

FACULTAD DE INGENIERÍA



Carrera de Ingeniería Ambiental

“ELECTORREMEDIACIÓN PARA LA DISMINUCIÓN DE PLOMO EN SUELOS DEL ÁMBITO DEL PASIVO AMBIENTAL MINERO PAREDONES SAN PABLO - CAJAMARCA”

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniera Ambiental

Autoras:

Loidita Bernal García
Anaí Coronel Vásquez

Asesor:

Ing. Mg. Gary Christiam Farfán Chilicaus

Cajamarca - Perú

2019

DEDICATORIA

Este proyecto de investigación está dedicado a Dios quien nos ha dado fortaleza para seguir adelante, a nuestras familias por el apoyo y consejos en momentos difíciles, a nuestros compañeros, docentes y amigos por la constante cooperación y motivación para seguir triunfando.

AGRADECIMIENTO

Primeramente, expresamos nuestro agradecimiento a Dios, por fortalecer nuestro corazón e iluminar nuestra mente, por haber puesto en nuestro camino a aquellas personas que han sido nuestro soporte y compañía durante el periodo de estudios.

A nuestros padres y demás familiares por el apoyo, la comprensión y motivación que nos han brindado para seguir adelante.

Un agradecimiento especial al Ing. Gary Farfám Chilicaus y a la Ing. Gladys Llicapa Rodolfo, por la paciencia y colaboración que nos ha brindado para el desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTO	3
ÍNDICE DE FIGURAS	7
ÍNDICE DE ECUACIONES	8
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	10
1.1. Realidad problemática	10
1.2. Formulación del problema	24
1.3. Objetivos	24
1.4. Hipótesis	25
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	26
2.1. Tipo de investigación	26
2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)	27
2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos	27
2.4. Procedimiento	29
CAPÍTULO III. RESULTADOS	35
3.1. Cálculo del área de los electrodos durante el proceso de electroremediación	35
3.2. Cálculos del proceso de electroremediación.	36
3.3. Resultado de la muestra patrón de plomo obtenido de laboratorio.	36
3.4. Resultados de laboratorio después del proceso de electroremediación.	37
3.5. Resultados del Análisis de varianza (ANOVA) para la remoción de plomo.	40
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	43
4.1. Discusión	43
4.2. Conclusiones	45
REFERENCIAS	47

ANEXOS.....	50
Anexo N° 1. Mapa Político.....	50
Anexo N° 2. Mapa Satelital.....	51
Anexo N° 3. Ubicación de puntos de muestreo (GPS)	52
Anexo N° 4. Recolección de Muestras	53
Anexo N° 5. Procedimiento para la aplicación del método de electroremediación	55
Anexo N° 6. Cuadro estadístico de la distribución de F (0,05).....	60
Anexo N° 7. Ficha técnica AISI-304	61
Anexo N° 8. Resultados de laboratorio de las muestras de suelo.	62
Anexo N° 9. Estándares de Calidad Ambiental para suelo	63
Anexo N° 10. Cálculos estadísticos (ANOVA)	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Impactos ambientales negativos de los relaves mineros en el suelo	20
Tabla 2 Matriz del diseño experimental para los niveles de las variables de estudio	26
Tabla 3 Coordenadas UTM de los puntos de muestreo.	29
Tabla 4 Profundidad del muestreo según el uso del suelo	30
Tabla 5 Niveles de las variables de estudio	31
Tabla 6 Modelo matricial para el experimento Bifactorial	32
Tabla 7 Concentraciones de Ácido oxálico	32
Tabla 8 Calculo de la densidad de corriente durante el proceso de electroremediación	36
Tabla 9 Resultado inicial de plomo antes del aplicar método de electroremediación	36
Tabla 10 Resultados obtenidos, después de aplicar el tratamiento de electroremediación	37
Tabla 11 Plomo removido en muestras después del tratamiento de electroremediación ...	38
Tabla 12 Porcentajes de remoción de plomo después del método de electroremediación.	39
Tabla 13 Cuadro de datos de ANOVA	42
Tabla 14 Datos utilizados en los cálculos	64
Tabla 15 Datos para análisis análisis de varianza (ANOVA)	64
Tabla 16 Sumatoria de ejes	65
Tabla 17 Cálculo de puntos porcentuales	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del ácido oxálico	22
Figura 2. Área sumergida de los electrodos	35
Figura 3. Porcentaje (%) de remoción de plomo con sus dos variables	39
Figura 4. Resultados de la remoción de plomo con relación a la muestra inicial	44
Figura 5. Análisis de las variaciones de plomo removido	45
Figura 6. Calicata	53
Figura 7. Coordenadas UTM	54
Figura 8. Construcción de la celda de electrorremediación.....	55
Figura 9. Tamizado de muestras	56
Figura 10. Pesado de muestras	57
Figura 11. Humectación de muestras con las diferentes concentraciones de ácido oxálico	57
Figura 12. Electrodo SS – AISI 304 para el tratamiento de electrorremediación	58
Figura 13. Tratamiento electroquímico.....	59

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Para calcular la densidad de corriente	33
Ecuación 2. Sumatoria de cuadrados	65
Ecuación 3. Suma de cuadrados para concentración de ácido oxálico	66
Ecuación 4. Suma de cuadrados para la concentración de la densidad de corriente.....	66
Ecuación 5. Suma de cuadrados para obtener subtotales.....	66
Ecuación 6. Suma de cuadrados para la interacción de las 2 variables	67
Ecuación 7. Suma de cuadrados debido al error	67
Ecuación 8. Suma de cuadrados para la concentración de ácido oxálico	67
Ecuación 9. Suma de cuadrados para la concentración de densidad de corriente.....	67
Ecuación 10. Suma de cuadrados para la interacción de las dos variables.....	68
Ecuación 11. Suma de cuadrados debido al error	68
Ecuación 12. Función F_0 , para la concentración de ácido oxálico	68
Ecuación 13 . Función F_0 , para la densidad de corriente.....	68
Ecuación 14. Función F_0 , para la interacción de las dos variables	69

RESUMEN

Esta investigación tuvo como objetivo evaluar la influencia de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico en la disminución de plomo por electroremediación en suelos del ámbito del pasivo ambiental minero Paredones, distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, departamento de Cajamarca, para lo cual se consideró un muestreo estratificado, en el que se tomó nueve puntos, que luego se homogenizaron para formar una sola muestra de análisis. Se construyó una celda electrolítica a nivel de laboratorio (diseño bach), la cual ha sido alimentada con una fuente poder constante (10, 20 y 30 V) y las pruebas se han humedecido previamente con ácido oxálico de 0.01, 0.02 y 0.03 M, se realizó 27 ensayos aplicado a una hora de tratamiento y además se consideró una muestra patrón para su posterior comparación, los ensayos de suelo recuperado se analizaron en el laboratorio de la Universidad Nacional de Trujillo. Los resultados obtenidos indican que el mayor porcentaje de reducción alcanzado fue de 87.62 %, con una concentración de 0.03 M y una densidad de corriente de 20.35 mA/cm². Así mismo se concluye que la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico influyen significativamente e incrementan el porcentaje de reducción de plomo, el cual se pudo comprobar con el análisis de varianza (ANOVA) desarrollado mediante el software EXCEL, con un nivel de confianza de 95 %

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La actividad minera es un factor primordial en el desarrollo económico de Cajamarca, pero debemos tener en cuenta que la excavación de minas, la remoción de minerales, los procesos de la extracción de metales pueden causar daños ambientales y en casos extremos, destruir el ecosistema.

En las últimas dos décadas se ha incrementado el interés por desarrollar tecnologías que ayuden a solucionar el problema de los suelos contaminados por plomo, la mayoría de estas se han orientado hacia los procesos de remediación in situ, dentro de los cuales se vienen desarrollando métodos de tratamientos para la remediación de suelos, como la electrorremediación, la cual es una tecnología muy eficiente para restaurar suelos contaminados que se basa en la generación de un campo eléctrico a partir de imponer corriente directa. (De la Rosa, Teutli, & Ramirez, 2017, p. 1)

En la actualidad los suelos de la mina de Paredones ubicada en el Distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, departamento de Cajamarca, se ha acumulado gran cantidad de oxidantes y/o contaminantes que han aumentado su toxicidad, provenientes de la minería antigua que se ejecutaba en dicha zona, la cual ha sido abandonada aproximadamente hace 47 años por la empresa “Northern Perú Mining Corporation” que realizó sus explotaciones dejando gran cantidad de relaves en los suelos acumulados a la intemperie (Benites y Leiva , 2015, p. 12).

Estos contaminantes son trasladados por las lluvias y arrastre de sólidos hacia el río San Pablo y alrededores, el cual es uno de los efluentes que alimenta a la presa Gallito Ciego; Sin tomar en cuenta los daños que pueden ocasionar a la población aledaña al lugar y al medio ambiente, considerando que los metales pesados como el plomo tienen tiempo de residencia alto en suelos.

Teniendo en cuenta los impactos ambientales que generan estos suelos contaminados por relaves, se propone utilizar un método limpio y sostenible que contribuyan a minimizar los efectos que dañan el ambiente, como el método de electrorremediación para remover metales pesados como el plomo, ya que hay varios estudios realizados como el de Granda (2014) en los que se han obtenido resultados exitosos.

1.1.1. Antecedentes Teóricos

La presente investigación realizada en la universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México tiene como objetivo determinar la disminución de la concentración de cadmio en el suelo con la técnica de electrorremediación en una celda construida en laboratorio. Para lo cual se construyó una celda con una medida de 20 x 10 x 5 cm obteniendo un volumen de 1000 cm³, para la electrorremediación del suelo contaminado por cadmio. Las condiciones para realizar los experimentos fueron aplicando una corriente de 20 y 40 V, con un amperaje de 1 y 2, utilizando como solvente agua destilada y ácido acético por un tiempo de 24 horas. De los 9 experimentos los mejores resultados de presentaron en los experimentos E, F y H, aplicando un potencial de 20 y 40 V 1 A. Y la diferencia de concentración de Cadmio en los experimentos es de 119 y 308 ppm (mg/kg). La mayor diferencia entre la sección con menor concentración y la de mayor concentración fue en el experimento H, con un voltaje de 40 V y 1 amperio utilizando ácido acético con un tiempo de 24 horas (Moreno, 2017, p. 3).

La presente investigación desarrollada por la Universidad Técnica Particular de Loja tiene como objetivo evaluar la técnica de electrorremediación de suelos contaminados con metales pesados (plomo, arsénico y zinc), para lo cual se diseñó y construyó una celda de electrorremediación. Para el estudio se

analizaron conjuntamente medidas de pH, concentración de contaminantes. Los factores considerados fueron los siguientes; tres distancias entre electrodos, dos tiempos de tratamiento y dos tipos de electrolitos; en los resultados se determinó su influencia en la concentración final de estos metales en las muestras de suelos remediados. Las muestras con mayor concentración en plomo, arsénico y zinc fueron seleccionadas para realizar el proceso de electroremediación. Se comprobó que, para las condiciones experimentales utilizadas, el tratamiento con menor concentración después de aplicada la técnica de electroremediación, es el tratamiento T12 (15 cm, 24 horas y ácido fosfórico) para el plomo y zinc; el tratamiento T8 (10 cm, 24 horas y ácido fosfórico) para el arsénico; presentan una eficiencia del 99.9 % para la movilización de metales pesados (Granda. 2011, p. 3).

El presente trabajo se llevó a cabo en la zona de Zimapán Hidalgo México donde se realizaron estudios potencioestáticos en una celda cilíndrica de electroremediación, con un suelo real de clase arenosa, contaminado por residuos mineros de la zona de Zimapán, con una concentración inicial de plomo total de 483 ppm. Utilizando agua desionizada, y ácido acético (CH_3COOH), ya sea como humectante del suelo, como anolito o catolito, para facilitar la solubilidad de las especies, la conductividad eléctrica y para el control del pH. En estos experimentos se aplicó un potencial constante de 20 V durante 24 horas. Los resultados muestran una disminución en la conductividad eléctrica del suelo y un aumento de esta en los electrolitos, lo que indica el movimiento de especies iónicas hacia estos, mientras que la variación del pH al final de los experimentos es de 0.6 unidades. Asimismo, se observó una remoción del plomo en todos los experimentos planteados, pero para el caso particular cuando se utilizó ácido

acético (CH_3COOH) como anólito y católito, y el suelo se humectó con agua, se presentó una remoción del 12 % con respecto a la concentración inicial (García, Vargas, & Reyes, 2010, p. 5).

