (2013) menciona que la electroremediación se basa, como se detalla a continuación: "La Electroremediación de suelos se encuadra dentro de las tecnologías de tratamiento fisicoquímico in situ. Esta técnica de remediación engloba a diferentes procesos que tienen lugar en un suelo cuando se aplica una diferencia de potencial entre un conjunto de electrodos posicionados en el mismo. Estos procesos pueden ser de naturaleza física, electroquímica o electrocinética, y los principales son:
 - El calentamiento eléctrico, que tiene como consecuencia una elevación de la temperatura en el suelo, más importante en las proximidades de los

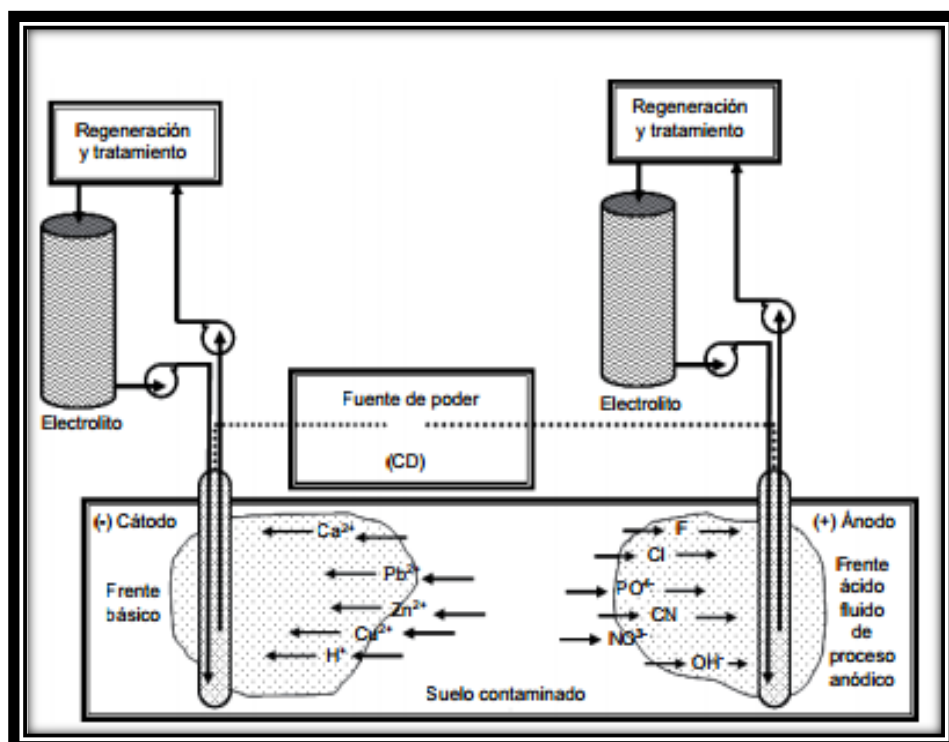
- electrodos, y que se produce debido de las caídas óhmicas generadas por las elevadas resistencias iónicas (baja conductividad iónica) del suelo.
- Procesos de electrolisis, que incluye a los procesos reactivos que ocurren sobre la superficie de los ánodos y cátodos que se han posicionado en el suelo, bien directamente o bien en el seno de una disolución de electrolito en contacto con dicho suelo. Los más importantes son la oxidación del agua sobre la superficie anódica, y la reducción del agua o la electrodeposición de metales sobre la catódica.
 - La electro migración, que consiste en el movimiento de los iones contenidos en el suelo, atraídos por los electrodos de signo opuesto, mediante la acción del campo eléctrico generado entre ánodo/s y cátodo/s.
 - La electroforesis, que consiste en el movimiento de las partículas cargadas contenidas en el suelo (o adicionadas para favorecer su tratamiento) por acción del mismo campo eléctrico.
 - La electroósmosis, que engloba al movimiento del agua contenida en el suelo. Esta agua puede ser el agua subterránea, o una disolución acuosa añadida al suelo para favorecer el movimiento de contaminantes en el interior del suelo. El movimiento del líquido depende principalmente de la naturaleza del suelo a tratar.”
- Según Volke V., (2005) 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. El campo eléctrico moviliza las especies cargadas hacia los electrodos, de manera que los iones metálicos, el amonio y los compuestos orgánicos cargados positivamente se moverán hacia el cátodo, mientras que los aniones (cloro, cianuro, fluoruro, nitratos y compuestos orgánicos cargados negativamente) se moverán hacia el ánodo. 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 7: Esquematación de la migración de dichas especies cargadas durante el proceso de electroremediación.



Fuente: (Volke V., 2005)

Figura 8: Esquema básico del proceso de electroremediación.



Fuente: (Pérez.D, 2007)

- Como expresa Alcaino Concha, (2012) "la electroremediación se basa en tres principios: la electro migración que es el transporte de iones metálicos por la atracción del electrodo cargado negativamente; la electroósmosis, que es el

movimiento de moléculas de agua desde el ánodo al cátodo durante la electrolisis y la electroforesis que es el movimiento de partículas cargadas bajo una corriente eléctrica”

2.2.6.4. Ventajas de electrorremediación

- Según López R., (2013), menciona las siguientes ventajas:
 - Flexibilidad para su uso como método de remediación ex situ o in situ.
 - Aplicable a suelos de baja permeabilidad y heterogéneos.
 - Aplicable a suelos saturados y no saturados.
 - Aplicable a suelos contaminados con compuestos inorgánicos iónicos, metales pesados, radionucleídos y contaminantes orgánicos polares, así como en cualquiera de sus combinaciones.
 - Fácil integración con las tecnologías convencionales y tratamientos posteriores de los efluentes generados.

Tabla 6: Ventajas y limitaciones de la electrorremediación.

Ventajas	Limitaciones
Es una tecnología disponible comercialmente	No es aplicable en todo tipo de suelos
El contaminante puede separarse con facilidad del suelo, incluso en forma pura.	El suelo tratado pierde ligeramente su fertilidad
Es una alternativa eficiente para la remediación in situ de sitios contaminados con metales	Es necesario hidratar el suelo al menos 24 horas antes de iniciar el tratamiento
Se puede aplicar eficientemente en suelos arcillosos (poco permeables)	Valores extremos de pH y reacciones redox pueden disminuir su eficiencia y formar productos indeseables

Fuente: (Volke V., 2005)

2.2.6.5. Costos de la Electrorremediación:

- Según Pérez.D, (2007) menciona que: “dependen de factores como la cantidad de suelo a remediar, la conductividad del suelo, el tipo de contaminante, el tipo y construcción de los electrodos, la distancia entre electrodos y el diseño

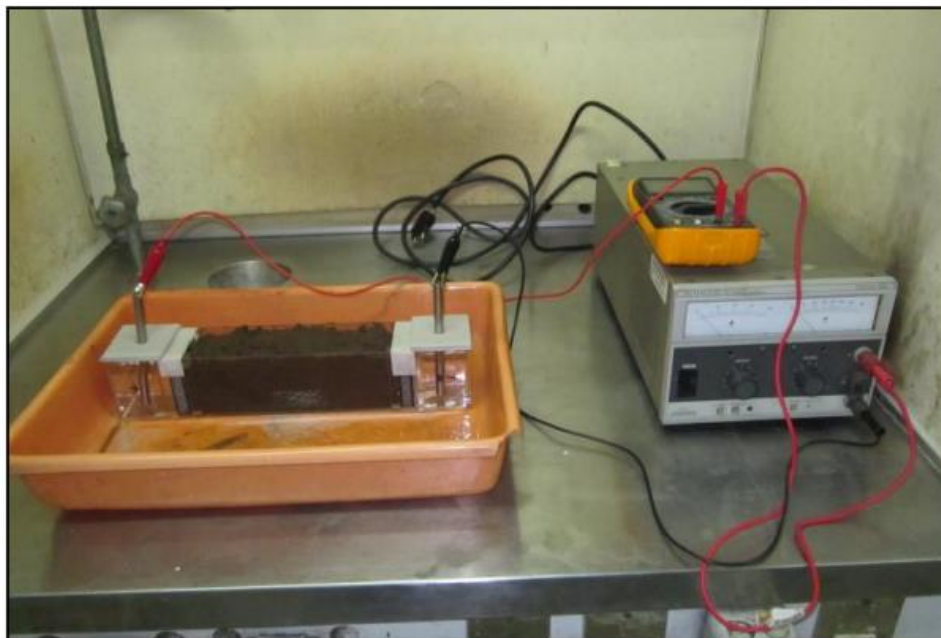
utilizado; sin embargo el factor que tiene un mayor impacto es el consumo de energía eléctrica. En Estados Unidos se estima que de manera general la tecnología de electrorremediación para extraer metales del suelo tiene un costo de tratamiento, de 50 dólares por metro cúbico con un consumo y costo de energía de 500 kWh/m³, de forma general la electrorremediación ha demostrado su aplicación exitosa en campo, aunque de manera restringida debido a que cada caso representa un reto tecnológico único, el cual deberá de ser evaluado para seleccionar las tecnologías más adecuadas para su remediación”.

- Como menciona Volke V., (2005) que. “Depende de la extensión y profundidad del sitio contaminado, puede llevar de unas cuantas semanas hasta seis u ocho meses. Sus costos varían dependiendo de la extensión del terreno, del material de los electrodos, de la conductividad del suelo, de las metas propuestas para el tratamiento, y del costo de la energía se estiman gastos energéticos cercanos a 500 KW h/m³, dependiendo del espacio entre electrodos [1-1.5 m]. De acuerdo con estimaciones en los Estados Unidos, los costos directos por el tratamiento mejorado de metales (extracción y estabilización) pueden ascender a 50 dólares/metro cúbico.”

2.2.6.6. Diseño e implementación

- Según Alcaino Concha, (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 suelo, dos electrodos y contactos eléctricos. Además se contará con separaciones de papel filtro ubicadas entre la muestra de suelo y el electrodo. El compartimento para suelo puede contener una muestra de suelo de aproximadamente 1,4 kg. Los electrodos utilizados son de acero inoxidable 316, ya que es un material resistente a la oxidación y también accesible económicamente.”

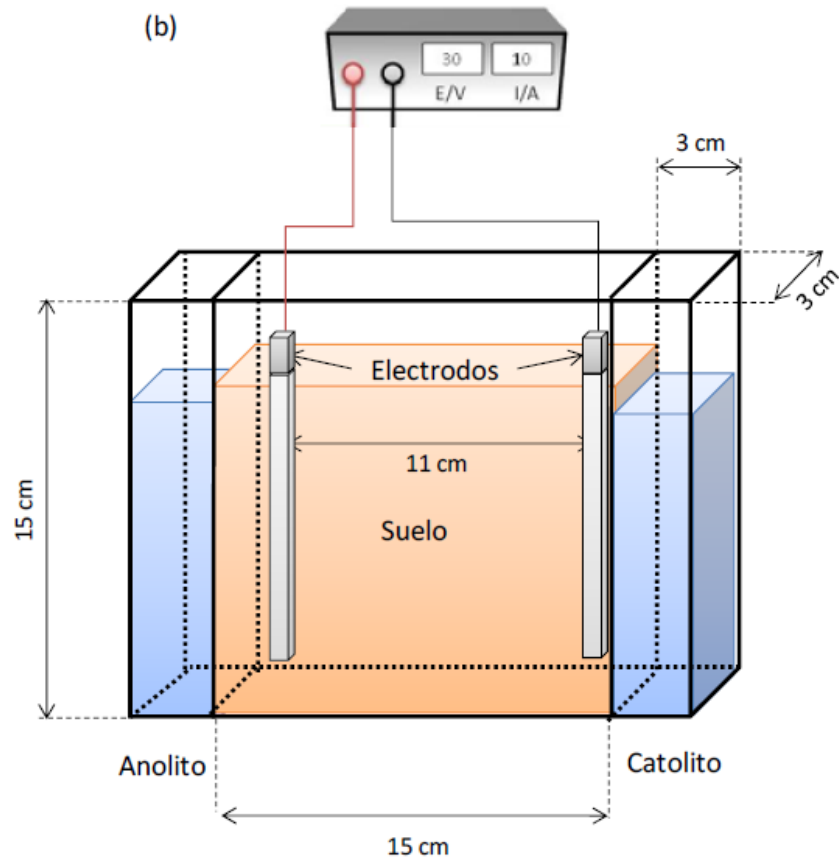
Figura 9: Sistema experimental de electroremediación.



Fuente: (Alcaino Concha, 2012)

- De acuerdo a López R., (2013) menciona que el diseño de la celda de electroremediación debe cumplir lo siguiente. “Las instalaciones experimentales a escala laboratorio están compuestas por un reactor electroquímico en el que los pozos de electrolítico tiene un volumen de 135 cm^3 mientras que el comportamiento destinado a posicionar el suelo tiene un volumen util de 675 cm^3 . en esta instalacion, los electrodos se encuentran insertados directamente en el propio suelo en una posición muy cercana a los pozos de electrolítico. Los electrodos, tanto ánodos como cátodos, son barras de grafito que se introducen sin ninguna separación física tanto en los electrodos como en el propio suelo. La corriente eléctrica se suministra mediante una fuente de alimentacion DC Power Suupply FA-376promax. el intervalo de trabajo de la fuente es de 0 A 30 Voltios para el potencial (precisión 0.1Voltio) y de 0 a 5 Amperios para la intensidad (precisión 0.01Amperios). la intensidad de corriente eléctrica se monitoriza empleando un multímetro digital de alta precisión KEITHLEY.”

Figura 10: Diagrama de instalaciones experimentales a escala de laboratorio de electroremediación de suelo.



Fuente: (López R., 2013)

“Los electrodos se posicionan en pozos de electrolito semipermeables, con el objetivo de facilitar la extracción de los efluentes generados en el proceso” (López R., 2013).

2.2.7. Densidad de corriente

2.2.7.1. Definición densidad de corriente

- Según Wikipedia, (2015). “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 como:

$$I = \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}$$

Donde:

- I es la corriente eléctrica en amperios A
- J es la densidad de corriente en $A \cdot m^{-2}$
- S es la superficie de estudio en m^2

2.2.8. Ácido acético

2.2.8.1. Definición ácido acético

- De acuerdo a wikipedia, (2016). “El ácido acético, ácido metilcarboxílico o ácido etanoico, se puede encontrar en forma de ión acetato. Éste es un ácido que se encuentra en el vinagre, siendo el principal responsable de su sabor y olor agrios. Su fórmula es CH_3-COOH ($C_2H_4O_2$). De acuerdo con la IUPAC se denomina sistemáticamente ácido etanoico.”

2.2.8.2. Usos e intereses

- Como mencionan Hernández & Vargas Ramirez, (2011). “ Ácidos como el acético, puede utilizarse en el cátodo para neutralizar los hidroxilos generados por la reducción electrolítica del agua. La ventaja del ácido acético es que permite despolarizar los iones hidroxilo generados por el proceso de reducción catódica, además muchos acetatos metálicos son altamente solubles”
- Según wikipedia, (2016). “Es de interés para la química orgánica como reactivo, (García Hernández & Vargas Ramirez, 2011) para la química inorgánica como ligando, y para la bioquímica como metabolito (activado como a también es utilizado como sustrato, en su forma activada, en reacciones catalizadas por las enzimas conocidas como acetil transferasas y, en concreto, histona acetiltransferasas.”
- Como expresan García Hernández & Vargas Ramirez, (2011) “Se obtuvo remoción de pb en todos los experimentos, con mejores resultados cuando se utilizó ácido acético como anolito y catolito, alcanzando una remoción del 12 % al final de las 24 horas de tratamiento.”

