

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE
RECURSOS NATURALES



“SISTEMA DE ELECTORREMEDIACIÓN CON ARREGLO
LINEAL PARA REMOCIÓN DE METALES PESADOS DE
SUELOS CONTAMINADOS CASO SAN MIGUEL DE VISO”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

AUTORES:

JOEL ALEXI CASAZOLA CASAZOLA
ANTHONY JOEL PURCA SEGURA
YENDER RAÚL VALLE ALVARADO

Three handwritten signatures in blue ink are visible on the right side of the page, corresponding to the authors listed above.

ASESOR:

Dra. CARMEN ELIZABETH BARRETO PIO

A handwritten signature in black ink is visible on the right side of the page, corresponding to the advisor listed above.

Callao, 2023
PERÚ



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES



(Resolución N° 019-2021-CU del 20 de enero de 2021)

ANEXO 2

ACTA N° 002-2023-JST-FIARN-UNAC DE SUSTENTACIÓN DE TESIS SIN CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

LIBRO N° 02 FOLIO N° 04 ACTA 002-2023-JST-FIARN-UNAC DE SUSTENTACIÓN DE TESIS SIN CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

Al 20 día del mes de febrero del año 2023, siendo las 15:10 horas, se reunieron en la sala <https://meet.google.com/nmq-pbzt-dui>: Mtro. Abner Josué Vigo Roldan, Mtro. Américo Carlos Milla Figueroa e Ing. Godofredo Teodoro León Ramírez, en ausencia del Ms.C. Alex Willy Pilco Nuñez, miembros del JURADO DE SUSTENTACIÓN DE TESIS para la obtención del título profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, designados por resolución N° 013-2023-D-FIARN y conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

Mtro. Abner Josué Vigo Roldan	Presidente
Mtro. Américo Carlos Milla Figueroa	Secretario
Ms.C. Alex Willy Pilco Nuñez	Vocal
Ing. Godofredo Teodoro León Ramírez	Suplente
Dra. Carmen Elizabeth Barreto Pio	Asesora

A las 15:15 horas y con el quórum reglamentario se dio inicio al acto de sustentación de la tesis "SISTEMA DE ELECTORREMEDIACIÓN CON ARREGLO LINEAL PARA LA REMOCIÓN DE METALES PESADOS DE SUELOS CONTAMINADOS CASO SAN MIGUEL DE VISO", por parte de los Bachilleres Anthony Joel Purca Segura, Yender Raul Valle Alvarado y Joel Alexi Casazola Casazola, quienes han cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales. La sustentación es en acto público, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual, en cumplimiento de la declaración de emergencia adoptada por el Poder Ejecutivo para afrontar la pandemia del Covid-19, a través del D.S. N° 044-2020-PCM y lo dispuesto en el DU N° 026-2020, en concordancia con la Resolución del Consejo Directivo N°039-2020-SUNEDU-CD y la Resolución Viceministerial N° 085-2020-MINEDU, que aprueba las "Orientaciones para la continuidad del servicio educativo superior universitario".

Luego de la exposición y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, se acordó: Dar por APROBADO la presente tesis, con la escala de calificación cualitativa BUENO y calificación cuantitativa QUINCE (15), conforme a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución N° 099-2021- CU del 30 de junio del 2021.

Se dio por cerrada la sesión a las 16:40 horas del lunes 20 de febrero del año en curso.

Mtro. Abner Josué Vigo Roldan
Presidente

Mtro. Américo Carlos Milla Figueroa
Secretario

Ing. Godofredo Teodoro León Ramírez
Vocal

Dra. Carmen Elizabeth Barreto Pio
Asesora

DEDICATORIA

Con mucho cariño dedicamos este trabajo:

A mis padres Tiburcia, Sergio; a mis
hermanas Valeria y Luz Marina

CASAZOLA CASAZOLA, JOEL A.

A mis padres Teófilo, Elva; a mis hermanos
Jaime y Noel; a mis tíos y abuelos.

PURCA SEGURA, ANTHONY J.

A mis padres Marilú, Melquiades; a mi
hermana Yadira; a mis abuelos Pedro y
Elva.

VALLE ALVARADO, YENDER R.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por habernos guiado paso a paso a largo de esta investigación.

A nuestros padres Melquiades y Marilú; Teófilo y Elva; Tiburcia y Sergio, quienes nos brindaron su apoyo incondicional y sacrificio a lo largo de estos años para poder alcanzar nuestras metas.

A la Universidad Nacional del Callao (UNAC), por sentar las bases de la ingeniería, ciencia e investigación en nuestras personas.

A la Dra. Carmen Elizabeth Barreto Pio, por su asesoría y oportunos consejos para la culminación de esta tesis.