Pérez (2017) Desarrolló un trabajo en la universidad Autónoma Agraria Antonio Narro en la ciudad de México, para determinar la disminución de la concentración de plomo en el suelo con la técnica de electroremediación en una celda construida en el laboratorio. Se construyó una celda con medidas de 20 x 10 x 5 cm obteniendo un volumen de 1000 cm^3 , para la electroremediación del suelo contaminado por plomo. Las condiciones para realizar los experimentos fueron aplicando una corriente de 20 y 40 V, con un amperaje de 1 y 2, utilizando como solvente agua destilada y ácido acético por un tiempo de 24 horas. Los resultados de la concentración de plomo en suelo, de los 9 experimentos realizados, solo 2 de los tratamientos obtuvimos mejores resultados de concentración del metal. En el experimento E aplicando un voltaje de 20, 2 A, con agua destilada fue posible la remoción del plomo y el experimento H aplicando un voltaje de 40, 1 Amper, con ácido acético fue posible la remoción del plomo (P. 7)

La Universidad Nacional del Centro del Perú realizó un estudio con el objetivo de remover el cobre contenido en relaves de la planta concentradora – Huari La Oroya; mediante el método electroquímico a nivel laboratorio. Para lograr este objetivo se ha considerado las variables independientes de concentración del electrolito y el tiempo de experimentación en dos niveles, y cuatro pruebas experimentales en total; los resultados alcanzados indican que la concentración del electrolito ácido láctico a 0,5 M y a un tiempo de tratamiento de 360 horas son las más adecuadas para la obtención de un porcentaje de remoción máximo de

Cu de 66,70 %. A si mismo se observa que la tecnología aplicada es promisoría y eficiente en el tratamiento de este tipo de pasivos ambientales, comentario coincidente con los trabajos reportados en la literatura especializada abierta. Finalmente, la metodología empleada queda abierta a ser aplicados con otros tipos de contaminantes de pasivos ambientales que fortalezcan la localización de la tecnología electrorremediación aplicada (Ortiz & Vargas, 2015, p 5).

Una investigación desarrollada en la Universidad Nacional del Centro del Perú – Huancayo, sobre electrorremediación de suelos contaminados por cadmio, zinc y arsénico, utilizando paneles fotovoltaicos, a nivel de laboratorio, tuvo como objetivo principal remover los metales pesados de suelos contaminados de la Estación Experimental de El Mantaro (UNCP - Jauja) variando la concentración del electrolito ácido acético y el periodo de experimentación. Se trató 250 g de suelo contaminado, utilizando electrodos de acero inoxidable y grafito con una separación de 10 cm, con una tensión de corriente de 32 V y utilizando como electrolitos el ácido acético a diferentes concentraciones, luego se realizó los análisis del suelo por ICP-MS. Se determinó la concentración del electrolito ácido acético (CH_3COOH) y un tiempo de tratamiento de 36 horas, obteniendo a estas condiciones los mayores porcentajes de remoción los cual fueron: para el cadmio un 99,27 %; para el zinc un 98,59 % y un 98,66 % para el arsénico (Espinoza & Tacza, 2014, p. 4).

La Universidad Nacional Mayor de San Marcos, realizó el proyecto titulado “Modelo de electrorremediación de un suelo artificial contaminado con plomo, y su determinación cuantitativa por voltamperometría de redisolución anódica”. En la primera etapa de este proyecto se tuvo como objetivos evaluar la migración de los iones plomo (II) así como determinar los parámetros de concentración y

eléctricos más apropiados en gel semisólido de agar-agar con KCl como electrolito, gel-KCl-plomo (simulante preliminar de un suelo contaminado). En una segunda etapa, al sistema gel-KCl se le adicionó caolinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), creando el sistema gel KCl-plomo-caolinita con la intención de aproximarla a un suelo franco. A todos los sistemas ensayados se les adiciono fenolftaleína para seguir visualmente la frontera acido-base en función del tiempo, así como para tomar referencias de los puntos de muestreo. Las celdas de estudio de 12 cm x 6 cm x 4 cm fueron construidos de plástico acrílico, con electrodos de grafito (50 mm x 20 mm x 25 mm) laminados y conectados a una fuente de poder de 2 A, 30 V corriente continua estabilizada y regulable. La concentración de plomo en el volumen total de gel al 1,5 % fue equivalente a 100 ppm y el caolín hasta 7 %. Las diferencias de potencial en el trabajo fueron de 2 V, 3 V y 4 V con corriente de 20 mA. Los resultados finales se obtuvieron para las siguientes condiciones: tiempo total de electrolisis de 4 horas, 4 V, 20 mA y muestreo en campo eléctrico activo. Los análisis por voltamperetría de redisolución muestran una migración de plomo removible correspondiente. Una excelente posibilidad de control de migración resulto ser el pH y la conductividad medidos en diferentes puntos de la celda, también se comprobó que la concentración de plomo presente en las muestras se ha reducido considerablemente con respecto a la concentración inicial (-200 mV -400 mV) dentro de su rango característico, obteniendo un rendimiento del 57 % de la técnica. Mostrando que puede ser una técnica sujeta a optimización posterior. (Lázaro & Calvo, 2014, P. 5)

La presente investigación de (Escobar & Ocas, 2016) ofrece un estudio fisicoquímico en una celda de electroremediación 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. Así mismo mediante el análisis ANOVA se determinó que la concentración del ácido acético y la densidad de corriente afectan notablemente en el proceso de electroremediación para remover el plomo. Utilizando la técnica de electroremediación 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 electroremediación 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 (p. 9)

1.1.2. Bases teóricas

1.1.2.1. La actividad minera

La minería es una actividad extractiva que consiste en la obtención selectiva de minerales y otros materiales obtenidos de la corteza terrestre la cual, en muchos casos, implica la extracción física de grandes cantidades de materiales de la misma, para recuperar sólo pequeños volúmenes del producto deseado. Existe una gran variedad de minerales explotados a lo largo del territorio nacional como los metales (oro, plata, cobre, hierro, etc.), los minerales industriales (potasio, azufre, cuarzo, etc.). (García & Tongombol, 2014, p. 1)

1.1.2.2. Pasivos ambientales

Se definen a los pasivos ambientales como aquellas situaciones ambientales que representan un gran riesgo para el medio en el que vivimos. Generan grandes cantidades de agentes contaminadores que dañan el agua, el aire, el suelo y a la vez, alteran la calidad de vida de las personas. Por lo general, estos se producen cuando una actividad minera, gasífera o petrolera abandona el lugar en donde operaba sin reparar los daños ocasionados al medio ambiente. (Fondo Nacional del Ambiente, 2019, p. 1)

1.1.2.3. Relaves

Los relaves son roca finamente molida desde la cual los valores minerales deseados han sido extraídos mediante el uso de reactivos químicos. Este residuo toma la forma de una solución acuosa compuesta al menos en un 50% de agua y puede ser transportada a través de cañerías. Los relaves por lo general son vaciados en instalaciones de almacenamiento donde son retenidos

en estanques o diques construidos con los mismos relaves, desechos de minas o rellenos de tierra o roca.

Estas pueden generar la contaminación de aguas subterráneas y de superficie y en casos peores, pueden presentar fallas catastróficas –problema que será tratado en mayor detalle más adelante. Debido a que los relaves están compuestos por partículas finas, cuando se secan pueden ser fuentes de graves problemas de polvo. (Guía Minería, minerales y medio ambiente, 2004, p. 322).

1.1.2.4. Suelo

El suelo es un cuerpo natural, no consolidado, compuesto por sólidos (material mineral y orgánico), líquidos y gases, que se caracteriza por tener horizontes o capas diferenciales, resultado de las adiciones, pérdidas, transferencias y transformaciones de energía y materia a través del tiempo, y cuyo espesor puede ir desde la superficie terrestre hasta varios metros de profundidad (Volke & Velasco, 2005, p. 12).

1.1.2.5. Efectos en el suelo por la contaminación de metales

Los contaminantes provocan, por lo general, efectos negativos sobre el medio ambiente que pueden actuar directa o indirectamente sobre el sistema suelo.

A continuación, se describen algunos de los efectos de la contaminación.

1.1.2.5.1. Efectos directos

- Inhibición de la actividad enzimática de los mismos debido a la destrucción del poder de autodepuración por procesos de regeneración biológica normales, al haberse superado la capacidad de aceptación del suelo. Se ve afectado el ciclo biogeoquímico y la función de biofiltro.

- Disminución cualitativa y cuantitativa del crecimiento normal de las poblaciones de microorganismos y la fauna del suelo o bien, alteración de su diversidad, lo que aumenta la fragilidad del sistema.
- Cambios en la composición de los productos, con riesgo para la salud de los consumidores, al entrar determinados elementos en la cadena trófica.

1.1.2.5.2. Efectos indirectos

- Contaminación de las aguas superficiales y freáticas por procesos de transferencia. Se alcanzan concentraciones superiores a las consideradas aceptables.
- Variación de la disponibilidad de elementos a largo plazo en los suelos, como consecuencia de cambios en las propiedades físico-químicas de los mismos.
- Reducción de la fertilidad del suelo, al disminuir la flora y fauna del mismo.
- Modificación de la estructura del suelo debido a la pérdida de fertilidad del mismo. (Roca Fernández, 2009, p. 2)

1.1.2.6. Impactos ambientales

Se trata de los efectos que los relaves provocan en los entornos donde se depositan y confinan, lo cual, al hacerse sin las precauciones técnicas recomendadas, puede provocar daños en cuerpos acuíferos (ríos, lagunas, napa freática), suelos y atmósfera (Ver Cuadro N° 6). Tal vez lo más evidente de estos impactos tiene que ver con la degradación del paisaje que origina el relave, el cual, tras su acumulación, desaparece las coberturas vegetales, deseca lagunas y crea montículos que, al “crecer”, conforman colinas que

modifican el relieve de un territorio. Sin embargo, los impactos no se limitan a los aspectos físicos del entorno ambiental: sus efectos se extienden hacia las dimensiones químicas de los ecosistemas, con lo cual los recursos naturales se degradan para luego desaparecer (Bravo, 2010 p. 11).

Tabla 1

Impactos ambientales negativos de los relaves mineros en el suelo

Impactos ambientales derivados de los relaves	
Suelos	<ul style="list-style-type: none"> • Descarga de desechos de minas y residuos de procesamiento. • Trastorno de la agricultura, la silvicultura y la recreación por minas a cielo abierto. • Inestabilidad física de los depósitos, agravada por riesgo sísmico. • Deforestación.

Fuente: Glynn, J. y G. Heinke.

1.1.2.7. Plomo

El plomo es un metal gris azulado que ocurre naturalmente en pequeñas cantidades en la corteza terrestre. El plomo se encuentra ampliamente distribuido en el ambiente. La mayor parte proviene de actividades como la minería, manufactura industrial y de quemar combustibles fósiles.

El plomo presente en el suelo y en minerales puede entrar al aire, al agua y a suelos en otras áreas en polvo que levanta el viento y puede entrar al agua en efluente de lluvia o en agua que se filtra a través del suelo. En el ambiente, el plomo no puede ser destruido, solamente puede cambiar de forma. (Navarro, 2017)

1.1.2.7.1. 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. (Teutli, Ramirez, & De la Rosa , 2007, p. 136)

1.1.2.8. Densidad de corriente

El vector definido en cada punto de un conductor cuyo módulo es la intensidad por cada unidad de superficie a través de una superficie normal a la velocidad de arrastre en ese punto y su sentido el de la intensidad a través de esa superficie. Su unidad es el amperio por metro cuadrado (A/m^2). (Redondo, 2006)

1.1.2.9. Ácido oxálico

El ácido oxálico es un ácido orgánico saturado, tiene una cadena normal, es el más simple de los ácidos dicarboxílicos alifáticos y también se le conoce como ácido etanodioico; está clasificado dentro de los ácidos carboxílicos, estos son compuestos químicos cuya característica principal es el poseer un grupo funcional llamado carboxilo o carboxi. Dentro de su composición, el ácido carboxílico cuenta con el grupo carboxilo, esto se nota cuando

observamos su fórmula química: HOOC-COOH . Se caracteriza por ser uno de los ácidos orgánicos más fuertes y sus derivados son conocidos como oxalatos. En comparación con el ácido acético, por ejemplo, el ácido oxálico es aproximadamente 3,000 veces más fuerte.