2.2.9. Diagrama de Pourbaix para la electroremediación

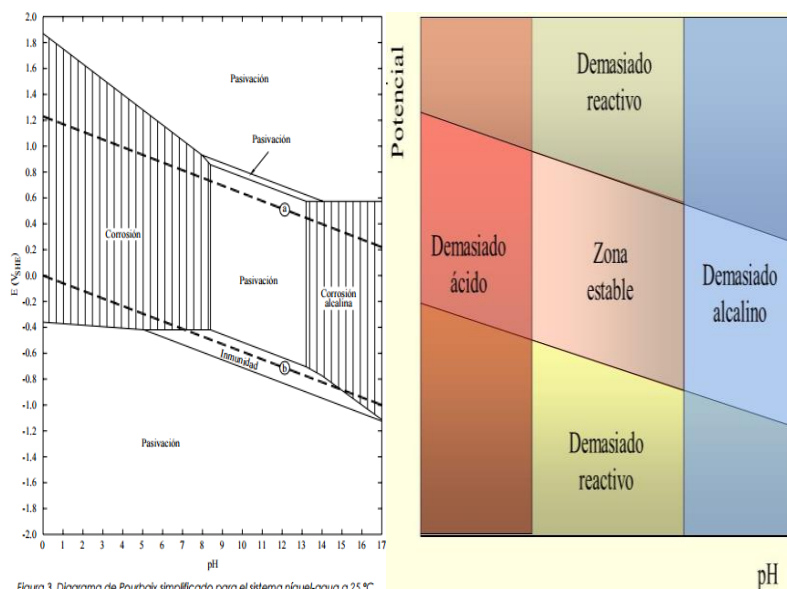
2.2.9.1. Definición diagrama de Pourbaix

- Como menciona Muñoz Portero, (1987). "Es una representación gráfica del potencial (ordenada) en función del pH (abscisa) para un metal dado bajo condiciones termodinámicas standard (usualmente agua a 25 °C). El diagrama tiene en cuenta los equilibrios químicos y electroquímicos y define el dominio de estabilidad para el electrólito (normalmente agua), el metal y los compuestos relacionados, por ejemplo, óxidos, hidróxidos e hidruros"
- Según Metalúrgia, (2012). "Los diagramas de Pourbaix también llamados diagramas de Potencial-pH se utilizan para ayudar en la predicción de los estados más estables de un metal, sus productos de corrosión, y sus iones asociados en una solución acuosa".

2.2.9.2. Características del diagrama de Pourbaix

- Según Muñoz Portero, (1987). "Encontramos tres tipos generales de líneas en los diagramas de Pourbaix, cada una representa un equilibrio entre dos especies"
 - Líneas horizontales. Indican reacciones con dependencia solamente del potencial.
 - Líneas verticales. Indican reacciones con dependencia solamente del pH.
 - Líneas oblicuas. Indican reacciones con dependencia tanto del potencial como del pH.

Figura 11: Diagrama de Pourbaix.

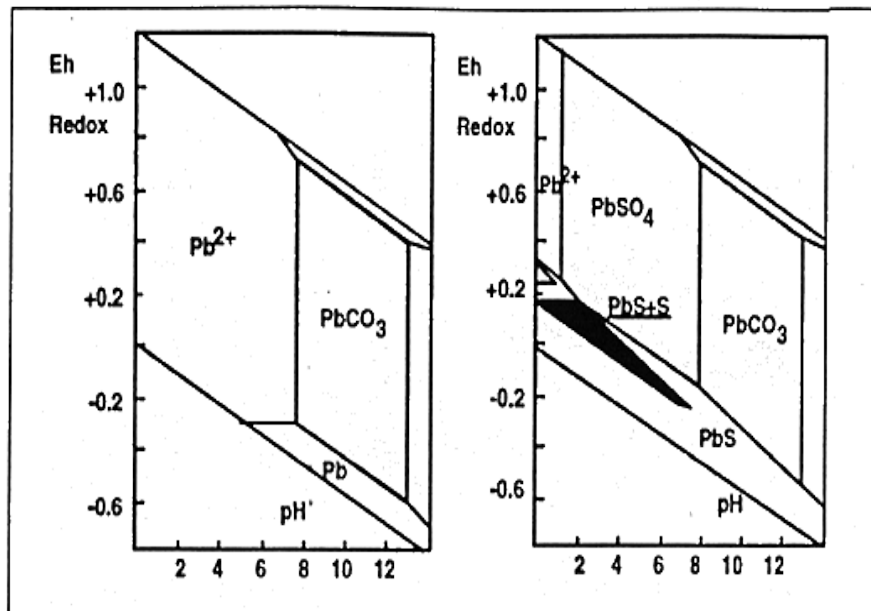


2.2.9.3. Usos del diagrama de Pourbaix

- Como menciona Muñoz Portero, (1987). “Los diagramas de Pourbaix son útiles en el campo de la corrosión, además de en otros muchos campos, tales como electrolisis industrial, recubrimiento, electroobtención y electrorefinado de metales, celdas eléctricas primarias y secundarias, tratamiento de aguas e hidrometalurgia, etc. Los diagramas de Pourbaix son particularmente útiles en el estudio del comportamiento frente a la corrosión de materiales metálicos, ya que permiten predecir las zonas de inmunidad, corrosión y pasivación de un metal en un medio agresivo determinado.”

2.2.9.4. Diagrama de purbaix del plomo

Figura 12: Diagrama de purbaix de plomo



Fuente: (Salomons, 1993)

2.3. Hipótesis

La electroremediación en función de la densidad de corriente y la concentración del ácido acético, puede disminuir la concentración de plomo que existe en el relave de la mina de Paredones.

CAPÍTULO 3. GENERALIDADES

3.1. Ubicación:

La unidad minera Paredones se encuentra localizada enteramente en la comunidad de San Antonio de Cocha, distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, Departamento de Cajamarca.

Distrito:	San Bernardino
Provincia:	San Pablo
Region:	Cajamarca
Latitud Sur:	7° 11' 18.3" S (-7.18842890000)

Longitud Oeste: 78° 49' 23.3" W (-78.82312502000)

Altitud: 942 msnm

Coordenadas referencial: 0740351

9204526

3.2. Historia

La unidad minera paredones ha presentado desde el inicio y a lo largo de estos años la siguiente evolución.

Tabla 7: Evolución de las operaciones en minas Paredones.

EVOLUCION DE OPERACIONES MINA PAREDONES	
-	Se iniciaron los trabajos en la época del incaico.
-	Posteriormente lo trabajaron los españoles en la época de la conquista.
-	Posteriormente lo trabajaron portugueses.
1950-1968	Northern peru mining corporation.
1968- Hoy	La concesión lo tiene la empresa minera SMRL Occidental 2 de Cajamarca.

Fuente: (Benites Mostacero R, 2015)

3.3. Población

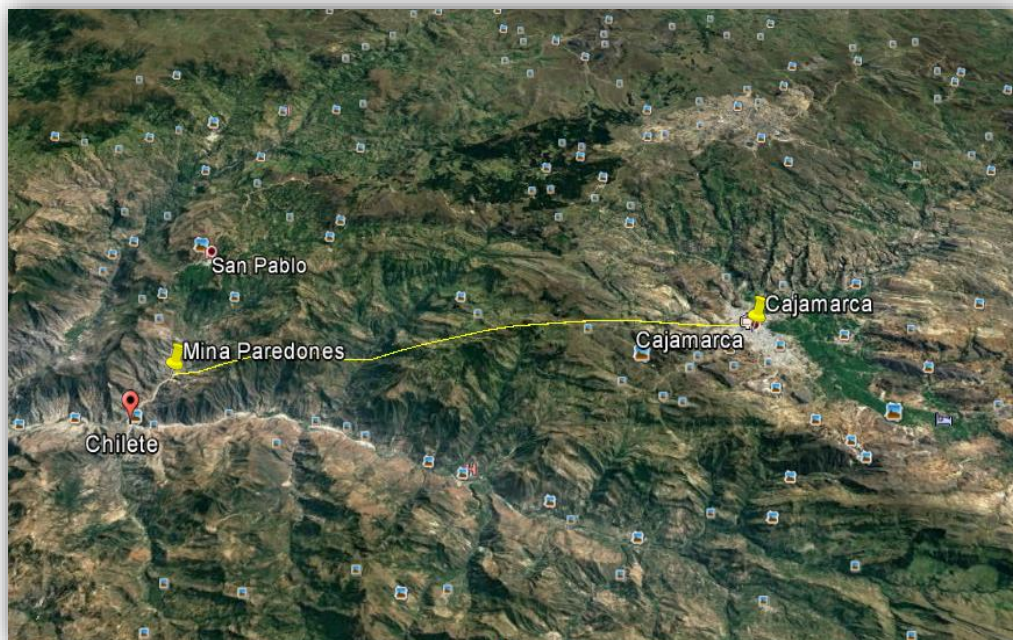
En el cerro de Paredones, practicamente no tienen población, solo su comunidad aledaña llamada San Antonio, dedicada al pastoreo de ovino y a la agricultura de la zona.

3.4. Accesibilidad:

El acceso a Paredones es por carretera afirmada, aproximadamente dos horas y media de Cajamarca. Se toma la carretera principal para ir a la costa hasta el distrito de Chilete, existe un desvío a unos cinco minutos del mismo (tomar la carretera a San Pablo-Kunturuasi) y a unos cuatro kilómetros aproximadamente se puede apreciar los pasivos ambientales de Paredones.

La distancia de Cajamarca a Paredones es de 48 kilómetros aproximadamente.

Figura 13: Ubicación Paredones.



Fuente: Elaboración de los investigadores

3.5. Recursos naturales

Paredones es albergado en la comunidad de San Antonio, distrito de San Bernardino.

La fauna de dicho lugar se compone de especies conocidas y comunes que los pobladores generalmente las crían (pastoreo de ovinos), los pobladores crían generalmente animales menores, incluyendo ganado vacuno y ovino. Además de éstas especies domésticas.

También se pueden encontrar las especies de la fauna local; como aves carroñeros (gallinazo cabeza negra o shingo), mamíferos y reptiles.

La flora típica de bosque seco, con algunas plantas de eucalipto, pero el mismo sitio de Paredones es un bosque cálido con abundante plantas denominadas por sus pobladores como puyas.

3.6. Geología

3.6.1. Geología regional

Estratigrafía:

Paredones se encuentra en la comunidad de San Antonio de San Bernardino; dicho "yacimiento de baja sulfuración se ubican a lo largo de una franja regional de mineralización relacionado al sistema estructural andino NW denominado corredor estructural San Pablo de Porculla" (Enriquez, Rodríguez, & R., 2006), exactamente en la parte sur.

En límite entre los depósitos de alta sulfuración y los de baja sulfuración parece estar asociado al nivel de erosión (Enriquez, 2005). Las franjas de epitermales hospedados en rocas volcánicas (Grupo Calipuy) tienen una clara orientación NW.

Este yacimiento se encuentra en la era cenozoica terciario, en el sistema Paleogeno, en la unidad estratigráfica del grupo Calipuy que cuenta con tres unidades (San Pablo, Chilete y tembladera) pero Paredones las rocas aflorantes pertenecen a Volcánico Chilete, tal como la detallaremos de la siguiente manera :

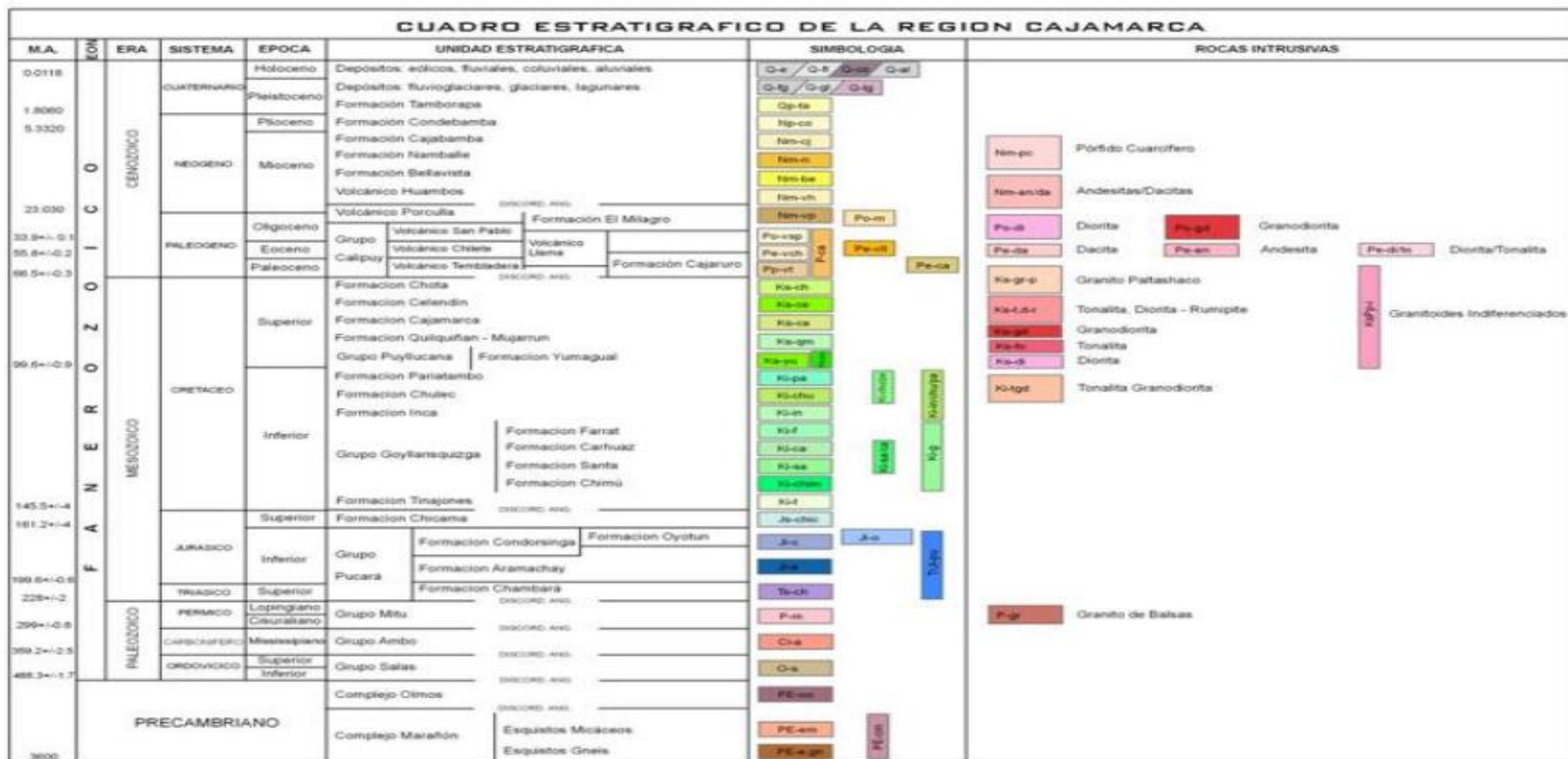
- Era: Cenozoica - terciario. "Se extiende hasta un millón de años antes de nuestros días. La intensa actividad orogénica dio origen a cordilleras tan importantes como los Andes, los Alpes y el Himalaya. Es la edad de los mamíferos, que si bien aparecieron en la era anterior, adquirieron en ésta mayor relevancia y una gran área de dispersión." (blog, 2010)
- Sistema: Terciario-Paleógeno
- Unidad estratigráfica: Grupo Calipuy
 - Volcánico San Pablo
Según Cruzado Vásquez & Crisólogo Rodríguez, (2009) menciona que su: "Extensión es 113,408.61 Ha. Esta unidad consiste en gruesos estratos de rocas volcánicas, intercaladas en la base con areniscas rojizas y en la parte superior de una espesa secuencia de aglomerados y piroclásticos bien estratificados. Alcanza un espesor de 900 m. El volcánico san pablo yace con suave discordancia erosional al volcánico Chilete e infrayace al volcánico Huambos en igual relación."
 - Volcanico Chilete
Como mencionan Cruzado Vásquez & Crisólogo Rodríguez, (2009) su "Extensión es 30,240.11. Litológicamente consiste de intercalaciones tobáceas, areniscas tobáceas, conglomerados lenticulares y materiales volcánicos, mayormente andesíticos, bien estratificados. La proporción

volcánica es mayor y presenta matices que van desde el verde- violáceo hasta el gris claro. Las areniscas son generalmente rojizas y muchas veces incluyen granos casi enteros de feldespatos. En la base los conglomerados son de cuarcita. El espesor del volcánico Chilete es aproximadamente de 800 m. Edad y correlación.- por ausencia de fósiles y datos radiométricos, y basándose en sus relaciones estratigráficas con las unidades infra y supra yacentes, la edad del volcánico Chilete es asignada al Paleógeno- Neógeno. Se correlaciona con los volcánicos que yacen discordantemente sobre la formación Casapalca, en la vertiente oriental de la cordillera occidental del centro del Perú.”

o Volcanico Tembladera

Según Cruzado Vásquez & Crisólogo Rodríguez, (2009) su “Extensión es 2,042.79 Ha. Se denomina volcánico Tembladera a una secuencia de rocas volcánicas moderadamente plegadas, bien estratificadas. Litológicamente la parte inferior se compone de bancos andesíticos que se intercalan con brechas de la misma naturaleza, con matices gris verdoso; hacia la parte superior abundan tobas blanquecinas estratificadas en capas delgadas, alternantes con delgados lechos de areniscas y lutitas tobáceas, verdosas o moradas. El grosor aproximado es de 1000 m. Edad y correlación.- en ausencia de datos paleontológicos y radiométricos, la edad del volcánico Tembladera puede definirse en base a sus relaciones estratigráficas. La unidad reposa en discordancia angular sobre las series cretáceas marinas en algunos lugares y en otros en probable discordancia paralela sobre la formación Huaylas del Paleógeno- Neógeno. Asimismo infrayace en discordancia angular al volcánico Chilete, por lo que el volcánico Tembladera debe corresponder a las primeras fases del vulcanismo del Paleógeno- Neógeno. Se correlaciona con la parte inferior de la serie volcánica Paleógeno- Neógeno del flanco Pacífico de la cordillera occidental del Perú central.”