El ácido carboxílico se presenta en las plantas del género Oxalis, de ahí se deriva el nombre oxálico. Pero también tiene una fuerte presencia en diferentes vegetales, como las espinacas, que son de consumo humano (Grupo Iluminian, 2011, p. 1)

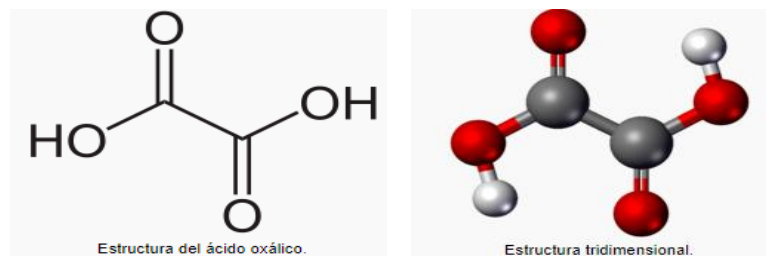


Figura 1. Estructura del ácido oxálico

Las principales propiedades del ácido oxálico son:

- Sólido incoloro
- Altos niveles de reacción con oxidantes fuertes.
- Soluble en agua y alcohol
- Punto de fusión de 101.5 °C
- Sabor amargo
- Forma oxalatos al reaccionar con bases.
- Muy ácido
- Se cristaliza fácilmente en el agua (QuimiNet, 2011)

1.1.2.10. Factores que influyen en el proceso de electroremediación

1.1.2.10.1. Potencial de hidrogeno (pH)

Los cambios de pH promueven reacciones de los metales con otras sustancias que se encuentran en el suelo de forma natural, este factor regula la movilidad de los contaminantes en el proceso de electroremediación. La hidrólisis del agua produce una disociación que genera iones hidrógeno (H^+) en el ánodo e iones hidroxilo (OH^-) en el cátodo, liberando oxígeno e hidrógeno respectivamente. La disociación genera un pH ácido cerca del ánodo y alcalino cerca del cátodo. Debido a la mayor movilidad del ion H^+ sobre el ion OH^- , el frente ácido viaja con mayor velocidad y por lo tanto el flujo electroosmótico se dirige preferencialmente hacia el cátodo. En el caso de existir metales adsorbidos, estos son solubilizados por el frente ácido y transportados hacia el cátodo. Cuando no se aplica lavado en los pozos, el frente alcalino penetrará a una velocidad menor a la del frente ácido y cuando ambos frentes se encuentran, se genera una zona en donde el pH cambia bruscamente (zona de transición), dando como resultado una frontera con un marcado cambio de pH (de 2 a 13 en menos de 0,5 cm), en esta zona los contaminantes se acumulan debido a que frecuentemente precipitan como hidróxidos metálicos (Yauri, 2014, p. 55).

1.1.2.10.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es diferente para cada tipo de suelo, está definida como la capacidad de un medio o espacio físico de permitir el paso de la corriente eléctrica. Para conocer la conductividad eléctrica de un suelo, es necesario ponerlo en suspensión acuosa y medirla con un conductímetro. La medida obtenida (siemens) es el inverso de la

resistencia a la conducción por centímetro de material, la cual tiene una relación empírica con la concentración de iones capaces de conducir la electricidad en solución acuosa ($1\mu\text{S}/\text{cm} \approx 0.52$ a 0.64 ppm de sales, ASTM 1994). En electroremediación, los cambios de pH del suelo modifican la conductividad global del medio por lo que se forman perfiles de voltaje. En algunos experimentos con suelos industriales contaminados, la conductividad del suelo se incrementa con el tiempo, debido a la penetración de los frentes ácido y alcalino, así como por la solubilización de las especies iónicas ya sea como resultado de los cambios de pH o por un aumento de temperatura (De la Rosa, Teulli, & Ramirez, 2007, p. 133).

1.2. Formulación del problema

¿Cómo influye la densidad de corriente y concentración de ácido oxálico en el proceso de electroremediación para la disminución de plomo en suelos del ámbito del pasivo ambiental minero Paredones, distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, departamento de Cajamarca?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la influencia de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico en la disminución de plomo por electroremediación en suelos del ámbito del pasivo ambiental minero Paredones, distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, departamento de Cajamarca.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar la densidad de corriente para la disminución de plomo por electroremediación en suelos del ámbito del pasivo ambiental minero Paredones, distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, departamento de Cajamarca.
- Determinar la concentración de ácido oxálico para la disminución de plomo por electroremediación en suelo del ámbito del pasivo ambiental minero Paredones, distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, departamento de Cajamarca.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

La densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico influyen significativamente en la disminución de la concentración de plomo por electroremediación en suelos del ámbito del pasivo ambiental minero Paredones, distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, departamento de Cajamarca.

1.4.2. Hipótesis específicas

H₁: La densidad de corriente disminuye la concentración de plomo por electroremediación en suelos del ámbito del pasivo ambiental minero Paredones del distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, departamento de Cajamarca.

H₂: La concentración de ácido oxálico disminuye la concentración de plomo por electroremediación en suelos del ámbito del pasivo ambiental minero Paredones del distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, departamento de Cajamarca.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La presente investigación es experimental cuantitativa: Experimental puro con diseño bifactorial, (con 3 niveles por variable independiente con un tamaño muestral de 3 repeticiones para cada nivel). Las variables independientes que se va a manipular son densidad de corriente y concentración de ácido oxálico para disminuir la concentración inicial de plomo en la variable dependiente, se tendrá el control y la valides interna de las variables independientes y la variable dependiente.

Tabla 2

Matriz del diseño experimental para los niveles de las variables de estudio

	Y ₁			Y ₂			Y 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
X ₂	M ₂₁₁	M ₂₁₂	M ₂₁₃	M ₂₂₁	M ₂₂₂	M ₂₂₃	M ₂₃₁	M ₂₃₂	M ₂₃₃
X ₃	M ₃₁₁	M ₃₁₂	M ₃₁₃	M ₃₂₁	M ₃₂₂	M ₃₂₃	M ₃₃₁	M ₃₃₂	M ₃₃₃

En la tabla se muestra el diseño experimental con sus variables de estudio, las cuales influirán en el porcentaje (%) de reducción de plomo.

Donde:

M : Medición a efectuar.

X₁....X₃ : Concentración de ácido oxálico (mol/L)

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

Muestras totales = (N° de Matriz) * (N° de réplicas) + Prueba patrón

$$= (3 \times 3) * (3) + 1$$

$$= 28$$

Variables independientes

- Variable 1 : Densidad de corriente 5.71, 12.07, 20.35 mA/cm²
- Variable 2 : Concentración de ácido Oxálico 0.01 M, 0.02 M, 0.03 M.

Variables dependientes:

- Variable 1 : % de disminución de plomo

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

2.2.1. Población

El suelo del ámbito del pasivo ambiental minero Paredones del distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, departamento de Cajamarca.

2.2.2. Muestra

Las 9 muestras tomadas del suelo del ámbito del pasivo ambiental minero Paredones distrito de San Bernardino, provincia de San Pablo, departamento de Cajamarca.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

2.3.1. Técnica

Para la recolección de muestras de esta investigación se utilizó la guía para muestreo de suelos en el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo y para el análisis de resultados estadísticos utilizamos el análisis de varianza (ANOVA)

2.3.2. Instrumentos

Equipos

- Balanza analítica
- Cámara Fotográfica
- Conductímetro
- Electrodo de referencia (sulfato de cobre)
- Equipo de protección personal
- Fuente Poder

- GPS
- pHmetro
- Computadoras
- Impresora

Materiales

- Acero inoxidable
- Bolsas ciflot
- Cables
- Espátula
- Libreta de campo
- Lápices
- Pipeta
- Palana
- Pico
- Recipiente de vidrio
- Tripley
- Vidrio
- Vaso de precipitación
- Tamicez
- Wincha

Reactivos

- Agua destilada.
- Ácido oxálico
- Sulfato de cobre

2.4. Procedimiento

2.4.1. Procedimiento de recolección de datos

Para la recolección de datos de esta investigación se revisó y analizó diferentes fuentes de información como: artículos, tesis, libros, revistas, páginas web, guías de muestreo, etc. Sobre tecnologías limpias para la remediación de suelos contaminados por metales.

- Luego se eligió el suelo influenciado por pasivos ambientales (relave) de la mina Paredones, en la región Cajamarca donde se desarrolló el estudio, se contactó al encargado de guardianía para obtener el permiso respectivo.
- Se realizó el reconocimiento del área en la que se realizó el proyecto.
- Se identificó los puntos de las coordenadas de muestreo:

Tabla 3
Coordenadas UTM de los puntos de muestreo.

COORDENADAS UTM		
Puntos de muestreo	Este	Norte
Punto 01	0740230.86	9204181.07
Punto 02	0740209.77	9204120.15
Punto 03	0740180.49	9204065.09
Punto 04	0740171.66	9204176.38
Punto 05	0740168.77	9204138.90
Punto 06	0740145.93	9204099.07
Punto 07	0740132.45	9204181.07
Punto 08	0740120.74	9204155.30
Punto 09	0740107.27	9204127.18

- La recolección de muestras estratificadas, se llevó a cabo haciendo calicatas de 50 cm de ancho, por 50 de largo y 50 cm de profundidad, según la guía para muestreo de suelos en el marco del decreto supremo N° 002-2013-MINAM.

Tabla 4

Profundidad del muestreo según el uso del suelo

Usos del suelo	Profundidad del muestreo
Suelo Comercial/Industrial/Extractivo	30 – 50 cm

(Guía para muestreo de suelos (Ministerio de Ambiente), 2014)

- Luego se procedió a elaborar la celda de electroremediación con dimensiones de 21.5 cm de largo, 7 cm de ancho y 11 cm de altura en el laboratorio certificado de la Universidad Nacional de Trujillo.
- Se realizó la caracterización del tipo de suelo (granulometría) con un tamiz de 1.18 mm y se analizó la concentración inicial de plomo.
- Se calibró los equipos que se utilizaron en la medición de cantidad de muestra y los equipos utilizados en el método de electroremediación.
- Los ensayos de electroremediación se prepararon con 1 kg de muestra la que se humectó con 200 mL de Acido oxálico ($C_2H_2O_4$) diluido en agua destilada, el que sirvió como electrolítico y ayudó en la remoción del plomo sin que haya una precipitación, por último, se homogenizó con una espátula la muestra hasta obtener la concentración deseada y se dejó reposar por 30 minutos.

- El proceso de electroremediación se aplicó en la celda mostrada en la fig. N°13 para lo cual se utilizó dos placas de acero inoxidable las cuales actuaron una como cátodo y la otra placa como ánodo, también se utilizó un electrodo de referencia de sulfato de cobre para medir el potencial. La muestra colocada en la celda se dejó actuar por 1 hora cada para cada ensayo.
- Se procedió a retirar la muestra luego de la aplicación del método de electroremediación.

Posteriormente de hacer el proceso de electroremediación en cada muestra, se analizó el contenido de plomo en el laboratorio certificado de la Universidad Nacional de Trujillo y con los resultados obtenidos, se procedió a realizar los cálculos de porcentaje de disminución del mismo.

2.4.2. Procedimiento de análisis de datos

El diseño aplicado es experimental, tipo bifactorial donde se estudió las variables y la matriz de diseño que se muestra en las tablas 5 y 6.

Tabla 5
Niveles de las variables de estudio

Variables independientes	Nivel de estudio
Factor A: concentración acida (mol/L)	X ₁ , X ₂ , X ₃
Factor B: Densidad de corriente (mA/cm ²)	Y ₁ , Y ₂ , Y ₃
Variable dependiente	
Concentración de plomo (%)	

Tabla 6
Modelo matricial para el experimento Bifactorial

CONCENTRACIÓN MOLAR	Y ₁			Y ₂			Y 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
X ₂	M ₂₁₁	M ₂₁₂	M ₂₁₃	M ₂₂₁	M ₂₂₂	M ₂₂₃	M ₂₃₁	M ₂₃₂	M ₂₃₃
X ₃	M ₃₁₁	M ₃₁₂	M ₃₁₃	M ₃₂₁	M ₃₂₂	M ₃₂₃	M ₃₃₁	M ₃₃₂	M ₃₃₃

- **Número Total de Pruebas** = (N° de matriz) * (N° de réplicas) + prueba patrón

$$= (9) * (3) + (1)$$

$$= 28$$

- **Prueba** (unidad de medida) = 1kg
- **Para el ácido oxálico**

Tabla 7
Concentraciones de Ácido oxálico

	<i>Ácido oxálico</i>
	0.01 M
Concentraciones	0.02 M
	0.03 M

En la presente investigación solo se ha utilizado tres concentraciones de Acido Oxálico la cual sirvió para acelerar el proceso de electrolisis (actúa como un electrolito).

- **Cálculos para la densidad de corriente**

Fórmula utilizada para calcular la densidad de corriente.

Ecuación 1

Para calcular la densidad de corriente (García, 2011, pág. 2).

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

Donde:

- ✓ El amperaje y el voltaje nos proporciona la fuente de poder.
 - ✓ El área del electrodo nos proporciona la parte sumergida del electrodo en la muestra.
- Para analizar los datos de este estudio utilizamos análisis estadístico (análisis de varianza) ya que 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 método para determinar si un conjunto de variables con $n > 2$ difieren entre sí, partiendo de los resultados obtenidos.
 - El primer concepto fundamental es que todo valor observado puede expresarse mediante las siguientes funciones:

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

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

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

- Luego se busca el valor F_{α} , V_1 y V_2 en las tablas de distribución de Fisher, donde α es el grado de confiabilidad (0.05), V_1 es el grado de libertad entre grupos y V_2 es el grado de libertad entre niveles.

Entonces tendremos como resultados los siguientes parámetros:

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

CAPÍTULO III. RESULTADOS

A continuación, se muestran los cálculos realizados en el proceso de electroremediación y datos obtenidos después de aplicar el método a las muestras del suelo del ámbito del pasivo ambiental de la mina de Paredones; los que se analizó estadísticamente con Análisis de Varianza (ANOVA).

3.1. Cálculo del área de los electrodos durante el proceso de electroremediación

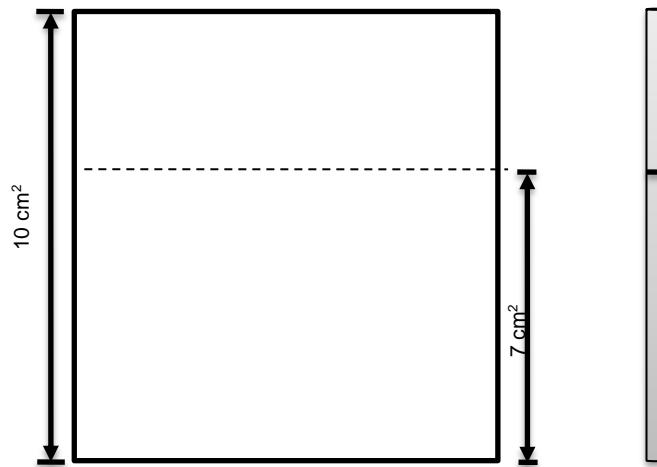


Figura 2. Área sumergida de los electrodos

En esta figura observaremos las medidas de los electrodos utilizados, calculando el área sumergida en la muestra según la fórmula siguiente (Ramos, 2013, p. 15)

$$10 \text{ cm}^2 * 7 \text{ cm}^2 = 70 \text{ cm}^2 \text{ por electrodo,}$$

- Como se utilizaron dos electrodos por celda,

$$70 \text{ cm}^2 * 2 = 140 \text{ cm}^2$$

- El área real expuesta por ensayo fue de 140 cm²

3.2. Cálculos del proceso de electroremediación.

Tabla 8

Calculo de la densidad de corriente durante el proceso de electroremediación

Voltaje aplicado (V)	Amperaje Registrado (A)	Amperaje registrado (mA)	Área de electrodos (cm ²)	Densidad de corriente (mA/ cm ²)
10	0.80	800	140	5.71
20	1.69	1690	140	12.07
30	2.85	2850	140	20.35

En la tabla se muestra los voltajes aplicados a las celdas de electroremediación, los amperajes registrados en la fuente de energía al aplicar el voltaje en cuestión y las densidades de corriente obtenidas según la formula N° 1.

3.3. Resultado de la muestra patrón de plomo obtenido de laboratorio.

Tabla 9

Resultado inicial de plomo antes de aplicar el método de electroremediación

Muestra	Plomo mg/kg
M1	4638.24

En la siguiente tabla se muestra el resultado de plomo inicial de la muestra de suelo del ámbito del pasivo ambiental de la mina de Paredones antes de aplicar los ensayos de electroremediación. Dato obtenido del laboratorio de la Universidad Nacional de Trujillo.

3.4. Resultados de laboratorio después del proceso de electroremediación.

Tabla 107

Resultados obtenidos, después de aplicar el tratamiento de electroremediación

		Densidad de corriente (mA/cm²)		
		5.71	12.07	20.35
Ácido oxálico		3722.70	3308.96	2397.07
	0.01	3759.34	3344.21	2337.70
		3722.70	3295.51	2422.58
		3481.97	3080.76	1507.45
	0.02	3493.57	3149.87	1407.26
		3507.95	3110.91	1381.75
		2732.66	1769.51	756.97
	0.03	2664.98	1848.83	927.66
		2761.74	1744.93	574.22

En la tabla se muestra los datos obtenidos de las muestras analizadas en el laboratorio de la Universidad Nacional de Trujillo después de aplicar el tratamiento de electroremediación, y la cantidad de plomo que aún queda en las muestras.

Tabla 11
Plomo removido en las muestras después del tratamiento de electroremediación

		Densidad de corriente (mA/cm²)		
		5.71	12.07	20.35
Ácido oxálico		915.54	1329.28	2241.17
	0.01	878.90	1294.03	2300.54
		915.54	1342.73	2215.66
		1156.27	1557.48	3130.79
	0.02	1144.67	1488.37	3230.98
		1130.29	1527.33	3256.49
		1905.58	2868.73	3881.27
	0.03	1973.26	2789.41	3710.58
		1876.50	2893.31	4064.02

Cantidades de plomo removido después de restar a la muestra patrón cada uno de los resultados obtenidos en laboratorio después de aplicar el tratamiento de electroremediación con respecto a la muestra inicial 4638.24 mg/kg.

Tabla 12
Porcentajes de remoción de plomo después del método de electroremediación.

		Densidad de corriente (mA/cm ²)		
		5.71	12.07	20.35
Acido oxálico	0.01	19.74	28.66	48.32
		18.95	27.90	49.60
		19.74	28.95	47.77
	0.02	24.93	33.58	67.50
		24.68	32.09	69.66
		24.37	32.93	70.21
	0.03	41.08	61.85	83.68
		42.54	60.14	80
		40.46	62.38	87.62

Con los datos de la tabla 11 se ha procedido a calcular los porcentajes removidos con el proceso de electroremediación, donde la mayor cantidad removida fue de 87.62 % con 20.35 mA/cm² y una concentración de 0.03 M de ácido oxálico.

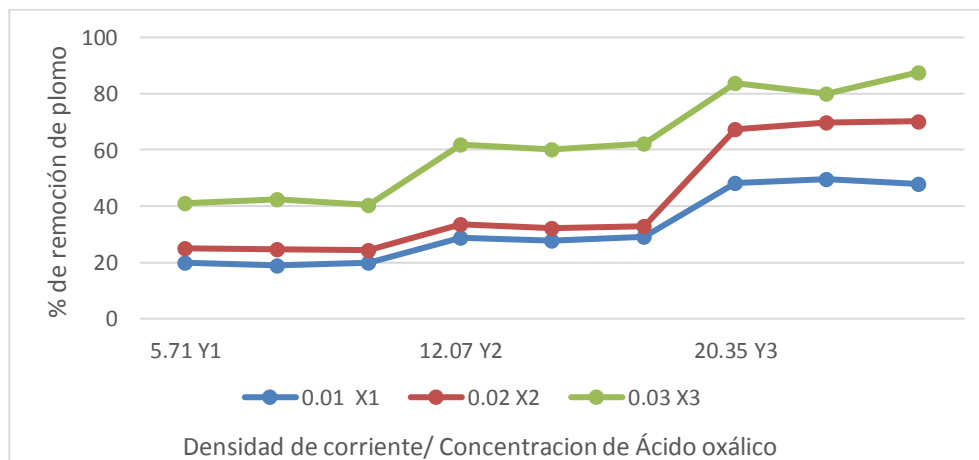


Figura 3. Porcentaje (%) de remoción de plomo con sus dos variables

3.5. Resultados del Análisis de varianza (ANOVA) para la remoción de plomo.

La técnica ANOVA es uno de los métodos estadísticos más utilizados ya que es un método muy flexible que permite analizar datos experimentales cuyo valor ha sido constatado en diversas circunstancias. A continuación se muestra los datos individuales de la concentración de ácido oxálico y la densidad de corriente para la remoción de plomo en los suelos del ámbito del pasivo ambiental de la mina de Paredones San Pablo Cajamarca. Según las pruebas realizadas y con los datos estadísticos obtenidos mediante método de análisis de varianza (ANOVA) efectuados a un nivel de confianza del 95 %, se plantea lo siguiente:

Nivel de significancia

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

Criterio de rechazo

Se rechaza la hipótesis nula (H_0) 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.

✓ Concentración de ácido oxálico

Fa: Concentración de ácido oxálico tenemos que $F_0 > F_{\text{Tabular}}$: $895.92 > 3.55$ entonces las hipótesis.

- **Hipótesis nula (H_0):** La concentración de ácido oxálico no afecta la remoción de plomo
- **Hipótesis alterna (H_1):** La concentración de ácido oxálico si afecta la remoción de plomo

Se acepta la **Hipótesis Alterna**: La concentración de ácido oxálico si afecta la remoción de plomo.

✓ **Densidad de corriente**

F_0 : Densidad de corriente tenemos que $F_0 > F_{\text{tabular}}$: $1494.07 > 3.55$ 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.

Se acepta la **Hipótesis alterna**: La densidad de corriente si afecta la remoción de plomo.

✓ **Concentración de ácido oxálico y densidad de corriente**

F_{ab} : Interacción entre la concentración de ácido acético y la densidad de corriente tenemos que $F_0 > F_{\text{tabular}}$ $40.675 > 2.93$

- **Hipótesis nula (H_0):** La concentración de ácido oxálico y la densidad de corriente no afecta la remoción de plomo.
- **Hipótesis alterna (H_1):** La concentración de ácido oxálico y la densidad de corriente si afecta la remoción de plomo.

Se acepta la **Hipótesis alterna**: La interacción de concentración de ácido oxálico y la densidad de corriente si afecta la remoción de plomo.

Tabla 13
Cuadro de datos de ANOVA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F ₀	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	4201.872	2	2100.936	895.92	0.00000000000000000095212	3.555
Columnas	7007.21	2	3503.605	1494.07	0.0000000000000000000989	3.555
Interacción	381.5292	4	95.382	40.675	0.00000000879150993426662	2.928
Dentro del Grupo	42.21007	18	2.345			
Total	11632.82	26				

Dado que el valor de significancia es menor que 0.05, la variable de interacción de concentración de ácido oxálico y la densidad de corriente si afecta la remoción de plomo, por lo que se rechaza la hipótesis nula por lo cual se concluye que hay efectos significativos en la disminución de la concentración de plomo por el método de electroremediación.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

Según (Flores Rodríguez, 2011) se obtiene resultados positivos en los procesos de electroremediación debido a que se separan los iones con el electrolito (ácido oxálico) y la densidad de corriente aplicada a través de los electrodos generando que los aniones sean atraídos por el ánodo mientras que los cationes hacia el cátodo. Remover el plomo en todos los ensayos; es por ello que decimos que el método de electroremediación es un método adecuado para el tratamiento de suelos contaminados con metales pesados.

Los valores obtenidos al analizar las concentraciones de plomo en suelos del ámbito del pasivo ambiental de la mina de Paredones hacen referencia a un suelo contaminado por la existencia de metales pesados (plomo), según Escobar & Ocas (2016) afirman que este suelo contaminado continúa generando altas concentraciones de contaminantes que afecta a los ecosistemas que se encuentran aledaños al mismo como el efluente San Pablo que pasa a pocos metros del suelo influenciado por relaves mineros.

Mediante el método de electroremediación realizado en este estudio a nivel de laboratorio es posible obtener resultados positivos para todos los experimentos con respecto al valor inicial de plomo (4638.24 mg/kg) como se observa en la fig. 4, pero en algunos ensayos con mejores resultados. De la información bibliográfica de Pérez (2017) se observa que también tuvo éxito en todos sus ensayos, mostrando mejores resultados en dos de los experimentos (E y H) utilizando el mismo método de electroremediación ya que este método es eficiente para descontaminar suelos contaminados por iones pesados como el plomo.

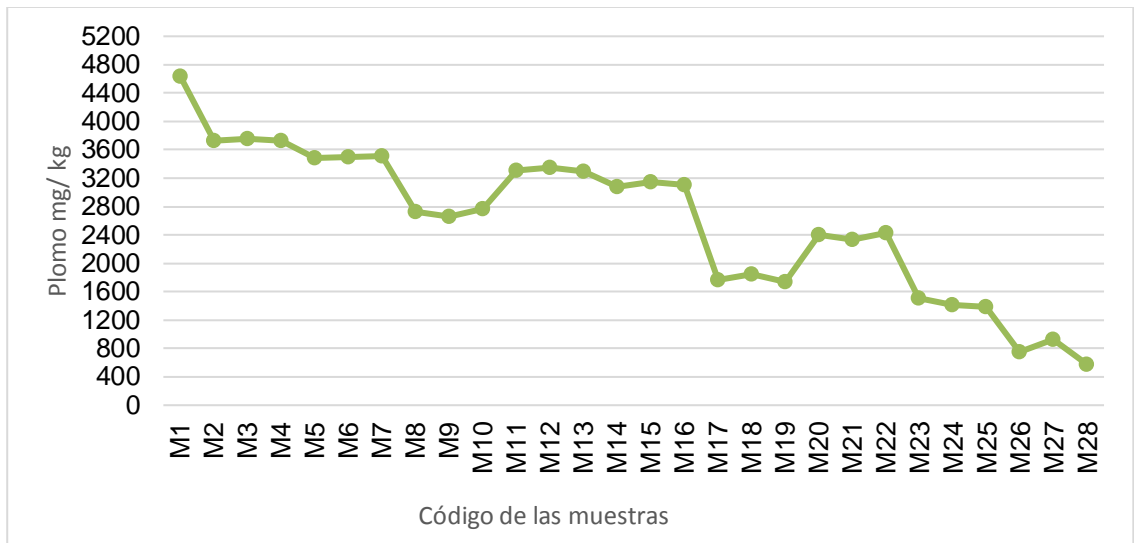


Figura 4. Resultados de la remoción de plomo con relación a la muestra inicial

En la fig. 5 Se observa una disminución de la concentración de plomo en todas las secciones de suelo en todos los experimentos con respecto al inicial, pero la muestra que mayor remoción presenta es la utilizada en el experimento 27, alcanzando una disminución en la concentración del 87.62 % de remoción de plomo, aplicado a una densidad de corriente de 20.35 mA/cm² y una concentración de 0.03 M, Según García et al (2014) realizó una investigación con el mismo método, pero diferente electrolito (ácido acético) a este estudio, con el mismo fin, de remover plomo por ser un metal pesado muy peligroso, donde solo lograron remover 12 % de plomo muchos más bajo que el nuestro.