Figura 14: Cuadro estratégico de la región de Cajamarca.



Fuente: (Cruzado Vásquez & Crisólogo Rodríguez, 2009)

3.6.2. Geología local

Mina paredones es un yacimientos epitermales del tipo baja sulfuración polimetálico en vetas (zinc, plomo, plata), por lo general solo se encuentran asociados a rocas volcánicas.

“Las rocas aflorantes son exclusivas del volcánico Chilete, cortadas por diques de andesitas y dacitas. Las vetas están emplazadas en el material volcánico y son del tipo de relleno de fractura, con algo de reemplazamiento, las rocas presentan una alteración hidrotermal con formación de calcita, andesita, clorita, sericita, epidota, albita y caolín. La mena explotada tuvo un contenido de galena, calcopirita y esfalerita.” (Cruzado Vásquez & Crisólogo Rodríguez, 2009)

- Mineralización

La mineralogía es de cuarzo, pirita, arsenopirita, andesita, esfalerita, galena, calcopirita y carbonatos-sulfatos, de acuerdo con las característica mineralógicas, el depósito de Paredones es un relleno hidrotermal de fisuras del tipo mesotermal a epitermal.

- Metales predominates en su mineralización

oro, plata , zinc , plomo y cobre.

- Roca encajonante

La roca encajonante es una roca intrusiva volcánica Andesita

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

4.1. Operacionalización de variables

– Variable independiente:

- Densidad de corriente (mA/cm^2)
- Concentración de ácido acético (molar).

– Variable dependiente:

- Disminución de plomo. (%)

Tabla 8: Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE 1: DENSIDAD DE CORRIENTE (Amp/cm²).

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Densidad de Corriente	“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.	$I = \int_S \mathbf{j} \cdot d\mathbf{S}$	J: Densidad de corriente. S: Superficie de estudio.	(mA/cm ²)

Fuente: Elaboración de los investigadores

VARIABLE 2: ÁCIDO ACÉTICO (molar)

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Acido acético	Ácido acético. También llamado ácido etanoico o ácido metilencarboxílico, es un ácido orgánico de dos átomos de carbono, se puede encontrar en forma de ion acetato, es de interés para la química orgánica como reactivo	CH ₃ -COOH C ₂ H ₄ O ₂ CH ₃ COOH	Concentración molar	mol/L

Fuente: Elaboración de los investigadores

VARIABLE 3: DISMINUCIÓN DE PLOMO

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES
disminución de plomo	Es reducir el porcentaje de plomo que existe en esta relavera, mediante el proceso de electrorremediación.	La reducción del porcentaje de concentración de plomo es una variable dependiente cuantitativa de medición directa en % a través de análisis químico.	Disminución de plomo	% de reducción de plomo

Fuente: Elaboración de los investigadores

4.2. Diseño de investigación

El tipo de Diseño de Investigación del presente trabajo de investigación es:

Experimental: Experimental puro:

Para la comprobación de la hipótesis de nuestra investigación, el modelo experimental a utilizar será bifactorial con tres niveles por variable independiente con un tamaño muestral de tres repeticiones para cada nivel.

Los tres niveles son de concentración de ácido acético de 0.001 M, 0.002 M y 0.003M interactuando con la densidad de corriente, se realizó tres pruebas para cada interacción.

La remoción de plomo, se obtiene de la recolección de datos correspondiente a cada una de las interacciones de la concentración de ácido acético y la densidad de corriente.

Donde tenemos lo siguiente: El modelo matricial aplicado a los diferentes niveles, se muestra a continuación:

Tabla 9: Modelo matricial para el experimento bifactorial.

	Y ₁			Y ₂			Y ₃			Y ₄		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
X ₁	M ₁₁₁	M ₁₁₂	M ₁₁₃	M ₁₂₁	M ₁₂₂	M ₁₂₃	M ₁₃₁	M ₁₃₂	M ₁₃₃	M ₁₄₁	M ₁₄₂	M ₁₄₃
X ₂	M ₂₁₁	M ₂₁₂	M ₂₁₃	M ₂₂₁	M ₂₂₂	M ₂₂₃	M ₂₃₁	M ₂₃₂	M ₂₃₃	M ₂₄₁	M ₂₄₂	M ₂₄₃
X ₃	M ₃₁₁	M ₃₁₂	M ₃₁₃	M ₃₂₁	M ₃₂₂	M ₃₂₃	M ₃₃₁	M ₃₃₂	M ₃₃₃	M ₃₄₁	M ₃₄₂	M ₃₄₃

Fuente: Elaboración de los investigadores

Donde:

M : Medición a efectuar.

X₁....X₃ : Concentración de ácido acético (M).

Y₁....Y₃ : Densidad de corriente (mA/cm²)

En el presente estudio se considera como:

Variable independiente

- Variable 1 : Densidad de corriente (Amp/cm²)
- Variable 2 : Concentración de ácido acético (mol)

Variables dependientes:

- Variable 1 : Disminución de plomo.

4.2.1. Tratamiento de datos

Para el análisis estadístico de cada una de las variables respuestas: disminución de plomo, se usará el análisis de varianza (ANVA) de los resultados obtenidos.

Análisis de varianza (ANVA)

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 del ácido acético evaluando en los datos observados.

Un análisis de la varianza permite determinar si diferentes tratamientos muestran diferencias significativas o por el contrario puede suponerse que sus medias poblacionales no difieren. El análisis de la varianza permite superar las limitaciones de hacer contrastes bilaterales por parejas que son un mal método para determinar si un conjunto de variables con $n > 2$ difieren entre sí. El primer concepto fundamental es que todo valor observado puede expresarse mediante la siguiente función:

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

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

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

Luego se busca el valor $F_{\alpha, V1, V2}$ de las tablas de distribución de Fisher, donde α es el grado de confiabilidad (0.05), $V1$ es el grado de libertad entre grupos y $V2$ es el grado de libertad entre niveles.

Entonces tendremos como resultados los siguientes parámetros:

- Si $F_0 > F_{\alpha, V1, V2}$ se acepta la hipótesis alternativa
- Si $F_0 < F_{\alpha, V1, V2}$ se acepta la hipótesis nula

4.3. Unidad de estudio

2 kilogramos de relave minero de la mina Paredones.

4.4. Población

6.40 millones de toneladas de relave minero, mina Paredones.

4.5. Muestra (muestreo o selección)

50 kilogramos de relave minero-Mina Paredones.

4.6. Métodos y técnicas

Una vez realizado los ensayos de electrorremediación, se enviará a analizar el porcentaje de plomo a un laboratorio certificado.

Para el análisis de los resultados se utilizara el analisis de varianza ANVA.

4.7. Procedimientos de recolección de datos

La recolección de datos, previos a las investigaciones teóricas, se realizaron de la siguiente manera.

Se revisó información primaria en los temas de remediación de suelos contaminados por metales y las tecnologías limpias que se pueden aplicar en el mismo sitio (sin ser trasladado), ya que, es un tema de vital importancia porque es el inicio de los conflictos sociales en nuestra región, tema aplicado al cierre de minas: obteniendo información de diversas fuentes, entre las que se destaca las tesis de doctorados, títulos de diferentes universidades, informes especializados, anuarios de empresas, artículos entre otros, como se menciona en la bibliografía.

- Se procedió a elegir el relave minero, en la región de Cajamarca, para poder aplicar lo teórico. (Mina Paredones).
- Se procedió a sacar una muestra representativa mediante una calicata, por lo cual se contactó al encargado de guardiania de dicha minas para que nos seda los permisos correspondientes.
- Se realizó una calicata de 1.5 m de largo × 1.0 m de ancho y 2.50 m de profundidad con coordenadas UTM (E 740259, N 9204151)

Tabla 10: Características de las calicatas.

Sistema	Aplicación al diseño de muestreo	Ventaja y desventajas
Calicatas	Suelo de superficie Suave, 0-100 cm	Barato, Facil para usar Capacidad de profundidad

Fuente: Los investigadores

- Se extrajo la muestra de unos 50 kilogramos aproximadamente.
- Se llevó al laboratorio para caracterizar el suelo, como granulometría, porcentaje de finos, contenido de humedad, pH.
- Se sacó el contenido de plomo presente en el relave.
- Se procedió a realizar la celda de electrorremediación para realizar los ensayos en laboratorio (Anexo 3 y 4).
- Luego se procedió a hacer los ensayos de electrorremediación en una celda de vidrio, como son los siguientes.
 - En nuestra investigación hemos utilizado el ácido acético como electrolítico, para que no surga una precipitación del plomo sino ayude a una remoción de plomo.
 - También se hizo un electrodo de referencia de sulfato de cobre, que tiene una función de medir el potencial (+6).
 - Hemos utilizado el diagrama de Pourbaix, el cual nos ayudará para estabilizar el plomo, de esta forma poder realizar la reacción del plomo en estado iónico.
- Después de hacer el proceso de electrorremediación cada muestra se envió a un laboratorio certificado para analizar el contenido de plomo.
- Una vez con los resultados del laboratorio se procedió a hacer los cálculos del porcentaje de disminución de plomo.
- Para validar y/o negar nuestra hipótesis y las variables de esta investigación hemos utilizado el método ANOVA.

4.8. Instrumentos

4.8.1. Equipos

- GPS.
- pH metro.
- Conductímetro.
- Balanza analítica.

- Fuente Poder.
- Cámara Fotográfica.
- Electrodo de referencia (sulfato de cobre).
- Equipo de protección personal.
- Computadoras e Impresoras.

4.8.2. Instrumentos:

- Material de escritorio.
- Palana.
- Pico.
- Wincha.

4.8.3. Materiales

- Cajas grandes para almacenar muestras.
- Bolsas plásticas.
- Vidrio.
- Tripley.
- Libreta de campo.
- Lápices.
- Espatula.
- Acero inoxidable.
- Cables.

4.8.4. Materiales de laboratorio

- Pipeta.
- Juego de tamices.

4.8.5. Reactivos

- Agua destilada.
- Ácido acético
- Sulfato de cobre.

4.9. Procedimientos de análisis de datos

4.9.1. Proceso experimental

Se aplicó un diseño EXPERIMENTAL, tipo BIFACTORIAL, donde las variables en estudio se muestran en la tabla 8 y la matriz de diseño se muestra en la tabla 9 y tabla 12.

Tabla 11: Niveles de las variables de estudio.

Variables independientes de estudio		Niveles de estudio
Factor (A):	Concentración molar ácida	X_1, X_2, X_3
Factor (B):	Densidad de corriente (mA/cm^2)	Y_1, Y_2, Y_3, Y_4
Variable dependiente de estudio		
Concentración de plomo (% de reducción)		

Fuente: elaboración de los investigadores

Tabla 12: Matriz de diseño experimental.

		DENSIDAD DE CORRIENTE (mA/cm^2)			
		% de Reducción plomo (mg/Kg)			
		Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
Concentración molar	X_1	M_{111}	M_{121}	M_{131}	M_{141}
		M_{112}	M_{122}	M_{132}	M_{142}
		M_{113}	M_{123}	M_{133}	M_{143}
	X_2	M_{211}	M_{221}	M_{231}	M_{241}
		M_{212}	M_{222}	M_{232}	M_{242}
		M_{213}	M_{223}	M_{233}	M_{243}
	X_3	M_{311}	M_{321}	M_{331}	M_{341}
		M_{312}	M_{322}	M_{332}	M_{342}
		M_{313}	M_{323}	M_{333}	M_{343}

Fuente: elaboración de los investigadores

$$\begin{aligned}\text{Número total de pruebas} &= (\text{N}^\circ \text{ de matriz}) * (\text{N}^\circ \text{ de Replicas}) + \text{Prueba Patrón} \\ &= (12) * (3) + 1 \\ &= 37\end{aligned}$$

Prueba (unidad de medida) = 200 gramos.

4.9.2. Cálculos de la densidad de corriente

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

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

Donde:

- El amperaje y voltaje nos da la fuente poder.
- Area del electrodo nos da midiento el electrodo pero solo la parte sumergida en la muestra. (como se muestra en el cálculo del área del electrodo).

4.9.3. Para el ácido acético

En nuestra investigación solo utilizemos tres cantidades de ácido acético como son 0.001, 0.002 y 0.003 molar. La cual sirve para acelerar el proceso de electrolisis (es decir sirve como un electrolítico)

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1. Tipo de materiales en la ejecución de los ensayos de electroremediación

Las consideraciones de los materiales usados en la construcción del reactor de electroremediación del relave, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 13: Materiales en la ejecución de los ensayos de electroremediación

Muestra	Relave Mina Paredones, Suelo Arenoso
Masa por ensayo	1.0 kg
Concentración inicial de plomo	1825.21 mg/kg
Tipo de reactor	Batch
Numero de electrodos por ensayo	02
Cátodo de celda	SS – AISI 304
Ánodo de celda	SS – AISI 304
Tamaño de electrodos	(10 * 10* 0.32) cm
Área sumergida de electrodos	10 * 7 cm ²
Tiempo de ensayo	24 horas
Parámetros de corriente (voltaje, amperaje)	Variable
Separación entre electrodos	12 cm
Solución anolito / catolito	Ácido acético
Concentración ácida de anolito/ catolito	Variable
Electrodo de referencia	Cobre / Sulfato de cobre
	Triplay

Fuente: elaboración de los investigadores

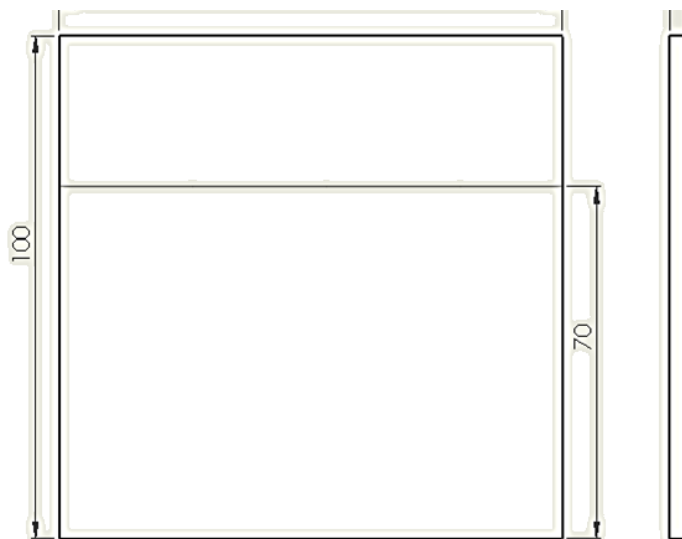
5.2. Establecimiento del diseño de la celda para los ensayos de electrorremediación

Para la evaluación de los ensayos de electrorremediación se empleó una celda construida en vidrio de 20 cm de largo, 10 cm ancho y 10 cm de altura, con una capacidad aproximada de 1 kg dentro de la celda se dispusieron soportes de vidrio que permitieron tanto la sujeción de los electrodos de material de acero SS – AISI 304 (3.2 mm de espesor, 10 cm x 10 cm de superficie) y la sujeción del material poroso (triplay húmedo). Además el establecimiento de tres zonas dentro de la celda, una central para colocación de la muestra (relave Paredones) previamente hidratada y dos periféricas para la colocación de soluciones electrolíticas (ácido acético) tal como se muestra en el anexo 1 y 2 de esta investigación o para un mejor entendimiento en el panel fotográfico (Fotografía 05: Reactor ensamblado para proceso de remediación de suelos utilizada en la presente investigación.)