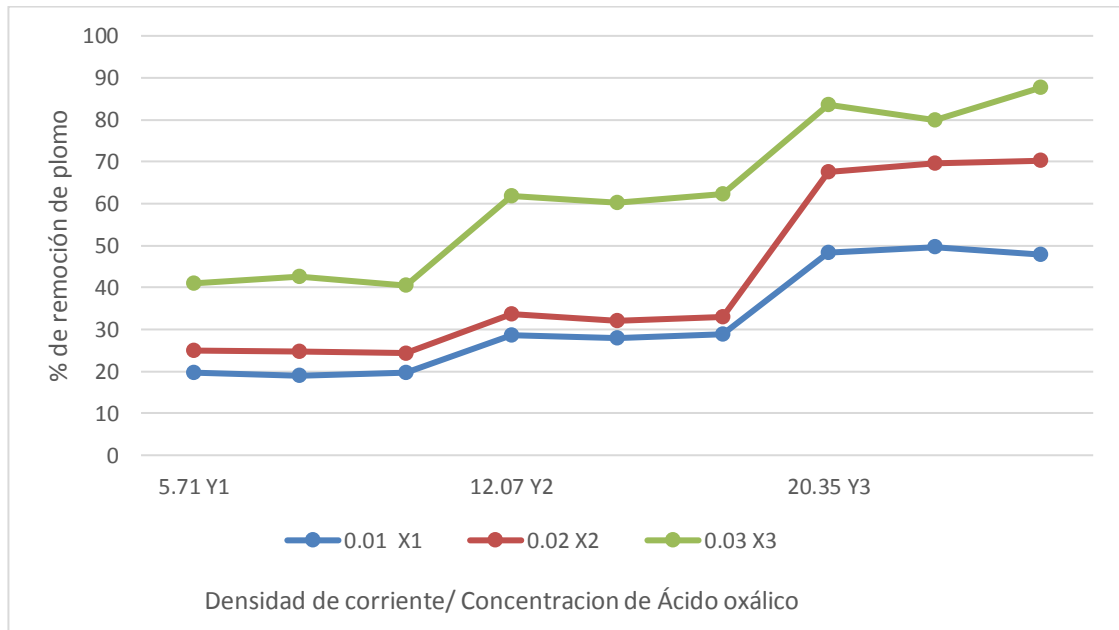


Figura 5. Análisis de las variaciones de plomo removido

4.2. Conclusiones

- Se evaluó que existe influencia significativa de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico en el método de electroremediación para la disminución de plomo, ya que en este estudio se logró remover 87.62 % de plomo de los suelos del ámbito del pasivo ambiental de la mina Paredones San Pablo - Cajamarca.
- Se determinó que la densidad de corriente más óptima según los ensayos realizados, es de 20.35 mA/cm². Ya que con esta densidad se obtuvieron las remociones más altas de plomo en los suelos del ámbito de los pasivos ambientales de la mina Paredones San Pablo - Cajamarca.
- Al obtener los análisis del laboratorio se concluyó que la concentración de ácido oxálico para la disminución de plomo más eficiente es de 0.03 M, ya que las remociones obtenidas son cantidades notables y se encuentran dentro del rango 40 % y 87.62 % de remoción de plomo de los suelos del ámbito de los pasivos ambientales de la mina Paredones San Pablo - Cajamarca.

- Por último, se concluye que la electroremediación es una técnica eficiente para remediar diversos tipos de suelo contaminado por metales pesados como el plomo lo cual se puede evidenciar en este estudio.

REFERENCIAS

- Arevalo, C. (2016). *Influencia de la Densidad de Corriente y Tiempo de residencia*. Obtenido de <http://dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/2318/TESIS%20MAESTRIA%20CESAR%20POL%20AREVALO%20ARANDA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Benites , R., & Leiva , Y. (Septiembre de 2015). *Medicion de las Propiedades Geoquimicas y Medicas del Pasivo Ambiental Relave Mina Paredones* . Obtenido de <http://refi.upnorte.edu.pe/bitstream/handle/11537/5565/Benites%20Mostacero%2c%20Roger%20Hans%20y%20Leiva%20Cercado%20Yanet.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bravo, F. (29 de Diciembre de 2010). *Impacto de los Relaves mineros en el Perú*. Obtenido de [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/3E8B99831ACE6AE90525814000716FBA/\\$FILE/363_IT021_04011111_mineria.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/3E8B99831ACE6AE90525814000716FBA/$FILE/363_IT021_04011111_mineria.pdf)
- Carbone stainless steel. (2016). Obtenido de <https://www.empresascarbhone.com/pdf/ficha-tecnica-del-acero-inoxidable.pdf>
- Escobar , A., & Ocas, S. (2016). *Repositorio de Tesis upn - Electrorremediacion de suelos contaminados por plomo* . Obtenido de <http://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/10682/Escobar%20Misahuaman%2C%20Alexander%20Jhonson%20%20Segundo%20Martin%2C%20Ocas%20Izquierdo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- García , C., & Tongombol , D. (Octubre de 2014). *Relaves Mineros*. Obtenido de http://conacin.upeu.edu.pe/wp-content/uploads/2014/10/CIn_3415.pdf
- García , L., Vargas , M., & Reyes , V. (2011). Electrorremediación de suelos arenosos contaminados por Pb, Cd y As provenientes de residuos mineros, utilizando agua y ácido acético como electrolitos. *Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales*, 24-29.
- García, L., Vargas, M., & Reyes, V. (2010). Electrorremediación de plomo en suelos contaminados de Zimapán Hidalgo . *Sociedad minera de electroquímica*, 1-2.
- Granda, J. (2011). *Evaluación de la técnica de electrorremediación de suelos contaminados por metales*. Obtenido de <http://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/1562/3/>

Granda_Laso_Jorge_Francisco.pdf

García Saldaña, C. A., & Tongombol Chuquiango, V. (2014). *Conacín*. Obtenido de http://conacin.upeu.edu.pe/wp-content/uploads/2014/10/CIn_3415.pdf

Grupo Iluminian. (Diciembre de 2011). *Usos y aplicaciones del ácido oxálico*. Obtenido de <https://www.quiminet.com/articulos/usos-y-aplicaciones-del-acido-oxalico-2652706.htm>

Lazaro, J., Ramirez, J., & Cjuno, A. (2015). *Minería, Minerales Y Medio Ambiente*. Obtenido de <http://www.reddeperuanos.com/eci2015v/000modelodeelectrorremediacion.pdf>

Mellado, j. (2008). Obtenido de <http://www.uaaan.mx/~jmelbos/tablas/distf.pdf>

Ministerio del Ambiente. (2014). *Guía para muestreo de suelos*. Obtenido de http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1

Moreno, P. (mayo de 2017). *Disminucion de la concentracion de cadmio con la técnica de electrorremediación*. Obtenido de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/42148/PAOLA%20GUADALUPE%20MORENO%20ASCENCIO.pdf?sequence=1>

Navarro , A. (2016). *Perfil toxicologico del plomo*. Obtenido de <https://docplayer.es/17307872-Perfil-toxicologico-de-plomo-pb-numero-cas-7439-92-1.html>

Ortiz, K., & Vargas, E. (Abril de 2015). *Remocion del cobre del relave mediante el método electroquímico*. Obtenido de <http://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/UNCP/3743/Ortiz%20Soto-Vargas%20Crisostomo.pdf?sequence=1>

Pérez Ramos, E. (Mayo de 2017). *Repositorio digital de la universidad Agraria Antonio Narro*. Obtenido de <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/42149>

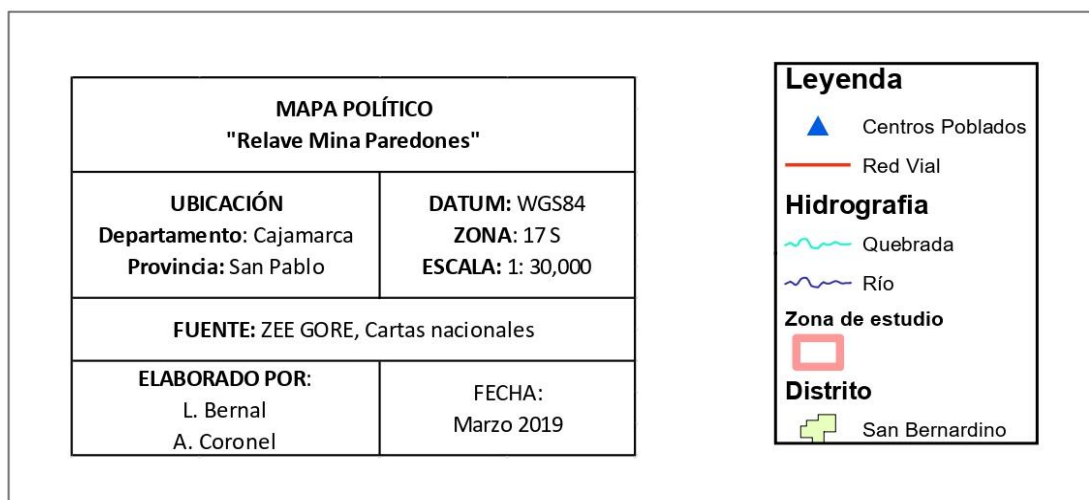
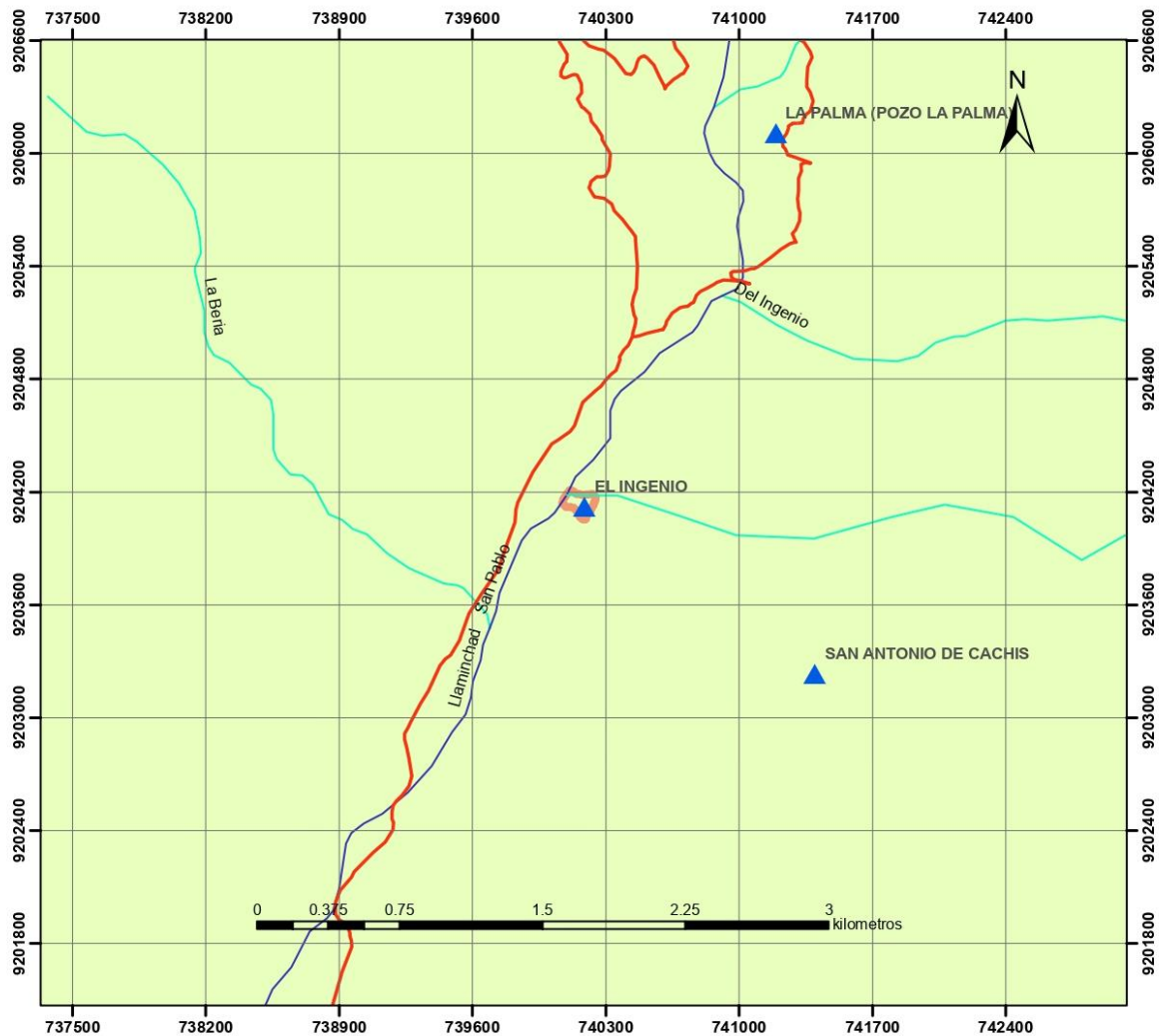
Ramos, P. (2013). *Matemáticas II*. Obtenido de <http://www3.uah.es/pramos/docencia/Mat-II/Teoria/Tema-3-Area-print.pdf>

Redondo, M. (Febrero de 2006). *Diccionario de Ingeniería eléctrica*. Obtenido de <http://electricidad.usal.es/Principal/Circuitos/Diccionario/Diccionario.php?b=id:62>

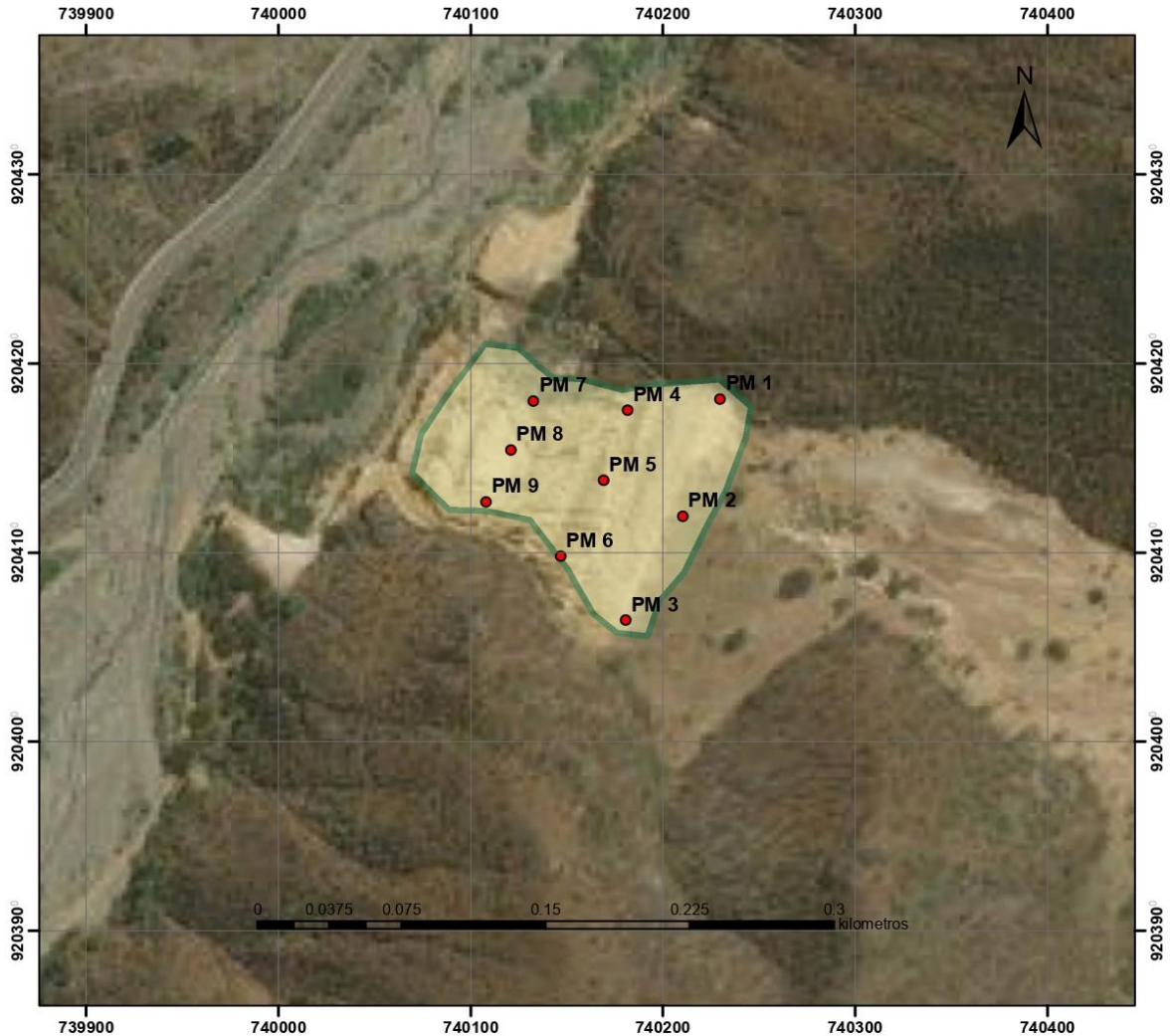
- Roca Fernández, A. (2015). *Centro de Investigaciones Agrarias de Mabegondo*. Obtenido de http://www.infoagro.com/abonos/contaminacion_suelos_metales_pesados.htm
- Rubiis, K. (Marzo de 2009). *Electrolisis en suelo*. Obtenido de <http://suelo-el.blogspot.com/2009/03/la-electrolisis-o-electrolisis-es-un.html>
- Teutli, M., Ramirez, M., & De la Rosa , D. (2007). Electrorremediación de suelos contaminados. Obtenido de <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v23n3/v23n3a3.pdf>
- Volke, T., Velasco, J., & De la Rosa , D. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides*. Mexico: SyG Editores, S.A. [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)
- Yauri, C. (2014). *repositorio de la universidad nacional de ingeniería*. Obtenido de http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/4096/1/yauri_gc.pdf

ANEXOS

Anexo N° 1. Mapa Político




Anexo N° 2. Mapa Satelital




MAPA SATELITAL "Relave Mina Paredones"	
UBICACIÓN Departamento: Cajamarca Provincia: San Pablo	DATUM: WGS84 ZONA: 17 S ESCALA: 1: 3,000
FUENTE: ZEE GORE, Cartas nacionales	
ELABORADO POR: L. Bernal A. Coronel	FECHA: Marzo 2019

Leyenda

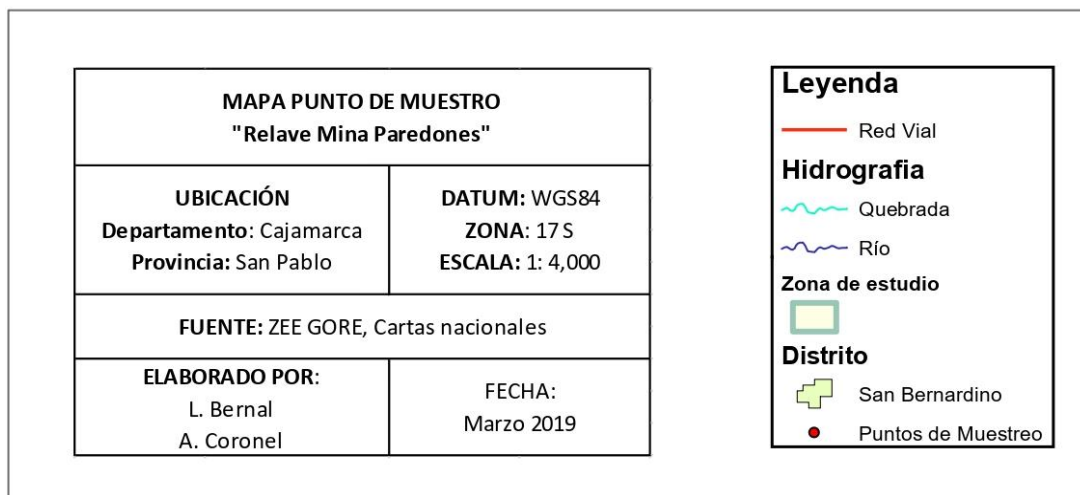
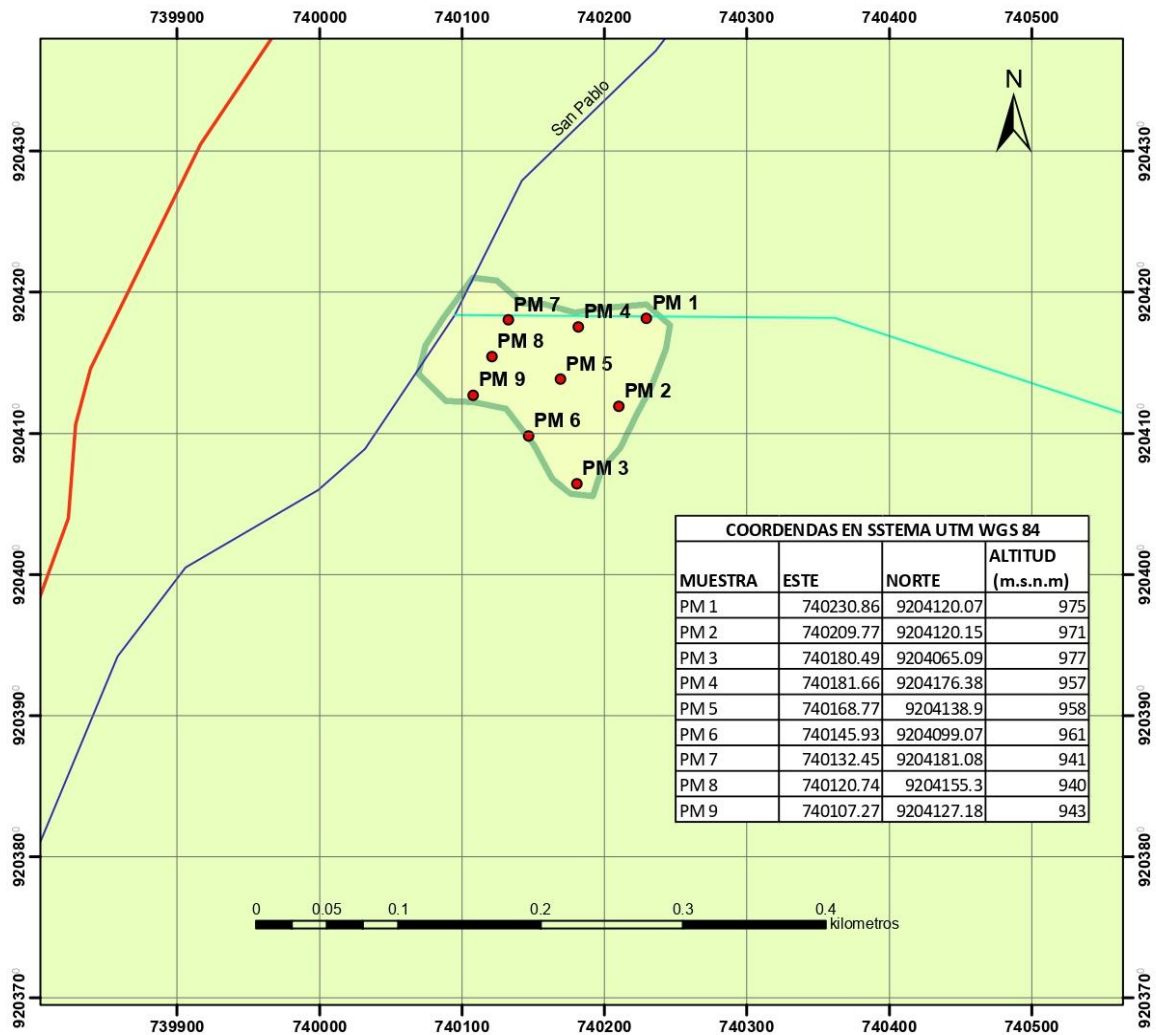
Zona de estudio



Puntos de Muestreo



Anexo N° 3. Ubicación de puntos de muestreo (GPS)



Anexo N° 4. Recolección de Muestras



Figura 6. Calicata

Se realizó una calicata de 50 cm por 50 cm según la guía para muestreo de suelos en el marco del decreto supremo N° 002-2013-MINAM



Figura 7. Coordenadas UTM

Se recolecto las coordenadas de cada uno de los puntos de muestreo según el modelo de Gps “Mapsgps 6s Garmin” que nos facilitó la Universidad Privada del Norte.