5.3. Cálculo del área de los electrodos durante el método de electrorremediación

En la siguiente figura (16) se puede apreciar las medidas de los electrodos utilizados, siendo el área efectiva utilizada (área sumergida en la muestra) la siguiente: $10 \times 7 \text{ cm}^2$, lo que da un valor de 70 cm^2 , por electrodo, como se utilizaron dos electrodos por celda, eso significa que el área real expuesta por ensayo fue de 140 cm^2

Figura 15: Presentación del área del electrodo a utilizar para los cálculos



Fuente: Elaboración de los investigadores

5.4. Cálculos de la densidad de corriente durante el método de electrorremediación

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

Tabla 14: Densidad de corriente durante el método de electrorremediación.

Voltaje aplicado (V)	Amperaje registrado (mA)	Área de electrodos (cm ²)	Densidad de corriente (mA/cm ²)
10	813	140	5.81
15	1626	140	11.61
20	2440	140	17.42
25	3214	140	22.96

Fuente:Elaboración de los investigadores

5.5. Resultado del análisis granulométrico de la muestra- relave Paredones

Para poder identificar la muestra a tratar, primero identificamos que tipo de suelo es, para eso realizamos un ensayo granulométrico como se detalla a continuación.

Tabla 15: Valores de los pesos del ensayo granulométrico.

Malla	Peso malla	Peso malla + muestra
Nº 2"	538.98	538.98
Nº 1 1/2"	553.52	553.52
Nº 1"	546.77	546.77
Nº 3/4"	558.08	558.08
Nº 1/2"	542.29	542.29
Nº 3/8"	544.79	544.79
Nº 4	508.48	524.23
Nº 8	490.00	491.00
Nº16	413.49	416.56
Nº30	402.33	686.31
Nº50	369.05	1051.57
Nº100	346.05	807.42
Nº200	299.2	470.47
CIEGA	370.61	751.65

Fuente: Elaboración de los investigadores.

Tabla 16: Tabulación de los valores para obtener el % que pasa.



Fuente: Elaboración de los investigadores

Tabla 17: Tabulación de los valores para obtener el % que pasa.

ARENA					
TAMIZ Nº		PESO RETENIDO (gr.)	% PESO RETENIDO	% PESO RET. ACUM.	% PASA
Nº 2"		0	0.0	0.0	100
Nº 1 1/2"		0	0.0	0.0	100
Nº 1"		0	0.0	0.0	100
Nº 3/4"		0	0.0	0.0	100
Nº 1/2"		0	0.0	0.0	100
Nº 3/8"		0	0.0	0.0	100
Nº 4		15.75	0.8	0.8	99
Nº8		1.00	0.1	0.8	99
Nº16		3.07	0.2	1.0	99
Nº30		283.98	14.2	15.2	85
Nº50		682.52	34.1	49.3	51
Nº100		461.37	23.1	72.4	28
Nº200		171.27	8.6	80.9	19
Malla ciega		381.04	19.1	100.0	0

Fuente: Elaboración de los investigadores

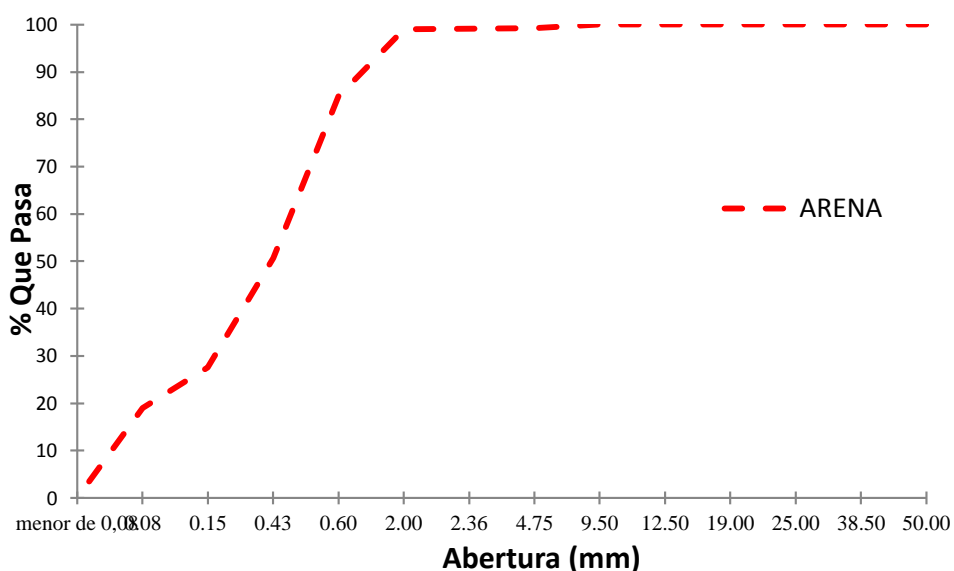
Tabla 18: Cantidades % que presenta en su composición la muestra.

Peso Inicial (gr)		
2000		
Comp. de la Muestra		
% Grava gruesa : de 80 a 40 mm (de 3" a 1 ½")	0.0	
% Grava Fina : de 40 a 20 mm (1 ½" a ¾")	0.0	
% Gravilla : de 20 a 10 mm (¾" a 3/8")	0.0	
% Grava arena : de 10 a 5 mm (3/8" a N° 4)	0.8	1
% Arena gruesa : de 5 a 2 mm (N° 4 a N° 10)	0.1	
% Arena media : de 2 a 0,50 mm (N° 10 a N° 40)	14.4	
% Arena fina : de 0,50 a 0,080 (N° 40 a N° 200)	65.8	80
% Limo - arcilloso:	19.1	19
Total	100	100

Tamaño máximo (TM)	
Tamaño máximo nominal (TMN)	
Módulo de Finura (MF)	1.40

Fuente: Elaboración de los investigadores

Tabla 19: Cantidades % que presenta en su composición la muestra.



Fuente: Elaboración de los investigadores

Nos da como resultado que nuestra muestra (Relave mina de paredones) es un suelo arenoso .

5.6. Resultado del plomo inicial del relave mina Paredones obtenido antes de los ensayos de electroremediación

Tabla 20: Resultado del plomo inicial del relave mina Paredones.

Muestra	Plomo mg/kg
M1	1825.21

Fuente: Elaboración de los investigadores

5.7. Resultados del plomo obtenidos después de la electrorremediación de suelo.

Tabla 21: Reporte de análisis de laboratorio de servicios a la comunidad e investigación de la Universidad Nacional de Trujillo después de la electrorremediación.

		DENSIDAD DE CORRIENTE (mA/cm ²)											
		5.81			11.61			17.42			22.96		
Concentración molar	0.001	1485.96	1498.68	1480.43	1390.38	1397.75	1407.05	1251.18	1257.20	1259.76	1143.55	1149.88	1168.13
	0.002	1450.25	1465.28	1459.07	1323.58	1330.21	1332.04	1179.63	1184.20	1186.20	1064.52	1080.52	1047.31
	0.003	1410.7	1424.76	1423.30	1261.65	1276.19	1268.16	1134.55	1166.67	1134.55	989.63	991.09	988.35

Contenido inicial = 1825.21 mg/kg

Fuente: elaboración de los investigadores

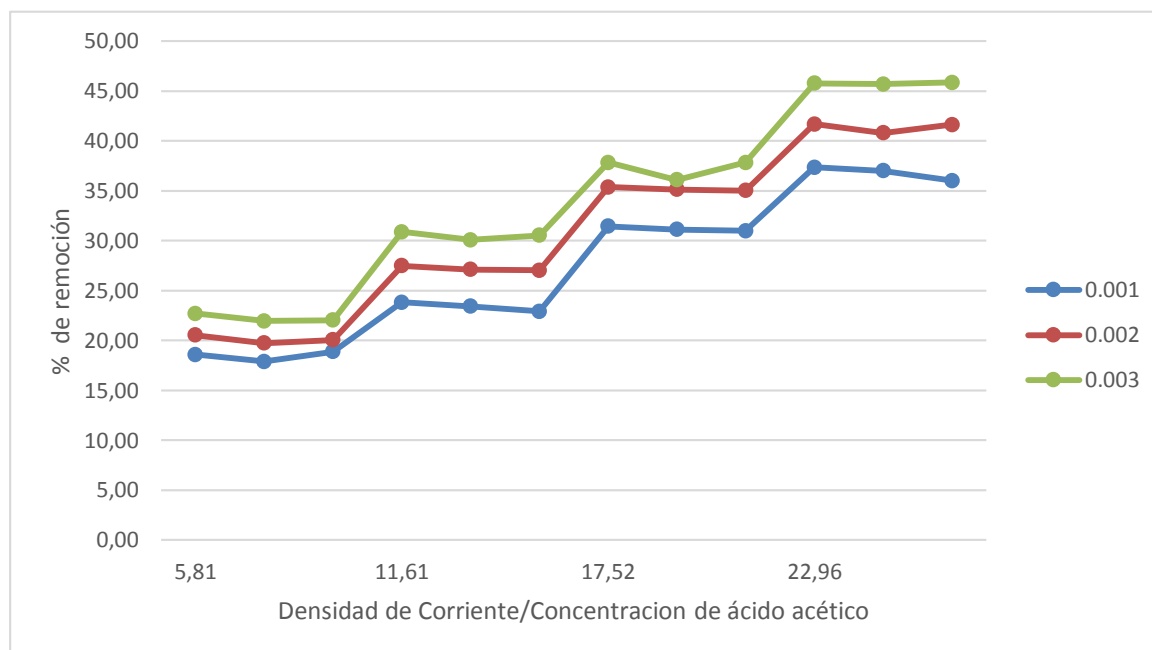
5.8. Resultado del cálculo de porcentaje de disminución de plomo

Tabla 22: Cálculo de remoción de plomo.

		Densidad de corriente											
		Porcentaje de Reducción											
		5.81 (X ₁)			11.61 (X ₂)			17.42 (X ₃)			22.96 (X ₄)		
Concentración molar	0.001 (Y ₁)	18.59	17.89	18.89	23.82	23.42	22.91	31.45	31.12	30.98	37.35	37.00	36.00
	0.002 (Y ₂)	20.54	19.72	20.06	27.48	27.12	27.02	35.37	35.12	35.01	41.68	40.80	41.62
	0.003 (Y ₃)	22.71	21.94	22.02	30.88	30.08	30.52	37.84	36.08	37.84	45.78	45.70	45.85

Fuente: elaboración de los investigadores

Tabla 23: Remoción de plomo con sus dos variables (ácido acético y densidad de corriente).



Fuente: Elaboración de los investigadores

5.9. Resultados de análisis de varianza (ANVA) para la remoción de plomo mediante electroremediación.

A continuación se presenta los resultados individuales de la concentración del ácido acético y la densidad de corriente para la remoción de plomo del relave mina Paredones.

Tabla 24: Análisis ANVA.

Factor	Densidad de corriente											
	5.81 (Y ₁)			11.61 (Y ₂)			17.42 (Y ₃)			22.96 (Y ₄)		
Concentración Ácido Acético	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0.001	18.59	17.89	18.89	23.82	23.42	22.91	31.45	31.12	30.98	37.35	37.00	36.00
0.002	20.54	19.72	20.06	27.48	27.12	27.02	35.37	35.12	35.01	41.68	40.80	41.62
0.003	22.71	21.94	22.02	30.88	30.08	30.52	37.84	36.08	37.84	45.78	45.70	45.85

Fuente: Elaboración de los investigadores

A continuación mostramos los resultados de las sumatorias de la concentración del ácido acético y la densidad de corriente:

Tabla 25: Sumatoria de ejes

Sumatoria Yi (Horizontal)	Sumatoria Yj (Vertical)	Sumatoria Yij (combinación)		
329.42	182.36	55.37	81.62	111.76
371.54	243.25	60.32	91.48	110.35
407.24	310.81	66.67	93.55	124.1
	371.78	70.150	105.5	137.33

Fuente: Elaboración de los investigadores

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

Tabla 26: Consideración para los cálculos.

Consideraciones para los cálculos	
N= Número de variables	36
a= Niveles del ácido acético	3
b= Niveles de densidad de corriente	4
r= Replicas	3
C = Y²/N	34114.090

Fuente: Elaboración de los investigadores

Asimismo la suma de cuadrados.

Tabla 27: Cálculos con sumatoria de cuadrados y comprobación de error.

Cálculos	
Y ² /N= Constante de corrección	34114.090
SSt= Sumatorias de los cuadrados de los tratamientos totales	2528.4738
SSa= Sumatorias de los cuadrados del ácido acético	252.9038
SSb= Sumatorias de los cuadrados de la densidad de corriente	2246.90518
Sssubtotales=	2522.669
Sse= Dispersión/ error	5.8048
SSab=	22.8600222
Conprobación del error	5.8048

Fuente: elaboración de los investigadores

Análisis de Varianza ANVA para la remoción de plomo.

Tabla 28: Tratamiento de las variables para la remoción de plomo

Fuente de Variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de Cuadrados	Fo	F α ,v1,v2
Tratamiento A (ácido acético)	2	252.904	126.45	522.82	3.40
Tratamiento B (densidad de corriente)	3	2246.905	748.97	3096.62	3.01
Interacción AB (ácido acético/densidad de corriente)	6	22.860	3.81	15.75	2.51
Error	24	5.805	0.24		
Total	35	2528.474			

Fuente: elaboración de los investigadores

Tabla 29: ANVA para la remoción de plomo

Fuente de variación	Fo
Tratamiento A (ácido acético)	522.82
Tratamiento B (Densidad de corriente)	3096.62
Interacción AB (ácido acético/ Densidad de corriente)	15.75

Fuente: elaboración de los investigadores

Utilizando la tabla de Fisher "F" nivel de significancia del 95%

Tabla 30: Valores según tabla de Fisher

F0	F α ,v1,v2	Resultado
FA	2;24	3.40
FB	3;24	3.01
FAB	6;24	2.51

Fuente: elaboración de los investigadores

Finalmente obtenemos como resultado:

Tabla 31: Resultados de hipótesis

F0	Fα,v1,v2	Resultado
522.82	3.40	Hipótesis alterna
3096.62	3.01	Hipótesis alterna
15.75	2.51	Hipótesis alterna

Fuente: elaboración de los investigadores

CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN

6.1. Caracterización del relave de Paredones

6.1.1. Metales presentes en el relave

Hacer un barrido de metales del relave minero es de vital importancia, para poder ver que porcentaje de plomo esta presente.

Para eso el siguiente cuadro menciona todos los metales y porcentaje de cada uno.

Tabla 32: Resumen de análisis geoquímico realizados en SGS.

RESUMEN DE ANÁLISIS GEOQUIMICO REALIZADOS EN SGS							
Au gr/tn	Ag Oz/tn	Cu %	Pb %	Zn %	S %	As %	Sb %
0.0001	0.28	0.07	0.18	0.33	7.22	0.07	0.02

Fuente: (Benites Mostacero R, 2015)

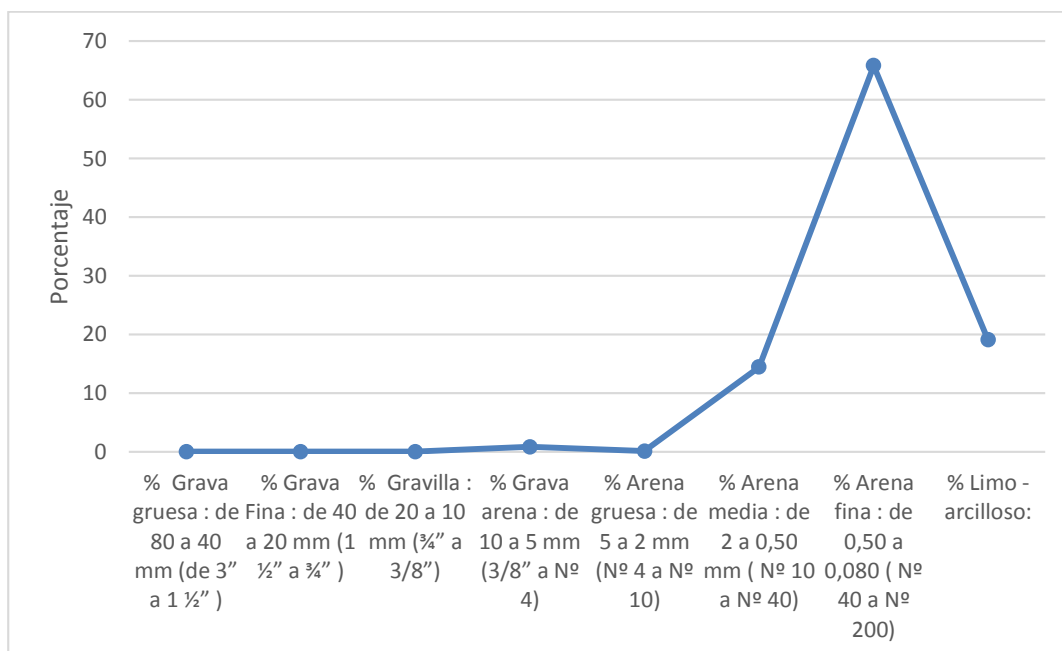
Los resultados de la tabla 30 muestran un porcentaje alto en azufre, zinc, plata y plomo. Para nuestra investigación nos centramos en el plomo.

Este resultado de porcentaje de plomo es similar al resultado obtenido por el laboratorio encargado por nuestra investigación 0.1859 %. Por ende se valida los resultados de la investigación que nos antecede.

6.1.2. Granulometría

Los relaves mineros tienen como característica principal el tamaño de las partículas sólidas porque va a determinar sus posibilidades de aprovechamiento y recuperación, la granulometria depende de los proceso metalúrgicos empleados para concentrar o extraer los minerales. En el caso del relave de Paredones es un relave arenoso, con un porcentaje de arena fina del 65.8%, como se puede apreciar en el siguiente grafico.

Tabla 33: Cantidades % que presenta en su composición la muestra.



Fuente: elaboración de los investigadores

Al obtener 65.8 % de arena fina según su calidad son cuestionables y favorecen la absorción de los contaminantes, por esta razón que los tratamientos de los suelos finos como los limos y las arcillas son mas complicados que los tratamientos para suelos de granulometría gruesa como las arenas y las gravas.

6.1.3. Contenido de humedad

El contenido de humedad para el proceso de electrorremediación es importante, porque indica cuanto de agua puede retener en los poros. Los resultados del ensayo nos arrojan un porcentaje de humedad de 8.40 % del relave minero, el cual nos indica la gran cantidad de absorción de agua que tiene a través de sus poros.

6.2. Para el tipo de materiales en los ensayos de electrorremediación

Los principales materiales que utilizamos en el proceso de electrorremediación se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 34: Materiales en los ensayos de electrorremediación.

Material	Descripción
Tipo de reactor	Vidrio
Cátodo de celda	SS – AISI 304
Ánodo de celda	SS – AISI 304
Solución anolito / catolito	Ácido acético
Electrodo de referencia	Cobre / Sulfato de cobre

Fuente: elaboración de los investigadores

- Se utilizó el reactor de material de vidrio ya que es mas fácil y efectivo para el proceso de electrorremediación, además de ser económico.
- Para el cátodo y el ánodo de la celda se utilizó barra de acero de 0.32 mm de espesor de marca SS-AISI304 (acero inoxidable tiene una gran resistencia al óxido, soporta la corrosión de los ácidos más oxidantes), este acero es inoxidable y al sumergirse en el área de la muestra del suelo no se oxida, la cual no dificulta el proceso de electrorremediación.
- En el caso de la solución electrolítica o solución anolito y catolito se utiliza el ácido acético para poder neutralizar los hidroxilos generados por la reducción electrolítica del agua. La ventaja del ácido acético es que permite despolarizar los iones hidroxilo generados por el proceso de reducción catódica, además muchos acetatos metálicos son altamente solubles. También ayuda a una mejor remoción de plomo. Cabe resaltar que el ácido acético ayuda a que no se precipite el plomo sino migre al costado (polo negativo o cátodo)
- Para el caso del electrodo de referencia lo utilizamos para concordar con el diagrama de Pourbaix del plomo, ya que el plomo tiene que estar en la zona estable para que pueda removerse. Nos brindará la información como el potencial y el pH del plomo. Una vez estando en la zona estable empieza el proceso de migración, utilizamos el sulfato de cobre porque es mas económico.

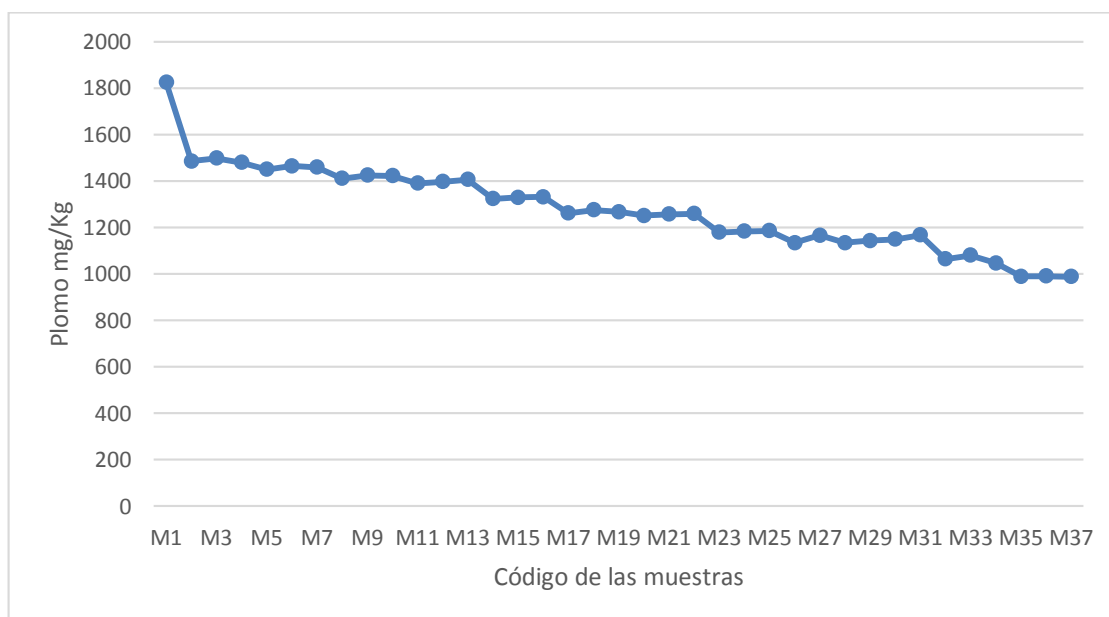
6.3. Para los resultados de remoción de plomo

En el resultado de los análisis de los ensayos, podemos mencionar que se realizaron 36 experimentos para evaluar el contenido de plomo, como podemos apreciar en el resultado 5.1 Certificado de los ensayos de electroremediación del relave mina Paredones.

Empezamos con una la primera muestra (M1) que nos indica que existe 1825.21 mg/kg de plomo presente en la muestra de relave. Este valor es antes de ser tratado por el proceso de electroremediación (Resultado 5.1).

Como se puede apreciar en la Tabla N° 20 – Resultado del plomo inicial del relave mina Paredones obtenido antes de los ensayos de electroremediación y en el resultado 5.1 certificado de los ensayos de electroremediación del relave mina Paredones, con código M1.

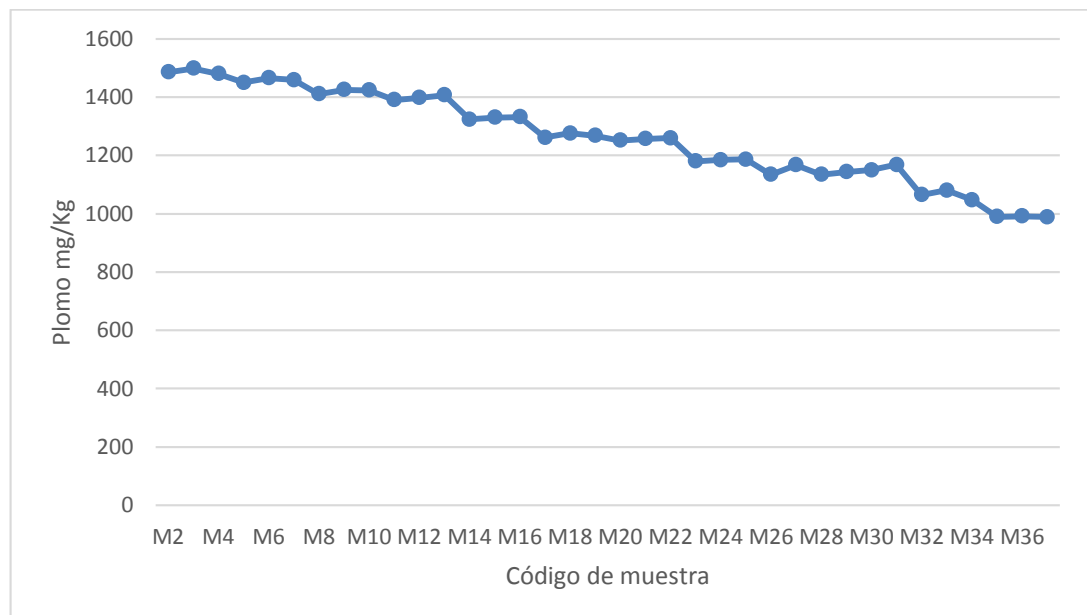
Tabla 35: Remoción de plomo según los ensayos, con muestra inicial y luego del proceso de electroremediación



Fuente: elaboración de los investigadores

En la Tabla N° 34 – (Remoción de plomo según los ensayos, con muestra inicial y luego del proceso de electroremediación). Podemos observar que la muestra inicial (M1), contiene una cantidad de plomo de 1825 mg/kg; y aplicando la técnica de electroremediación en base a la densidad de corriente y concentración de ácido acético; se llega a disminuir la concentración de plomo como se observa en muestra (M37) que es de 989 mg/kg.

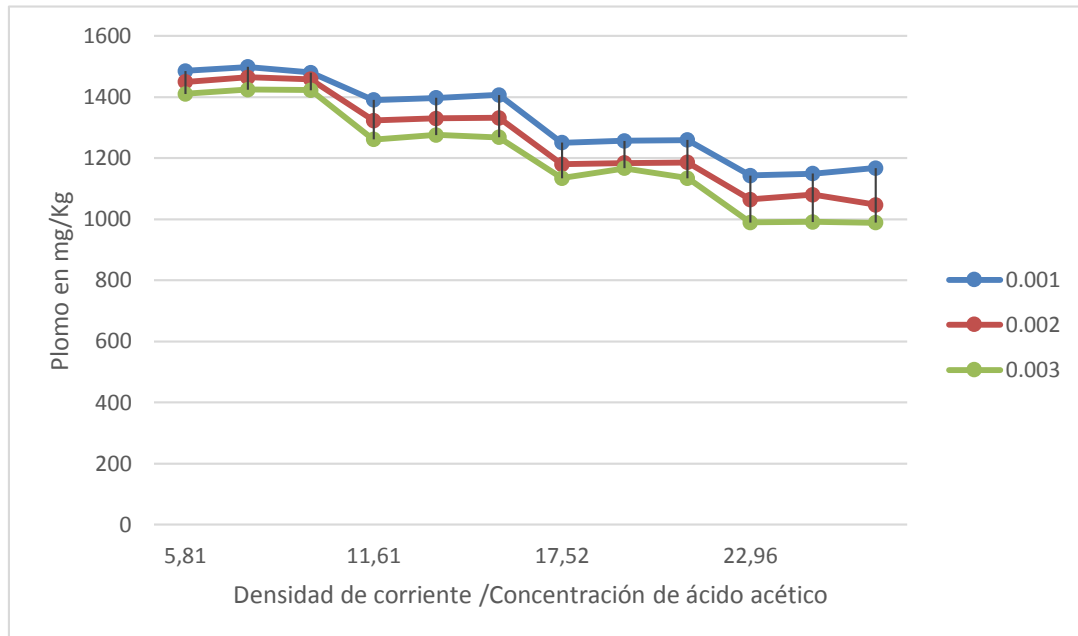
Tabla 36: Resultado de remoción de plomo despues de los ensayos de electrorremediación



Fuente: elaboración de los investigadores

Según tabla 35 (Resultado de remoción de plomo despues de los ensayos de electrorremediación). Teniendo en cuenta la segunda muestra (M2) (1485.96 mg/kg de plomo en el relave) ,esto nos indica que en la M37 ha bajado el porcentaje de plomo (988.35 mg/kg de plomo en el relave). (anexo 5.1).

Tabla 37: Remoción de plomo en base a sus dos variables (la concentración del ácido acético y la densidad de corriente)



Fuente: elaboración de los investigadores

También según la Tabla N° 36 –Podemos mencionar que la concentración del ácido acético están en función con la densidad de corriente y afectan notablemente en el proceso de electroremediación para la remoción de plomo.

6.4. Análisis ANVA.

Según los datos obtenidos estadísticamente mediante el análisis de varianza efectuado a un nivel de confianza del 95%, Para:

- FA: Concentración de ácido acético tenemos que $F_0 > F_{\text{Tabular}}$: $522.82 > 3.40$ entonces las hipótesis.

Hipótesis nula (H0): La concentración de ácido acético no afecta la remoción de plomo

Hipótesis alterna (H1): La concentración de ácido acético si afecta la remoción de plomo

Vamos a elegir la Hipótesis Alterna: La concentración de ácido acético si afecta la remoción de plomo

- FB: Densidad de corriente tenemos que $F_0 > F_{tabular}$: $3096.62 > 3.01$ entonces las hipótesis.

Hipótesis nula (H_0): La densidad de corriente no afecta la remoción de plomo.

Hipótesis alterna (H_1): La densidad de corriente si afecta la remoción de plomo.

Vamos a elegir la Hipótesis alterna: La densidad de corriente si afecta la remoción de plomo.

- Fab: Interacción entre la concentración de ácido acético y la densidad de corriente tenemos que $F_0 > F_{tabular}$ $15.75 > 2.51$

Hipótesis nula (H_0): La concentración de ácido acético y la densidad de corriente no afecta la remoción de plomo.

Hipótesis alterna (H_1): La concentración de ácido acético y la densidad de corriente si afecta la remoción de plomo.

Vamos a elegir la **Hipótesis alterna**: La interacción de concentración de ácido acético y la densidad de corriente **si afecta** la remoción de plomo

CONCLUSIONES

- La electrorremediación tiene un gran potencial para remediar diversos tipos de suelos contaminados por metales, en nuestro caso lo utilizamos para reducir el porcentaje de plomo del relave minero de Paredones.
- Mediante el los ensayos de electrorremediación se pudo lograr una remoción de plomo del 45.85%, siendo la muestra inicial 1825.21 mg/kg de plomo y la final 988.35 mg/kg de plomo.
- Podemos asegurar mediante ensayos ya demostrados, que las dos variables: Concentración de ácido acético y la densidad de corriente influyen notablemente en el proceso de electrorremediación para la remoción de plomo del relave minero de Paredones.
- Podemos concluir que si aplicamos mas densidad de corriente y proporcional el ácido acético se puede lograr una mejor remoción de plomo.
- Disminuyendo el porcentaje de plomo, reduciremos la toxicidad del relave minero de Paredones, que en tiempo de lluvia todo la escorrentía desemboca en el afluente del río San Pablo.
- Según cálculos el costo aproximado de energía será de 242.4 kW/m³, equivalente a 128.27 S/m³.