Anexo N° 5. Procedimiento para la aplicación del método de electroremediación

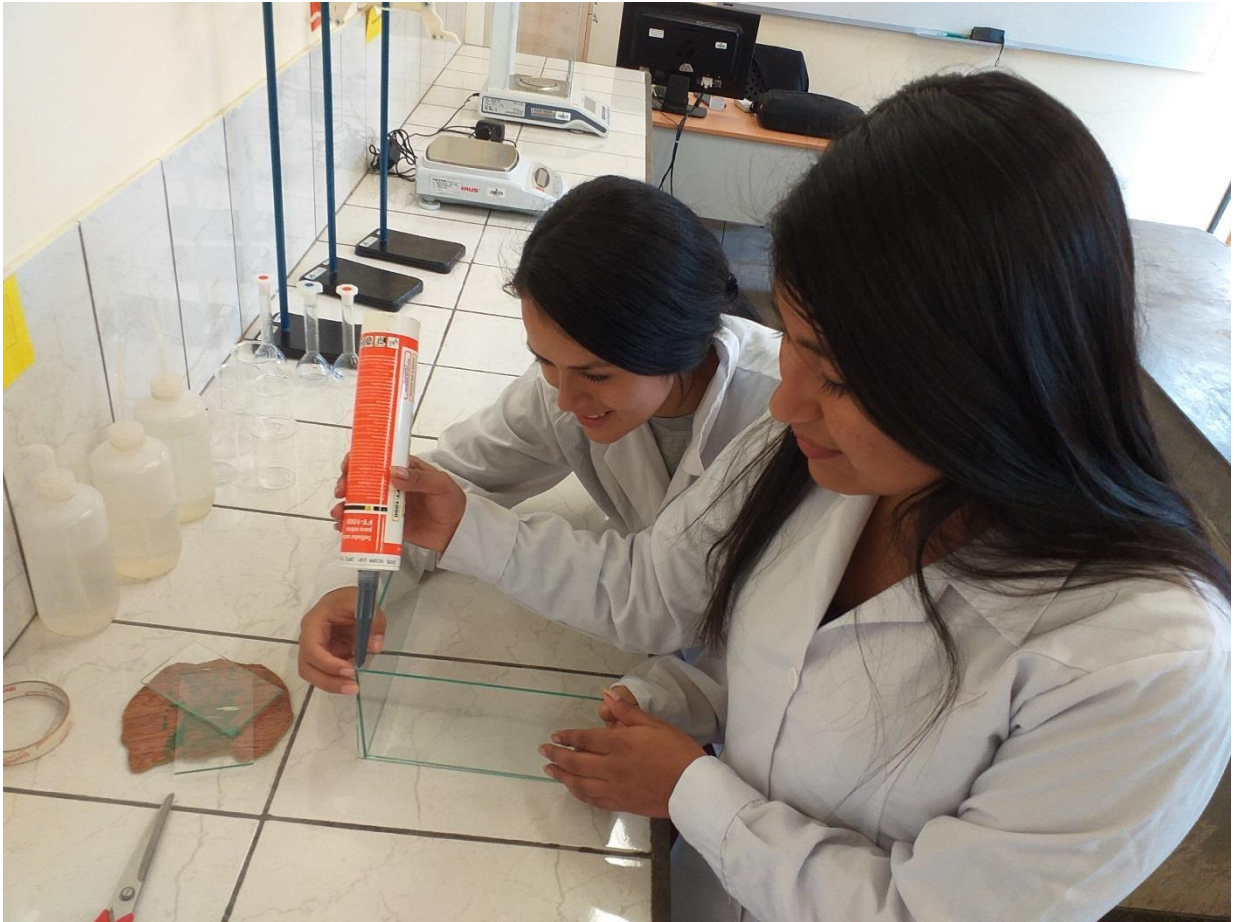


Figura 8. Construcción de la celda de electroremediación

Se construyó la celda de electroremediación a nivel de laboratorio según el diseño bach.



Figura 9. Tamizado de muestras



Figura 10. Pesado de muestras

Se procedió a pesar las muestras cada una de 1 kg en la balanza analítica del laboratorio de la universidad nacional de Trujillo.



Figura 11. Humectación de muestras con las diferentes concentraciones de ácido oxálico

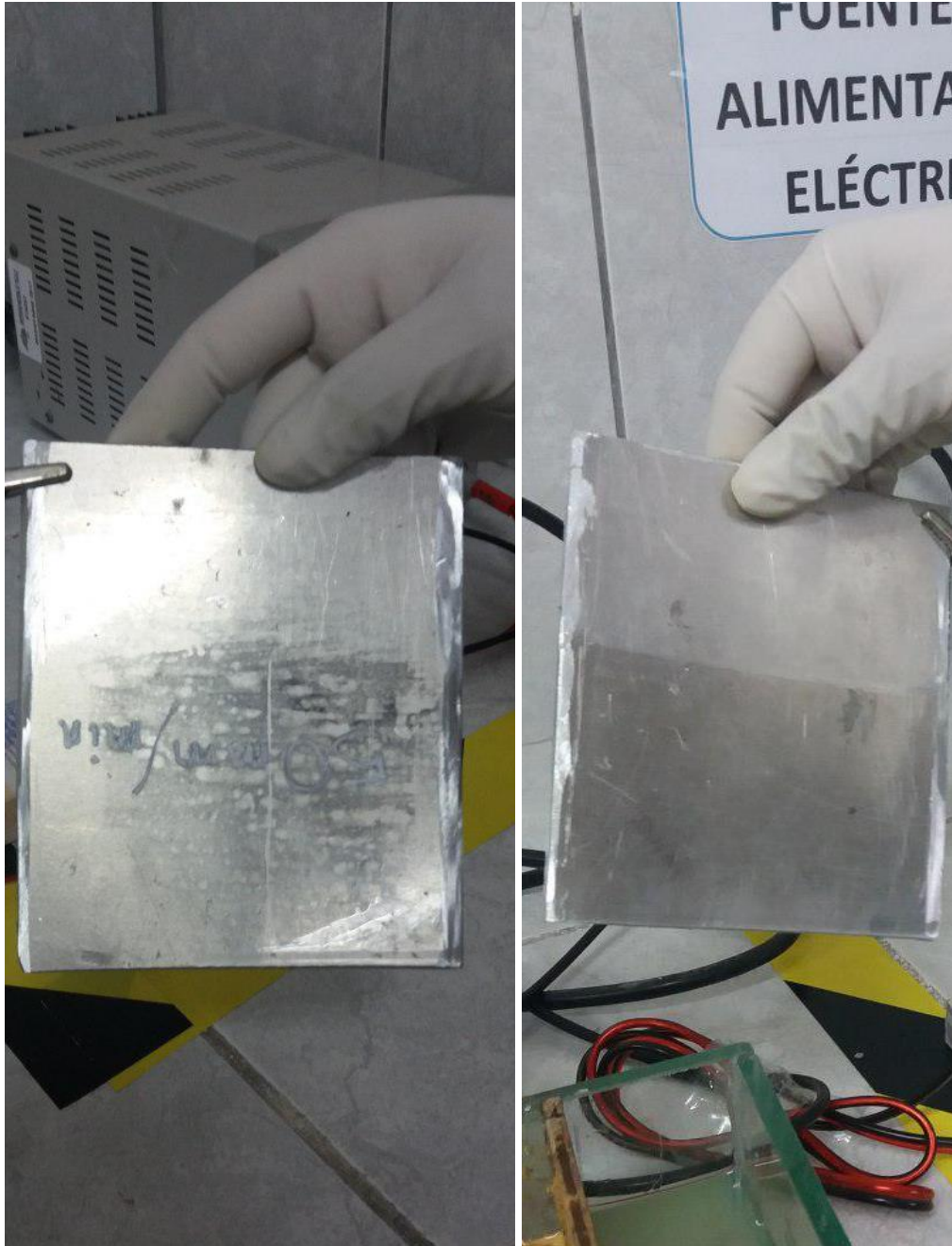


Figura 12. Electroodos SS – AISI 304 para el tratamiento de electroremediación

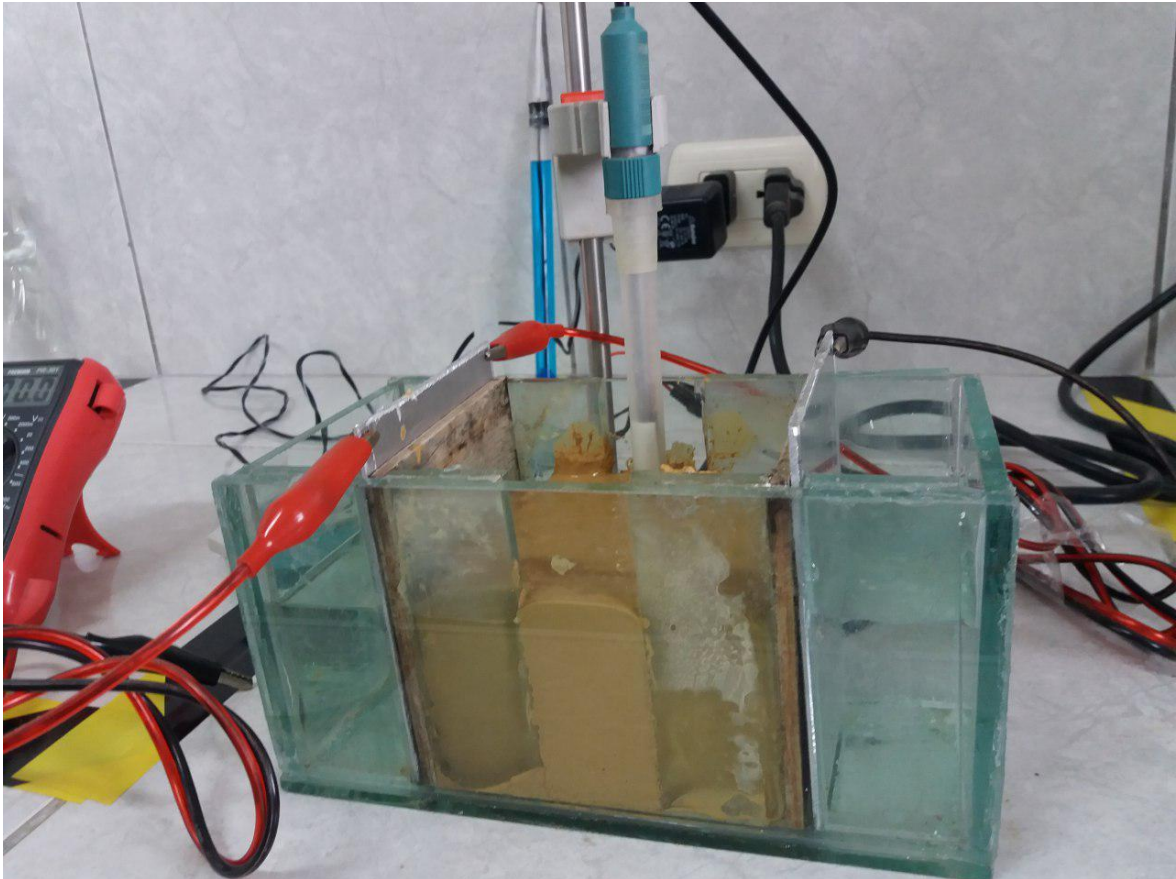


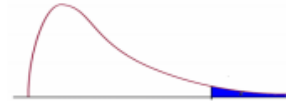
Figura 13. Tratamiento electroquímico

Anexo N° 6. Cuadro estadístico de la distribución de F (0,05)

(Mellado, 2008, p. 1)

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	19.41	19.43	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

Anexo N° 7. Ficha técnica AISI-304

FICHA TÉCNICA DEL ACERO INOXIDABLE

TABLA DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL ACERO INOXIDABLE			SERIE 300		
			Acero al Cromo - Níquel	Acero al Cromo - Níquel - Molibdeno	
DESIGNACIÓN	TIPO AISI		304	316	
	COMPOSICIÓN QUÍMICA		C ≤ 0.08%* Si ≤ 1.00% Mn ≤ 2.00% Cr 18% - 20%* Ni 8% - 10,5%*	C ≤ 0.08%* Si ≤ 1.00% Mn ≤ 2.00% Cr 16% - 18%* Ni 10% - 14%* Mo 2% - 2.5%*	
PROPIEDADES FÍSICAS	PESO ESPECÍFICO A 20C (DENSIDAD)	(g/cm ³)	7.9	7.95 - 7.98	
	MÓDULO DE ELASTICIDAD	(N/mm ²)	193,000	193,000	
	ESTRUCTURA		AUSTENÍTICO	AUSTENÍTICO	
	CALOR ESPECÍFICO A 20C	(J/kg K)	500	500	
	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA A 20C/100C	(W/m K)	15 / 16	15 / 16	
	COEFICIENTE DE DILATACIÓN A 100C	(x 10 ⁻⁶ C ⁻¹)	16.0 - 17.30	16.02 - 16.5	
	INTERVALO DE FUSIÓN	(C)	1398/1454	1371/1398	
PROPIEDADES ELÉCTRICAS	PERMEABILIDAD ELÉCTRICA EN ESTADO SOLUBLE RECOCIDO		AMAGNÉTICO 1.008	AMAGNÉTICO 1.008	
	CAPACIDAD DE RESISTENCIA ELÉCTRICA A 20C	(μΩm)	0.72 - 0.73	0.73 - 0.74	
PROPIEDADES MECÁNICAS A 20C	DUREZA BRINELL RECOCIDO HRB/CON DEFORMACIÓN EN FRÍO		130150 / 180330	130185 / -	
	DUREZA ROCKWELL RECOCIDO HRB/CON DEFORMACIÓN EN FRÍO		7088 / 1035	7085 / -	
	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN RECOCIDO / DEFORMACIÓN EN FRÍO	Rm (N/mm ²)	520 - 720 / 540 - 750	540690 / -	
	ELASTICIDAD RECOCIDO / CON DEFORMACIÓN EN FRÍO	Rp (N/mm ²)	210 / 230	205410 / -	
	ELONGACIÓN (A ₅) MIN	(%)	≥ 45		
	RESILIENCIA KCUL / KVL	(J/cm ²)	160 / 180	160 / 180	
PROPIEDADES MECÁNICAS EN CALIENTE	ELASTICIDAD	RP(0.2) A 300C/400C/500C	(N/mm ²)	125 / 97 / 93	140 / 125 / 105
		RP(1) A 300C/400C/500C	(N/mm ²)	147 / 127 / 107	166 / 147 / 127
	LÍMITE DE FLUENCIA A 500C/600C/700C/800C	σ _{1/10⁶} /t (N/mm ²)	68 / 42 / 14.5 / 4.9	82 / 62 / 20 / 6.5	
TRATAMIENT. TÉRMICOS	RECOCIDO COMPLETO RECOCIDO INDUSTRIAL	(OC)	ENFR. RÁPIDO 1008/1120	ENFR. RÁPIDO 1008/1120	
	TEMPLADO		NO ES POSIBLE	NO ES POSIBLE	
	INTERVALO DE FORJA INICIAL / FINAL	(C)	1200 / 925	1200 / 925	
	FORMACIÓN DE CASCARILLA, SERVICIO CONTINUO / SERVICIO INTERMITENTE		925 / 840	925 / 840	
OTRAS PROPIEDADES	SOLDABILIDAD		MUY BUENA	MUY BUENA	
	MAQUINABILIDAD COMPARADO CON UN ACERO BESSEMER PARA a. B1112		45%	45%	
	EMBUTICIÓN		MUY BUENA	BUENA	

* Son aceptables tolerancias de un 1%

(Carbone stainless steel, 2016, p. 1)

Anexo N° 8. Resultados de laboratorio de las muestras de suelo.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

Facultad de Ingeniería

Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

ANÁLISIS DE RELAVE DE MINA PAREDONES SAN PABLO – CAJAMARCA

Solicitante: BERNAL GARCÍA, Loidita/ CORONEL VÁSQUEZ, Anai.