RECOMENDACIONES

- La electrorremediación tiene un gran potencial para remediar diversos tipos de suelos contaminados con compuestos orgánicos e inorgánicos en un amplio rango de concentraciones, 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 del electrorremediación y obtener altas eficiencias de remoción en campo.
- Para una mejor remoción de plomo y obtener que valores exactamente entre la concentración de ácido acético y la densidad de corriente se debe utilizar el análisis de Duncan, ya que este es mas exacto y puntual que el análisis ANVA.
- Es importante mencionar que para tener una mayor remoción de plomo se recomendaría un mayor tiempo, para que se obtenga una remoción más significativa, ya que a las 24 horas de tratamiento, es un tiempo corto para este tipo de procesos.
- Se puede manejar muchas variables para obtener una mejor remoción, como por ejemplo aplicar mas voltaje, aumentar la concentración molar del ácido acético.
- Para una mejor remoción de plomo, hacer los ensayos utilizando como electrolito, el ácido sulfúrico.
- A falta de datos por parte del Ministerio de Energia y Minas, no se pudo realizar el análisis económico, se recomienda tomar esta tesis como antecedentes para futuras investigaciones ya que contienen datos reales.

APÉNDICE

Cálculos para sacar costos de corriente utilizados en los ensayos de electroremediación

Tabla 38: Datos utilizados en los ensayos de electroremediación

Voltaje aplicado (V)	Amperaje registrado (mA)	Densidad del relave (kg/m ³)	Peso del relave-muestra (Kg)	Volumen (m ³)
10	813	3080	1	0.0003
15	1626			
20	2440			
25	3214			

Fuente: Elaboración de los investigadores

Tabla 39: Costo de Hidrandina según los Kilowatt consumidos

Kilowatt (kW)	Costo (S/.)
0<30	0.3934
>30	0.5292

Fuente (Hidrandina, 2016)

Tabla 40: Cálculo de los costos según a los voltajes utilizados en los experimentos de electrorremediación

Voltaje aplicado (V)	Amperaje registrado (mA)	Amperaje Registrado (A)	Watt (W)	Kilowatt (kW)	Volumen (m ³)	kW/m ³	Costo(S/Kw)	Costo total (S/m ³)
10	813	0.813	8.13	0.00813	0.0003	24.64	0.3934	9.69
15	1626	1.626	24.39	0.024	0.0003	72.7	0.5292	38.5
20	2440	2.440	48.8	0.0488	0.0003	147.88	0.5292	78.26
25	3214	3.214	80.35	0.08	0.0003	242.4	0.5292	128.27

Fuente: Elaboración de los investigadores

Cálculos para el análisis de varianza (ANVA)

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

Datos previos

Planteamiento de hipótesis

- **Concentración de ácido acético**

Hipótesis nula (H0): La concentración de ácido acético no afecta en la remoción de plomo.

Hipótesis alterna (H1): La concentración de ácido acético si afecta en la remoción de plomo.

- **Densidad de corriente**

Hipótesis nula (H0): La densidad de corriente no afecta en la remoción de plomo.

Hipótesis alterna (H1): La densidad de corriente si afecta en la remoción de plomo.

- **Concentración de ácido acético y densidad de corriente**

Hipótesis nula (H0): La interacción de la concentración de ácido acético y la densidad de corriente no afecta en la remoción de plomo.

Hipótesis alterna (H1): La interacción de la concentración de ácido acético y la densidad de corriente si afecta en la remoción de plomo.

Nivel de significancia

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

Criterio de rechazo

Se rechaza la hipótesis nula (H0) si $F_0 > F_{\alpha, V_1, V_2}$, donde el F_0 se obtiene experimentalmente y el F_{α, V_1, V_2} tabular (Anexo : N° 1).

Presentación de datos

En la Tabla 24 se presentan los datos individuales y totalizados de Concentración de ácido acético y la densidad de corriente para la recuperación la remoción de plomo en la medida de %, que permiten realizar el análisis de varianza respectivo.

Tabla 41: Porcentaje de remocion de plomo por electroremediación

Factor	Densidad de corriente											
	5.81 (Y ₁)			11.61 (Y ₂)			17.52 (Y ₃)			22.96 (Y ₄)		
Concentración Ácido Acético	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
0.001	18.59	17.89	18.89	23.82	23.42	22.91	31.45	31.12	30.98	37.35	37.00	36.00
0.002	20.54	19.72	20.06	27.48	27.12	27.02	35.37	35.12	35.01	41.68	40.80	41.62
0.003	22.71	21.94	22.02	30.88	30.08	30.52	37.84	36.08	37.84	45.78	45.70	45.85

Fuente: elaboración de los investigadores

Se presenta los resultados de las sumatorias de las concentraciones de cianuro y las Granulometrías

Tabla 42: Sumatorias Y_i, Y_j y Y_{ij}

Sumatoria Y _i (Horizontal)	Sumatoria Y _j (Vertical)	Sumatoria Y _{ij} (Combinación)		
329.42	182.36	55.37	81.62	111.76
371.54	243.25	60.32	91.48	110.35
407.24	310.81	66.67	93.55	124.1
	371.78	70.150	105.5	137.33

Fuente: elaboración de los investigadores

Cálculo del término de corrección C

$$C = \frac{Y^2}{N}$$

$$C = 34114.090$$

Cálculo de la suma del total de cuadrados (SST)

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b Y_{ij}^2 - C$$

$$SS_T = 2528.474$$

Cálculo de la suma de cuadrados para concentración de ácido acético (SS_a)

$$SS_a = \frac{\sum_{i=1}^a Y_i^2}{n} - C$$

$$SS_a = 252.904$$

Cálculo de la suma de cuadrados para la densidad de corriente (SS_b)

$$SS_b = \frac{\sum_{i=1}^b Y_i^2}{n} - C$$

$$SS_b = 2246.905$$

Cálculo de la suma de cuadrados para obtener subtotales (SSsubtotales)

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij}^2}{r} - C$$

$$SS_{\text{subtotales}} = 2522.669$$

Cálculo de la suma de cuadrados para la interacción de las 2 variables: concentración de ácido acético y densidad de corriente (SSab)

$$SS_{ab} = SS_{\text{subtotales}} - SS_a - SS_b$$

$$SS_{ab} = 22.860$$

Cálculo de la suma de cuadrados debido al error (SSE)

$$SSE = SST - SS_{ab} - SS_a - SS_b$$

$$SSE = 5.805$$

Cálculo de la media de la suma de cuadrados para la concentración de ácido acético (MSa)

$$MS_a = \frac{SS_a}{a-1}$$

$$MS_a = 126.45$$

Cálculo de la media de la suma de cuadrados para la densidad de corriente (MSb)

$$MS_b = \frac{SS_b}{b-1}$$

$$MS_b = 748.97$$

Cálculo de la media de la suma de cuadrados para la interacción de las dos variables: concentración de ácido acético (SSa) y la densidad de corriente (SSb)

$$MS_{ab} = \frac{SS_{ab}}{[(a-1)(b-1)]}$$

$$MS_{ab} = 3.81$$

Cálculo de la suma de cuadrados debido al error (SSE)

$$MS_E = \frac{SS_E}{a * b * (r - 1)}$$

$$MS_E = 0.24$$

Cálculo de la función F0, para la concentración de ácido acético.

$$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$$

$$F_0 = 522.82$$

Cálculo de la función F0, para la densidad de corriente

$$F_0 = \frac{MS_b}{MS_E}$$

$$F_0 = 3096.62$$

Cálculo de la función F0, para la interacción de las dos variables: Concentración de ácido acético la densidad de corriente.

$$F_0 = \frac{MS_{ab}}{MS_E}$$

$$F_0 = 15.75$$

Tabla 43: Cuadro de resumen del análisis de varianza para la remoción de plomo.

Fuente de Variación	Fo
Tratamiento A	522.82
Tratamiento B	3096.62
Interacción AB	15.75

Fuente: elaboración de los investigadores

Tabla 44: Cuadro de cálculo de puntos porcentuales

Variables	$F_{\alpha, v1, v2}$	$F_{\alpha, v1, v2}$	Resultados
Fa	$F_{\alpha, (a-1), (a*b*r-1)}$	2,24	3.40
Fb	$F_{\alpha, (b-1), (a*b*r-1)}$	3,24	3.01
Fab	$F_{\alpha, (a-1)(b-1), (a*b*r-1)}$	6;24	2.51

Fuente: elaboración de los investigadores

Nota: para el desarrollo de este cuadro vamos a utilizar la tabla del anexo N°1


REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaino Concha, G. I. (2012). *Análisis y comparación de tecnologías de remediación de suelos contaminados con metales*. Santiago de Chile.
- 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.
- blog, O. (21 de Agosto de 2010). *Blog sobre antiguas civilizaciones*. Obtenido de Blog sobre antiguas civilizaciones: <https://oldcivilizations.wordpress.com/2010/08/21/eras-geologicas-de-la-tierra/>
- Conocimiento, O. d. (2014). *Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica*. Obtenido de Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica: http://www.cideteq.mx/ott/attachments/category/13/1_electrorremediacion_de_suelos_contaminados.pdf
- Cruzado Vásquez, G., & Crisólogo Rodríguez, M. (Junio de 2009). *GEO ZEE- OT Gobierno Regional de Cajamarca*. Obtenido de GEO ZEE- OT Gobierno Regional de Cajamarca [www: http://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/GEOLOGIA.pdf](http://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/GEOLOGIA.pdf)
- DIAMIRE. (2014). *Diamire*. Obtenido de Diamire: <http://www.diamire.com/relaves-mineros/>
- Enriquez, J., Rodríguez, O., & R., R. (17 de Octubre de 2006). *Sociedad Geológica del Perú*. Obtenido de Sociedad Geológica del Perú: https://www.academia.edu/8651733/GEOLOG%C3%8DA_DE_LOS_YACIMIENTOS_EPITERMALES_DEL_TIPO_BAJA_SULFURACI%C3%93N_EN_EL_CORREDOR_ESTRUCTURAL_SAN_PABLO_PORCULLA_NORTE_DEL_PER%C3%9A
- G.I., A. C. (2012). *Google*. Obtenido de Google: http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/113010/cf-alcaino_gc.pdf?sequence=1
- García Hernández, L., & Vargas Ramírez, M. (21 de Febrero de 2011). *Artículos académicos Scielo*. Obtenido de Scielo web site: <http://www.scielo.org.mx/pdf/sv/v24n1/v24n1a6.pdf>
- Google. (1993). *Google*. Obtenido de Google web site: https://www.google.com.pe/search?q=diagrama+de+pourbaix+del+plomo&rlz=1C1RUCY_esPE704PE705&espv=2&biw=1366&bih=662&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUK EwiBipKAivTPAhUMVT4KHQPtAVAQ_AUIBigB#imgrc=ENTqVySx7VoyaM%3A
- Google. (s.f.). *Imágenes Google*. Obtenido de Google: https://www.google.com.pe/search?q=diagrama+de+pourbaix&rlz=1C1RUCY_esPE704PE705&espv=2&biw=1366&bih=662&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiUj4vsn5fQAhUC52MKHS_yAfoQ_AUIBigB
- Google. (s.f.). *Imágenes Google*. Obtenido de Google Web site: https://www.google.com.pe/search?q=clasificacion+de+rocas+sedimentarias&rlz=1C1RUCY_esPE704PE705&espv=2&biw=1366&bih=662&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjctCouspfQAhUD5mMKHaejAgsQ_AUIBigB#imgrc=_qw6qP_La3RRuM%3A
- Grufiles. (2015). *Centro de Documentación Grufiles*. Obtenido de Grufiles web site: http://www.grufiles.org/sites/default/files//documentos/documentos/%5BV4.0%5D%20Informe%20-%20Pasivos%20ambientales%20presentes%20en%20la%20Regi%C3%B3n%20Cajamarca_2_0.pdf
- Isla, R. (Miércoles de Julio de 2015). Pasivos Ambientales Mineros en el Perú 2015. *En el Perú hay 4.353 pasivos ambientales de alto riesgo*, pág. 2.
- 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_Francis_co_363X80.pdf
- Laso, J. F. (12 de Febrero de 2011). *Repositorio Institucional Universidad Técnica Particular de Loja*. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad Técnica Particular de Loja:


- http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/1562/3/UTPL_Granda_Laso_Jorge_Francis_co_363X80.pdf
- López R., L. V. (Marzo de 2013). *Repertorio universitario institucional de recursos abiertos*. Obtenido de Repertorio universitario institucional de recursos abiertos: <https://ruidera.uclm.es/xmlui/>
- Metalúrgia, D. d. (5 de Octubre de 2012). *Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre"*. Obtenido de Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre" web site: <http://www.unexpo.edu.ve/principal/>
- Minas, M. d. (21 de Abril de 2008). *Guía Relaves Mineros*. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas web site: <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/guias/relaveminero.pdf>
- Minas, M. d. (21 de Noviembre de 2008). *Publicaciones DGAAM*. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas web site: http://www.minem.gob.pe/_publicacion.php?idSector=4&idPublicacion=50
- Muñoz Portero, M. (5 de Marzo de 1987). *Ingeniería Química, Universidad Politécnica de Valencia*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia web site: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13708/Caracter%C3%ADsticas%20y%20usos.pdf?sequence=3https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/13708/Caracter%C3%ADsticas%20y%20usos.pdf?sequence=3>
- Pérez, D. D. I. (Agosto de 2007). *Google*. Obtenido de Google: <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v23n3/v23n3a3.pdf>
- Peru, C. d. (04 de Julio de 2004). *Ministerio de Energía de Minas*. Obtenido de Ministerio de Energía de Minas: <http://intranet2.minem.gob.pe/web/archivos/dgaam/legislacion/leypasivos28271.pdf>
- Perú, M. d. (Miercoles de 09 de 2015). *Ventanilla Virtua-MEM*. Obtenido de Ventanilla Virtua-MEM: http://www.minem.gob.pe/_legislacionM.php?idSector=1&idLegislacion=8804
- 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>
- Rodriguez, M. (Marzo de 2001). *Reportorio Universidad Nacional Colombia -Medellin*. Obtenido de Universidad Nacional Colombia -Medellin Web site: <http://www.unalmed.edu.co/~rrodriguez/geologia/sedimentarias.htm>
- Salomons, W. (Octubre de 1993). *Tecnología del suelo*. Obtenido de Tecnología del suelo: https://www.google.com.pe/search?q=diagrama+de+pourbaix+de+plomo&espv=2&rlz=1C1RUCY_esPE704PE705&biw=1366&bih=662&tbm=isch&imgil=ENTqVySx7VoyaM%253A%253BBY5v2vGumwQB_M%253Bhttp%25253A%25252F%25252Fwww.edafologia.net%25252Fconta%25252Ftema15%25252Ffact.htm
- Volke, T., & J., V. (22 de Marzo de 2002). *Catálogo de publicaciones del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Obtenido de Catálogo de publicaciones del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático web site: www.inecc.gob.mx/descargas/publicaciones/372
- Volke, V. y. (Mayo de 2005). *Google*. Obtenido de Google: [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/B1E761B1E2F24A5C05257D490070F94F/\\$FILE/SuelosContaminadosPorMetalesYMetaloides.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/B1E761B1E2F24A5C05257D490070F94F/$FILE/SuelosContaminadosPorMetalesYMetaloides.pdf)
- Wikipedia. (18 de Agosto de 2015). *Wikipedia*. Obtenido de wikipedia web site: https://es.wikipedia.org/wiki/Densidad_de_corriente
- wikipedia. (jueves de Octubre de 2016). *wikipedia*. Obtenido de wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Suelo>
- wikipedia. (1 de Agosto de 2016). *wikipedia*. Obtenido de wikipedia web site: https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81cido_ac%C3%A9tico