Investigación: *Influencia de la densidad de corriente y la concentración de ácido oxálico para la disminución del plomo por Electrorremediación en relave de mina Paredones San Pablo – Cajamarca.*

Muestras: Puestos en laboratorio (28 muestras de relave de mina)

Fecha: 10 de julio del 2018

REMOCIÓN DE Pb

Remoción de Pb (mg/Kg)			
Acido Oxálico [M]	Densidad de corriente (mA/cm ²)		
	10	20	30
0.01	3722.7	3308.96	2397.07
	3759.34	3344.21	2337.7
	3722.7	3295.51	2422.58
0.02	3481.97	3080.76	1507.45
	3493.57	3149.87	1407.26
	3507.95	3110.91	1381.75
0.03	2732.66	1769.51	756.97
	2664.98	1848.83	927.66
	2761.74	1744.93	574.22

Contenido inicial de Pb

Acido oxálico [M]	Sin densidad de corriente
0	4638.24

Se adjunta a éstos valores, los valores medidos de pH después del proceso de electrorremediación.



Av. Juan Pablo II s/n - Teléfono: (044) - 203510
2do. Piso Pabellón de Ingeniería M.M.M.
(Ciudad Universitaria)

www.unitru.edu.pe
dptoingmat@hotmail.com

Anexo N° 9. Estándares de Calidad Ambiental para suelo

N°	Parámetros	Usos del Suelo			Método de ensayo
		Suelo Agrícola	Suelo Residencial/ Parques	Suelo Comercial/ Industrial/ Extractivos	
II Inorgánicos					
15	Cianuro libre (mg/kg MS)	0,9	0,9	8	EPA 9013-A/APHA-AWWA-WEF 4500 CN F
16	Arsénico total (mg/kg MS) ₍₂₎	50	50	140	EPA 3050-B EPA 3051
17	Bario total (mg/kg MS) ₍₂₎	750	500	2 000	EPA 3050-B EPA 3051
18	Cádmio total (mg/kg MS) ₍₂₎	1,4	10	22	EPA 3050-B EPA 3051
19	Cromo VI (mg/kg MS)	0,4	0,4	1,4	DIN 19734
20	Mercurio total (mg/kg MS) ₍₂₎	6,6	6,6	24	EPA 7471-B
21	Plomo total (mg/kg MS) ₍₂₎	70	140	1 200	EPA 3050-B EPA 3051

Anexo N° 10. Cálculos estadísticos (ANOVA)

Los cálculos de análisis de varianza (ANOVA) para la remoción de plomo con el método de electroremediación se realizarán según (Montgomery, 2004, pág. 175)

Tabla 14
Datos utilizados en los cálculos

Consideraciones para los cálculos	
N = Numero de variables	27
a = Niveles del ácido oxálico	3
b = Niveles de densidad de corriente	3
r = Replicas	3
C = Y^2/N	55972.3055

Tabla 15
Datos para análisis de varianza (ANOVA)

		Densidad de corriente (mA/cm ²)		
		5.71 (Y1)	12.07 (Y2)	20.35 (Y3)
Acido oxálico	0.01 (X1)	19.74	28.66	48.32
		18.95	27.90	49.60
		19.74	28.95	47.77
	0.02 (X2)	24.93	33.58	67.50
		24.68	32.09	69.66
		24.37	32.93	70.21
	0.03 (X3)	41.08	61.85	83.68
		42.54	60.14	80
		40.46	62.38	87.62

Tabla 16
Sumatoria de ejes

		Densidad de corriente (mA/cm ²)						
		5.71	suma	12.07	suma	20.35	suma	Suma Yi
Acido oxálico		19.74		28.66		48.32		
	0.01	18.95	58.43	27.90	85.51	49.60	145.69	289.63
		19.74		28.95		47.77		
		24.93		33.58		67.50		
	0.02	24.68	73.98	32.09	98.6	69.66	207.37	379.95
		24.37		32.93		70.21		
		41.08		61.85		83.68		
	0.03	42.54	124.08	60.14	184.37	80	251.3	559.75
		40.46		62.38		87.62		
	Yj suma		256.49		368.48		604.36	1229.33

En la tabla N 12 se muestra los resultados de las sumatorias de la concentración de ácido oxálico (Yj) y la densidad de corriente (Yi).

La suma de cuadrados se calcula de la siguiente manera:

- **Cálculo de la sumatoria de cuadrados**

Ecuación 2. Sumatoria de cuadrados

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n Y_{ijk}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N}$$

$$SS_T = (19.74)^2 + (18.95)^2 + (19.74)^2 + (28.66)^2 + \dots + (80)^2 + (87.62)^2 - 1229.33^2 / 27$$

$$SS_T = 67605.127 - 1229.33^2 / 27$$

$$SS_T = 11632.822$$

- **Cálculo de la suma de cuadrados para la concentración de ácido oxálico (SSa)**

Ecuación 3. *Suma de cuadrados para la concentración de ácido oxálico*

$$SS_a = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a Y_i^2 - \frac{Y..^2}{N}$$

$$SS_a = 1/(3) (3) * (289.63)^2 + (379.95)^2 + (559.75)^2 - 1229.33^2 / 27$$

$$SS_a = 1/(3) (3) * 541567.602 - 1229^2 / 27$$

$$SS_a = 60174.178 - 1229^2 / 27$$

$$SS_a = 4201.872$$

- **Cálculo de la suma de cuadrados para la concentración de la densidad de corriente (SSb)**

Ecuación 4. *Suma de cuadrados para la concentración de la densidad de corriente*

$$SS_b = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a Y_j^2 - \frac{Y..^2}{N}$$

$$SS_b = 1/(3) (3) * (256.49^2) + (368.48^2) + (604.36^2) - 1229.33^2 / 27$$

$$SS_b = 1/(3) (3) * 566815.640 - 1229^2 / 27$$

$$SS_b = 7007.21$$

- **Cálculo de la suma de cuadrados para obtener subtotales (SS_{Subtotales})**

Ecuación 5. *Suma de cuadrados para obtener subtotales*

$$SS_{st} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n Y_{ij}^2 - \frac{Y..^2}{abn}$$

$$SS_{St} = 1/3 [(58.43)^2 + (85.55)^2 + (145.69)^2 + \dots + (251.3)^2] - 55972.3055$$

$$SS_{St} = 1/3 (202695.59) - 55972.3055$$

$$SS_{St} = 11590.61173$$

- **Cálculo de la suma de cuadrados para la interacción de las 2 variables:**

Concentración de ácido acético y densidad de corriente (SS_{ab})

Ecuación 6. Suma de cuadrados para la interacción de las 2 variables

$$SS_{interacción} = \frac{1}{n} \sum_{i=l}^a \sum_{i=j}^n Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{abn} - SS_a - SS_b$$

$$SS_{interacción} = 11590.61173 - 4201.873 - 7007.21$$

$$SS_{interacción} = \mathbf{381.528733}$$

- **Cálculo de la suma de cuadrados debido al error (S_{SE})**

Ecuación 7. Suma de cuadrados debido al error

$$SS_E = SS_T - SS_a - SS_b - SS_{ineraccion}$$

$$SS_E = 11632.822 - 4201.873 - 7007.21 - 383.808$$

$$SS_E = \mathbf{42.210267}$$

- **Cálculo de la media de la suma de cuadrados para la concentración de ácido oxálico (MS_a)**

Ecuación 8. Suma de cuadrados para la concentración de ácido oxálico

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

$$MS_a = 4201.872/3-1$$

$$MS_a = 2100.936$$

- **Cálculo de la media de la suma de cuadrados para la concentración de densidad de corriente (MS_b)**

Ecuación 9. Suma de cuadrados para la concentración de densidad de corriente

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

$$MS_b = 7007.21/3-1$$

$$MS_b = 3503.65$$

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

Ecuación 10. Suma de cuadrados para la interacción de las dos variables

$$MS_{interaccion} = \frac{SSab}{((a - 1)(b - 1))}$$

$$MS_{interacción} = 381.528733 / ((3-1) (3-1))$$

$$MS_{interacción} = 95.382$$

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

Ecuación 11. Suma de cuadrados debido al error

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

$$MS_E = 42.210267 / (3*3) (3-1)$$

$$MS_E = 2.3450$$

- **Cálculo de la función F₀, para la concentración de ácido oxálico**

Ecuación 12. Función F₀, para la concentración de ácido oxálico

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

$$F_0 = 2100.936 / 2.3450$$

$$F_0 = 895.920$$

- **Cálculo de la función F₀, para la densidad de corriente**

Ecuación 13 . Función F₀, para la densidad de corriente

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

$$F_0 = 3503.65 / 2.3450$$

$$F_0 = 1494.072$$

- **Cálculo de la función F_0 , para la interacción de las dos variables: Concentración de ácido Oxálico y densidad de corriente.**

Ecuación 14. Función F_0 , para la interacción de las dos variables

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

$$F_0 = 95.382/2.3450$$

$$F_0 = 40.675$$

Tabla 17
Cálculo de puntos porcentuales

Variables	$F_{\alpha, v1, v2}$	$F_{\alpha, v1, v2}$	Resultados
F_a	$F_{\alpha, (a-1), (a*b*r-1)}$	(0.05), (2), (18)	3.55
F_b	$F_{\alpha, (b-1), (a*b*r-1)}$	(0.05), (2), (18)	3.55
F_{ab} (interacción)	$F_{\alpha, (a-1)(b-1), (a*b*r-1)}$	(0.05), (4), (18)	2.93

Planteamiento de hipótesis

Con los datos estadísticos obtenidos mediante método de análisis de varianza (ANOVA) efectuados a un nivel de confianza del 95 %, Para:

Nivel de significancia

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

Criterio de rechazo

Se rechaza la hipótesis nula (H_0) 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.

✓ Concentración de ácido oxálico

F_a : Concentración de ácido oxálico tenemos que $F_0 > F_{\text{Tabular}}$: $895.92 > 3.55$ entonces las hipótesis.

- **Hipótesis nula (H_0):** La concentración de ácido oxálico no afecta la remoción de plomo
- **Hipótesis alterna (H_1):** La concentración de ácido oxálico si afecta la remoción de plomo

Se acepta la **Hipótesis Alterna:** La concentración de ácido oxálico si afecta la remoción de plomo.

✓ **Densidad de corriente**

F_b : Densidad de corriente tenemos que $F_0 > F_{\text{tabular}}$: $1494.07 > 3.55$ 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.

Se acepta la **Hipótesis alterna:** La densidad de corriente si afecta la remoción de plomo.

✓ **Concentración de ácido oxálico y densidad de corriente**

F_{ab} : Interacción entre la concentración de ácido acético y la densidad de corriente tenemos que $F_0 > F_{\text{tabular}}$ $40.675 > 2.93$

- **Hipótesis nula (H_0):** La concentración de ácido oxálico y la densidad de corriente no afecta la remoción de plomo.
- **Hipótesis alterna (H_1):** La concentración de ácido oxálico y la densidad de corriente si afecta la remoción de plomo.

Se acepta la **Hipótesis alterna:** La interacción de concentración de ácido oxálico y la densidad de corriente si afecta la remoción de plomo.