ANEXOS

1. Certificado de los ensayos de electrorremediación del relave minero de mina Paredones



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO
LABORATORIO DE SERVICIOS A LA COMUNIDAD E INVESTIGACION




LASACI

REPORTE DE ANÁLISIS

SOLICITANTE	: MARTIN OCAS IZQUIERDO & ALEXANDER ESCOBAR MISAHUAMAN
MUESTRA	: SUELO
FECHA DE INGRESO	: 23 DE SETIEMBRE DE 2016
MUESTRA PUESTA EN LABORATORIO	

CÓDIGO	Pb [mg/kg]
M1	1825.21
M2	1485.96
M3	1498.68
M4	1480.43
M5	1450.25
M6	1465.28
M7	1459.07
M8	1410.7
M9	1424.76
M10	1423.30
M11	1390.38
M12	1397.75
M13	1407.05
M14	1323.58
M15	1330.21
M16	1332.04
M17	1261.65



DR. NOE COSTILLA SANCHEZ
DIRECTOR

AGUAS SUELOS - ALIMENTOS - MINERALES - ACEITE - CARBON - CAL

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

949959632 - RPM: 0056432 - RPC: 949119298



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

LABORATORIO DE SERVICIOS A LA COMUNIDAD E INVESTIGACION

LASACI

M18	1276.19
M19	1268.16
M20	1251.18
M21	1257.20
M22	1259.76
M23	1179.63
M24	1184.20
M25	1186.20
M26	1134.55
M27	1166.67
M28	1134.55
M29	1143.55
M30	1149.88
M31	1168.13
M32	1064.52
M33	1080.52
M34	1047.31
M35	989.63
M36	991.09
M37	988.35

TRUJILLO, 28 DE SETIEMBRE DEL 2016

LASACI
 DIRECCIÓN
 Universidad Nacional de Trujillo
DR. NOE COSTILLA SANCHEZ
DIRECTOR

AGUAS - SUELOS - ALIMENTOS - MINERALES - ACEITE - CARBON - CAL

FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA

949959632 - RPM: *0056432 - RPC: 949119298

2. Cuadro estadístico

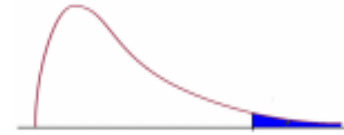
Puntos porcentuales de la distribución $F_{0.05, v_1, v_2}$ [32]

Distribución F 0.05

En las columnas se encuentran los valores F que corresponden al área 0.05 a la derecha

En las columnas se encuentran los grados de libertad del numerador

En los renglones se encuentran los grados de libertad del denominador.



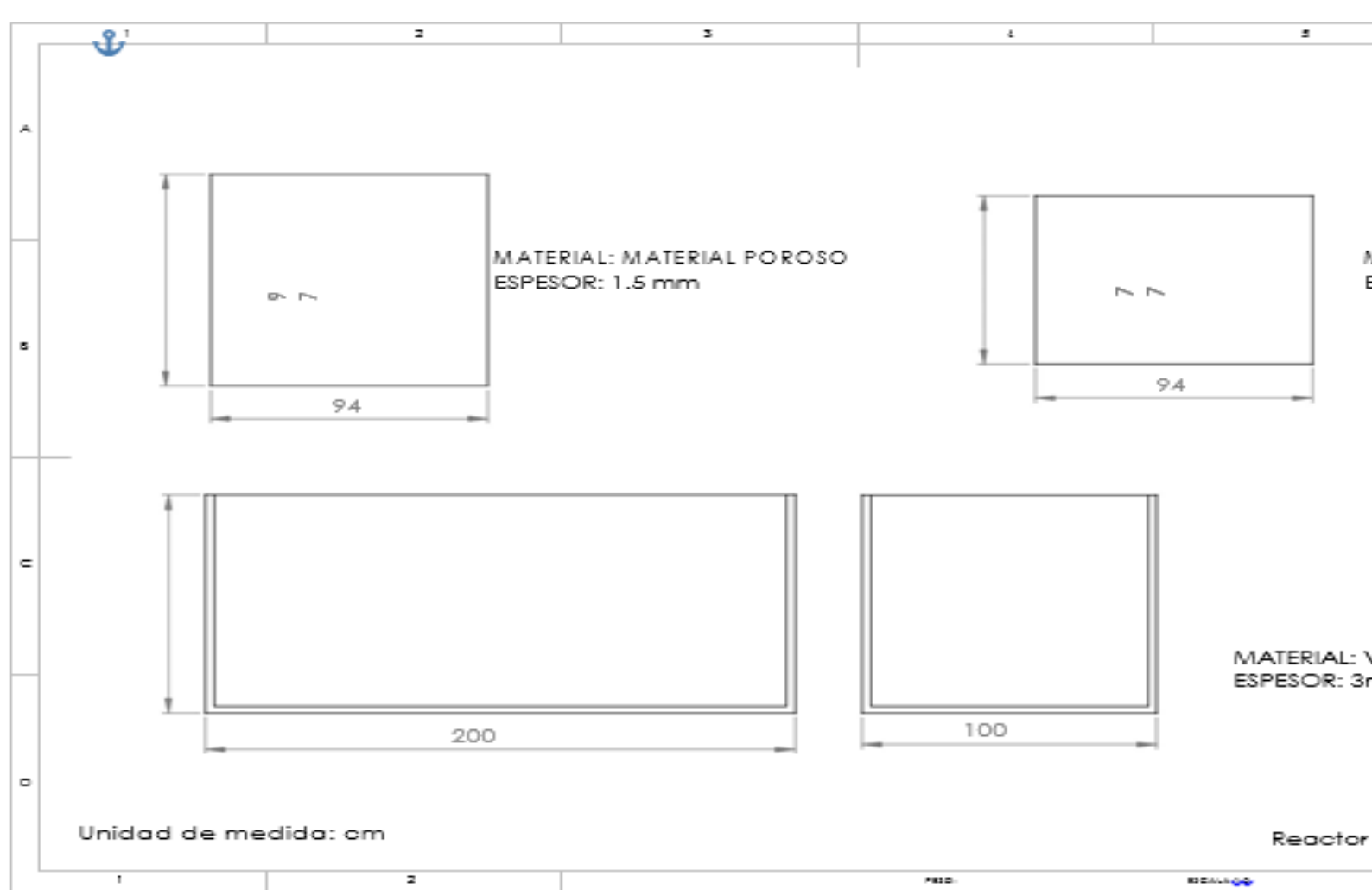
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	24	30	40	60	120
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.0	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.28	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.26	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.24	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.22	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.20	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.18	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.17	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.15	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.14	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.13	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.04	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.95	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.87	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35

Para calcular el valor F en excel, se utiliza la función de la distribución F inversa

=distr.f.inv(0.05; gl num; gl den)

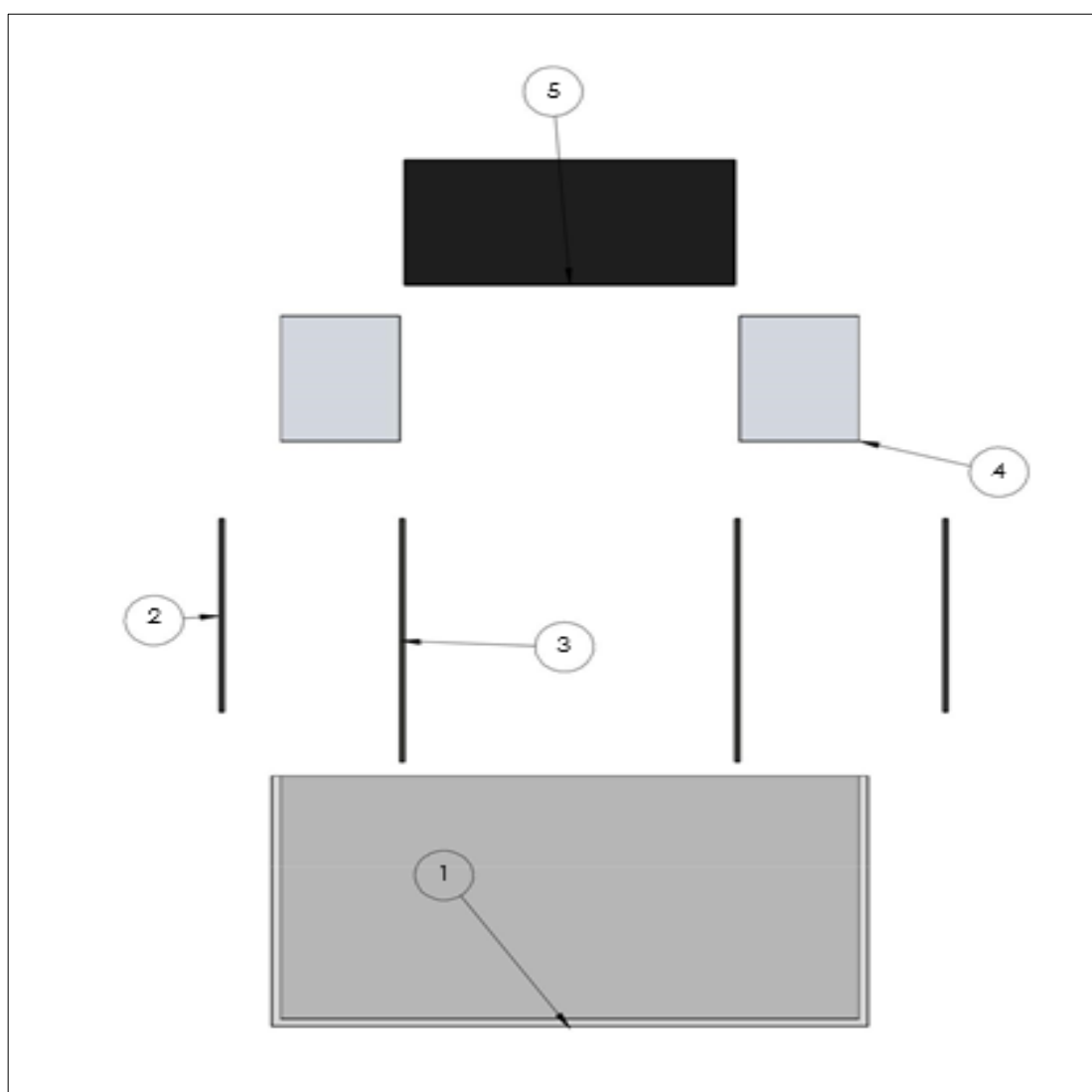
© Ing. Jesús Alberto Mellado Bosque

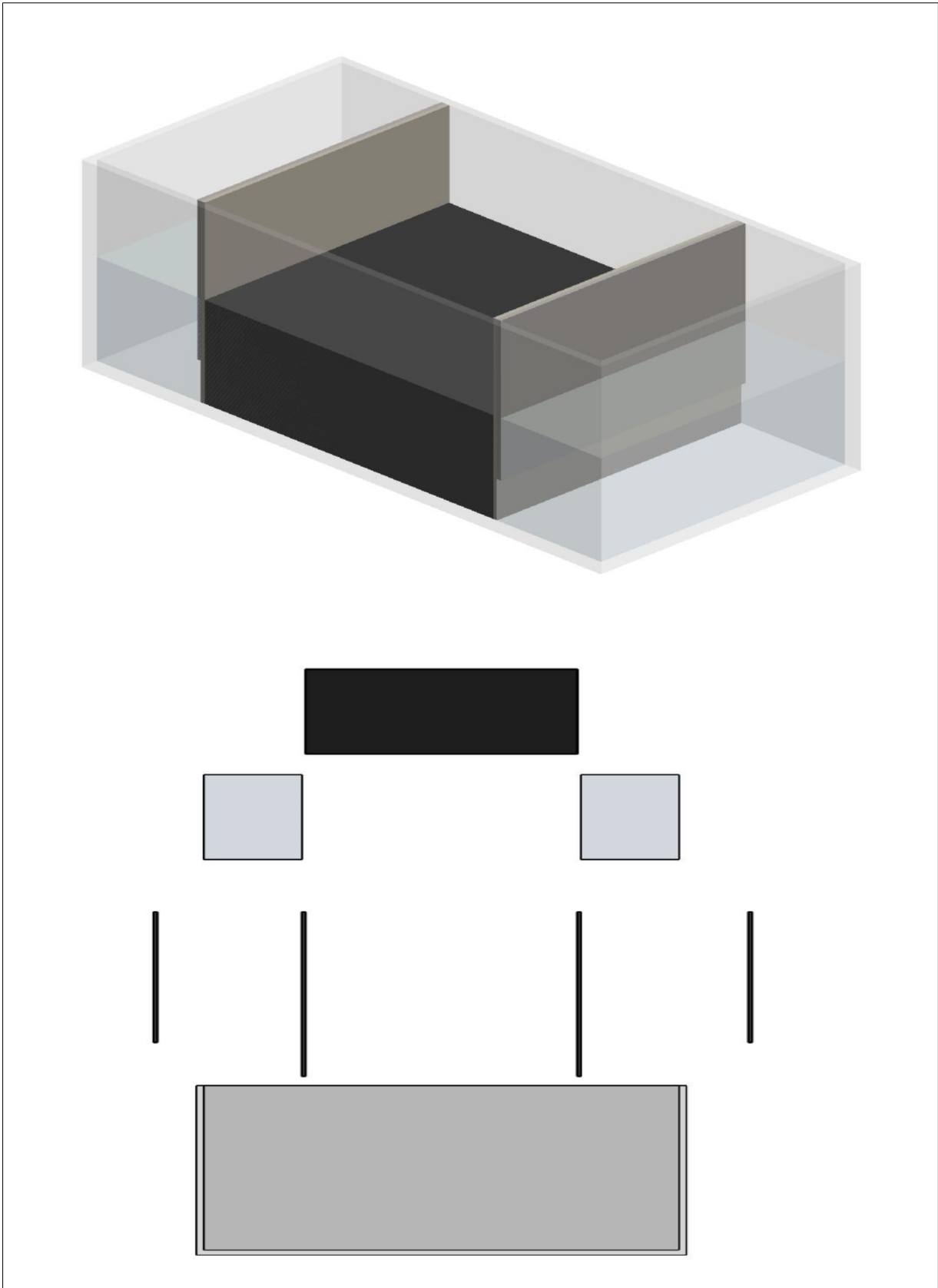
3. Diseño del reactor



4. Ensamblaje de la Celda para los ensayos de electrorremediación

ELEMENTO	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Reactor	Material de vidrio	1
2	Electrodo	AISI 304	2
3	Filtro	Material poroso	2
4	Anolito / Catolito	Solución de ácido acético	1
5	Muestra de suelo	Suelo a tratar	1





5. Panel Fotografico



Fotografía 01: ubicación y toma de puntos.



Fotografía 02: Extracción de la muestra mediante una calicata



Fotografía 03: Calicata



Fotografía 04: Muestra Relave Paredones



Fotografía 05: Reactor ensamblado para proceso de remediación de suelos utilizada en la presente investigación.



Fotografía 06: Reactor ensamblado para proceso de remediación de suelos utilizada en la presente investigación.



Fotografía 07: Separación y limpieza por tamizado de muestra de suelo a ensayar.



Fotografía 08: Mallas utilizadas para caracterización física de muestra.



Fotografía 09: Proceso de mado de muestra de suelo; separación de muestra de suelo mado.



Fotografía 10: Pesado de malla sin muestra; pesado de muestra separada por mallas



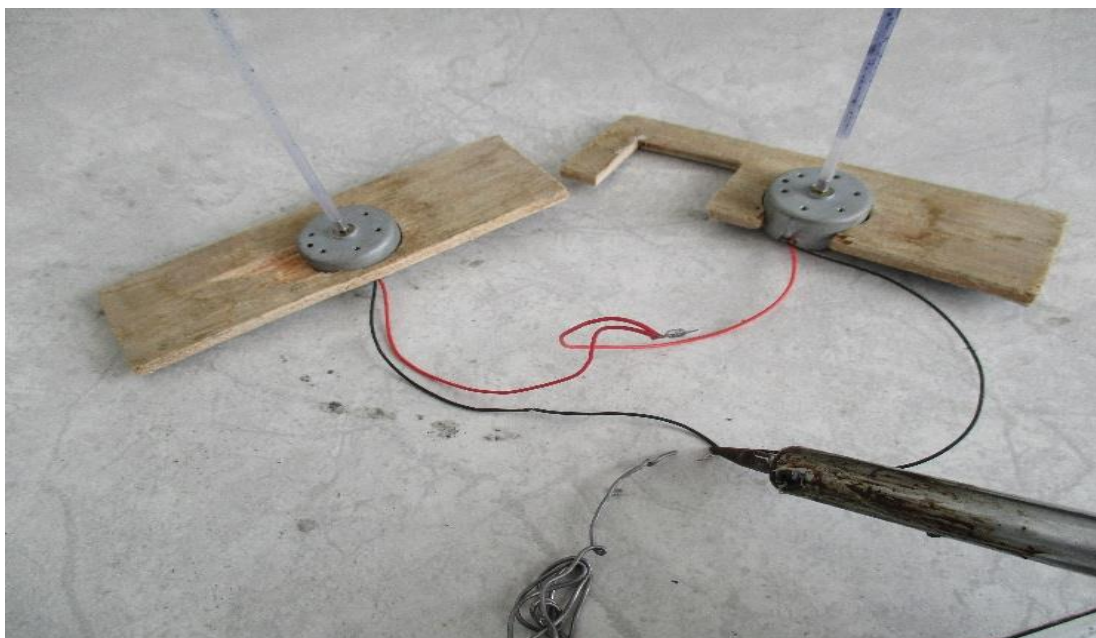
Fotografía 11: Agua destilada para preparación de electrodo de referencia; Recipiente de vidrio para electrodo; Alambre de cobre.



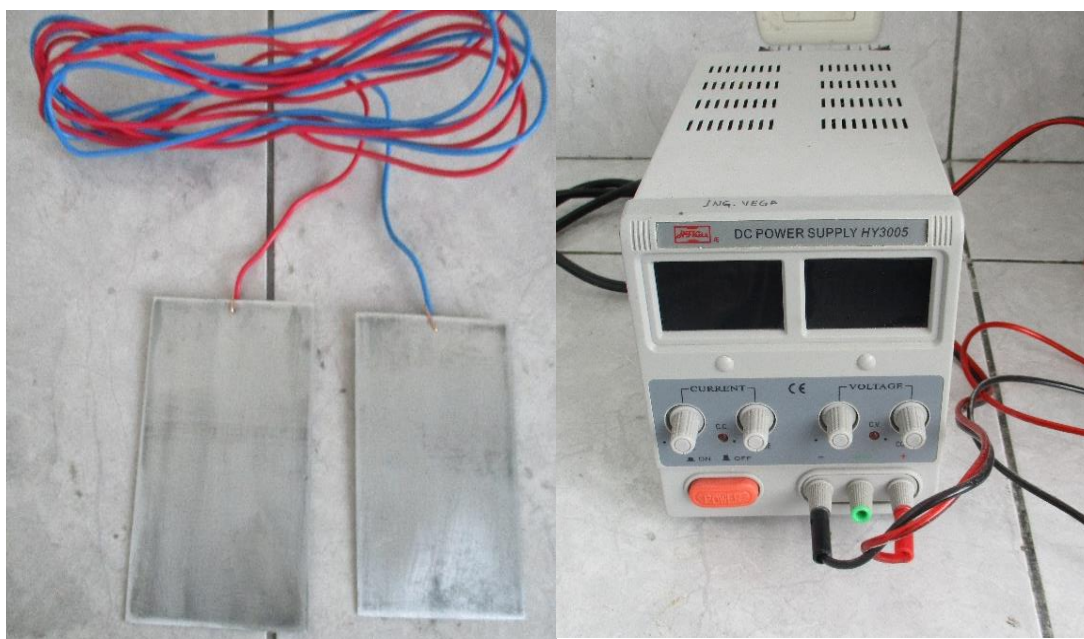
Fotografía 12: Solución saturada de sulfato de cobre; Vertido de solución de sulfato; Obtención de electrodo de referencia.



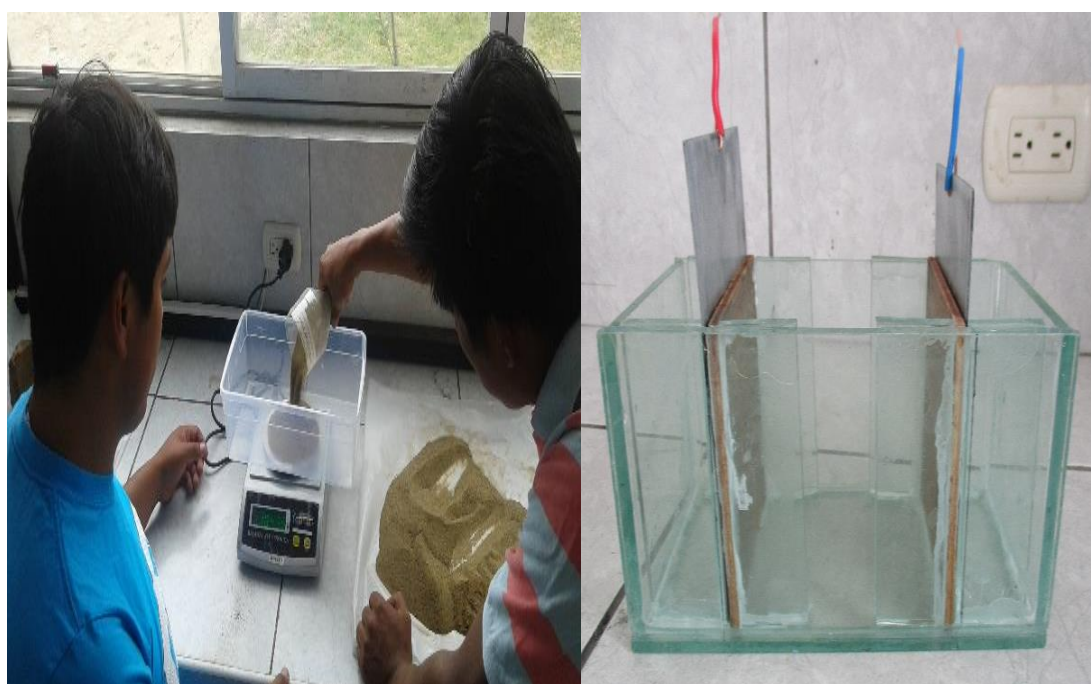
Fotografía 13: Accesorios necesarios para construcción de rector de remediación de suelo.



Fotografía 14: Conexión de agitadores para anolito y catolito de celda de remediación.



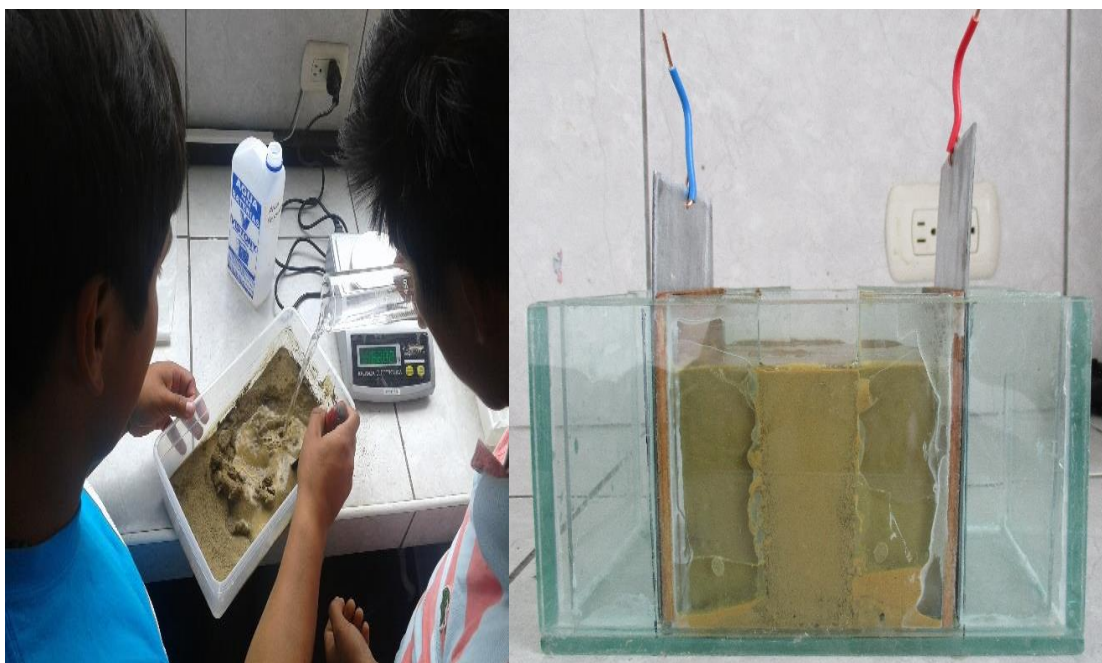
Fotografía 15: Electrodo a utilizar en celda de remediación; Fuente de corriente continua.



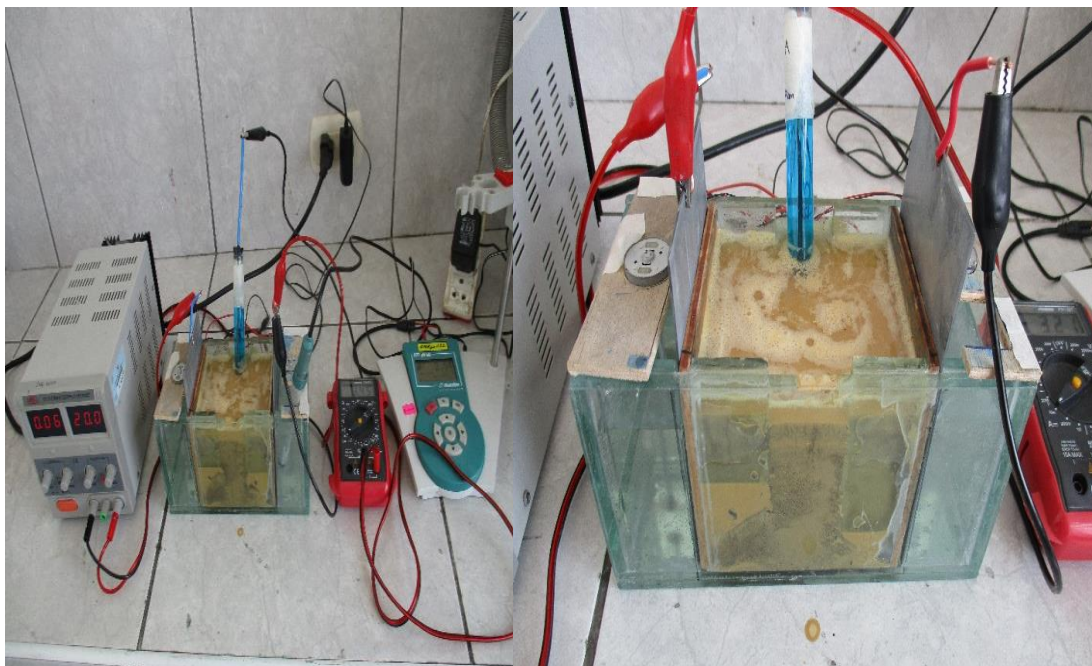
Fotografía 16: Pesaje de muestra a ensayar por remediación electroquímica; Celda de remediación en proceso de instalación.



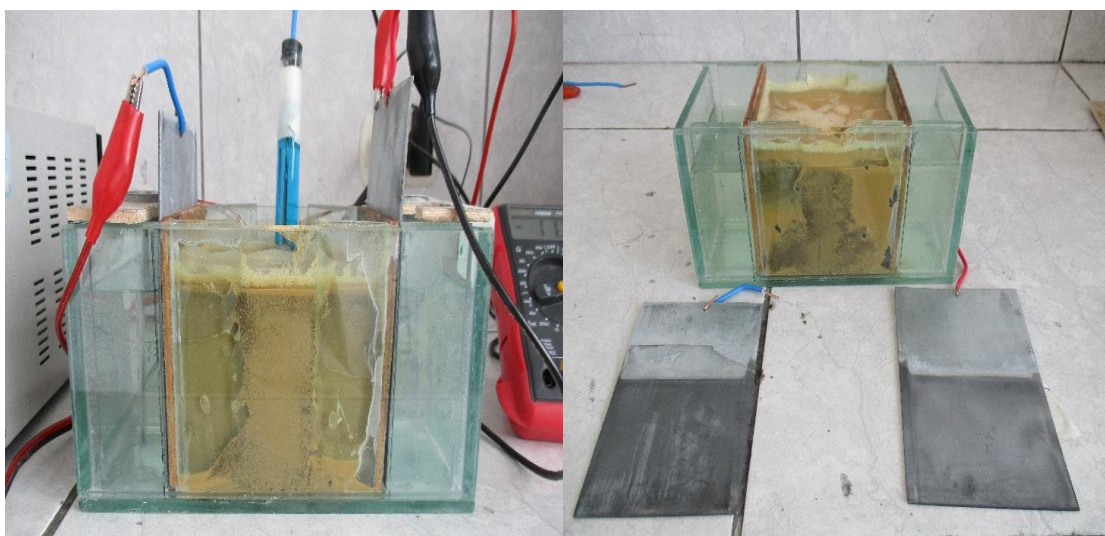
Fotografía 17: Humectación y ubicación de muestra de suelo en la celda de ensayo.



Fotografía 18: Proceso de saturación de suelo; Muestra de suelo ubicado en celda de ensayos.



Fotografía 19: Proceso de remediación de suelos y evaluación de parámetros de ensayo.



Fotografía 20: Remediación en proceso; Electroodos después del proceso de remediación.



Fotografía 21: Selección desuelo en segmentos para su posterior evaluación de plomo.

DEFINICIÓN DE TERMINOS BÁSICOS

Acido acético: También llamado ácido etanoico o ácido metilencarboxílico, es un ácido orgánico de dos átomos de carbono, se puede encontrar en forma de ion acetato, es de interés para la química orgánica como reactivo.

Anodo. Es Polo positivo de una pila eléctrica y/o carga eléctrica.

Cátodo. Es Polo negativo de una pila eléctrica y/o carga eléctrica.

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

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 electro cinético.

Densidad de corriente. Es un vector que en cada punto del conductor tiene la dirección de la velocidad de arrastre y de módulo igual a la cantidad de carga que por unidad de tiempo atraviesa la unidad de superficie normal a la velocidad de arrastre.

Electrorremediación. Es una tecnología innovadora que puede utilizarse para la remediación in situ de suelos contaminados con metales o compuestos orgánicos polares; es una técnica aplicable principalmente a suelos de baja permeabilidad.

Electrodos. Extremo de un conductor en contacto con un medio, al que lleva o del que recibe una corriente eléctrica.

Fuente poder. Es la que nos va a generar energía y/o donde aplicamos la corriente eléctrica.

In situ. “Los tratamientos in situ son aquellos que permiten tratar el suelo contaminado sin la necesidad de excavar y transportar el suelo fuera de la zona (espacio) contaminada, lo cual genera una disminución de los costos. Este tipo de tratamiento generalmente requiere de periodos largos, además de que existe la posibilidad de que el tratamiento de remediación no sea uniforme dada la variabilidad de las características del suelo y debido a que es más difícil de verificar la eficacia de los procesos empleados” (Volke, 2005) que se aplican directamente sobre el terreno.

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 electrorremediación.

Pasivo ambiental. Son considerados pasivos ambientales aquellas instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, en la actualidad abandonadas o inactivas y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad (Ministerio de Energía de Minas, 2004)

Relave minero. 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. (DIAMIRE, 2014)