Al ingeniero Carlos Franco Torres Zevallos, por su experiencia y aporte a esta investigación.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUCCIÓN	xvi
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	17
1.2. Formulación del problema.....	18
1.2.1. Problema general	18
1.2.2. Problemas específicos	19
1.3. Objetivos	19
1.3.1. Objetivo General	19
1.3.2. Objetivos Específicos	19
1.4. Limitantes de la investigación.....	20
1.4.1. Teórico:	20
1.4.2. Temporal:	20
1.4.3. Espacial:.....	21
II. MARCO TEÓRICO.....	22
2.1. Antecedentes	22
2.1.1 Internacionales:.....	22

2.1.2 Nacional:	26
2.2. Bases teóricas.....	27
2.2.1 Suelo.....	27
2.2.2 Metales pesados	32
2.2.3 Tipos de remediación de suelos.....	36
2.2.4 Sistema De Electrorremediación.....	40
2.2.5 Factores que Influyen en la electrorremediación del suelo	42
2.2.6 Electrorremediación	46
2.2.7 Ácido nítrico	47
2.2.8 Ácido fosfórico.....	47
2.2.9 Tiempo de tratamiento	47
2.2.10 Remoción de Metales pesados en suelos contaminados.....	48
2.3 Marco Conceptual	48
2.3.1 Electrorremediación con arreglo lineal	48
2.3.2 Remoción de los metales pesados presentes en los suelos contaminados:	48
2.4 Definición de Términos Básicos	49
III. Hipótesis y Variables	51
3.1 Hipótesis	51
3.1.1 Hipótesis General.....	51
3.1.2 Hipótesis Específicas	51

3.2 Definición Conceptual de las Variables	51
3.2.1 Operacionalización de Variables	52
IV. Diseño Metodológico	54
4.1 Tipo y diseño de la Investigación	54
4.2 Método de la investigación.....	55
4.3 Población y Muestra.....	63
4.3.1 Población	63
4.3.2 Muestra	64
4.4 Lugar del estudio.....	65
4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	68
4.6 Análisis y Procesamiento de Datos.....	70
V. RESULTADOS	73
5.1 Resultados Descriptivos.....	73
5.1.1 Característica de la Calidad del Suelo de San Mateo de Viso	73
5.1.2 Remoción de Pb, Zn, Cu en suelos contaminados en cada tratamiento .	75
5.1.3 Variación de PH, CE e Intensidad de los fluidos	80
5.2 Resultados inferenciales	99
5.2.1 Análisis no paramétrico para la remoción de plomo.....	101
5.2.2 Análisis paramétrico para la remoción de zinc.....	103
5.2.2 Análisis no paramétrico para la remoción de cobre	103
VI. DISCUSIONES DE RESULTADOS.....	106

6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	106
6.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares	109
6.3 Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes.....	113
CONCLUSIONES	114
RECOMENDACIONES	115
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116
ANEXOS	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución y clasificación de la textura del suelo	29
Figura 2. Proceso de electrólisis del agua	40
Figura 3. Diagrama de pourbaix para el plomo	43
Figura 4. Diagrama de pourbaix para el cobre	43
Figura 5. Diagrama de Pourbaix para el zinc	44
Figura 6. Electrodo de acero inoxidable	46
Figura 7. Celdas y medidas del sistema electroquímico	59
Figura 8. Presentación del sistema de electrorremediación lineal en funcionamiento.....	61
Figura 9. Presentación del proceso experimental	63
Figura 10. Ubicación de los puntos de muestreo	64
Figura 11. Mapa de ubicación de San Miguel de Viso	66
Figura 12. Vía de acceso de San Miguel de Viso.....	67
Figura 13. Comparación de los porcentajes de remoción en cada tratamiento	77
Figura 14. Remoción de plomo	78
Figura 15. Remoción de zinc.....	79
Figura 16. Remoción de cobre.....	80
Figura 17. pH del fluido anódico y catódico en el SE-1 durante 10 días de tratamiento	82
Figura 18. pH del fluido anódico y catódico en el SE-2 durante 10 días de tratamiento	83
Figura 19. Conductividad eléctrica (CE) del fluido del compartimiento anódico y	

catódico del SE-1 durante 10 días de tratamiento	85
Figura 20. Conductividad eléctrica (CE) del fluido del compartimiento anódico y catódico del SE-2 durante 10 días de tratamiento	86
Figura 21. Variación de la corriente eléctrica en el SE -1 durante 10 días de tratamiento	88
Figura 22. Variación de la corriente eléctrica en el SE-2 durante 10 días de tratamiento	89
Figura 23. pH del fluido anódico y catódico en el SE-1 durante 05 días de tratamiento	91
Figura 24. pH del fluido anódico y catódico en el SE-2 durante 05 días de tratamiento	92
Figura 25. Conductividad eléctrica (CE) del fluido del compartimiento anódico y catódico del SE-1 durante 05 días de tratamiento	94
Figura 26. Conductividad eléctrica (CE) del fluido del compartimiento anódico y catódico del SE-2 durante 05 días de tratamiento	95
Figura 27. Variación de la corriente eléctrica en el SE -1 durante 05 días de tratamiento	97
Figura 28. Variación de la corriente eléctrica en el SE-2 durante 05 días de tratamiento	98
Figura 29. Principales fenómenos electrocinéticos y reacciones químicas ocurridos durante la remoción de plomo (Pb), Cobre (Cu) y zinc (Zn)	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Diámetros de partícula de suelo	29
Tabla 2. Inventario de pasivos ambientales mineros	32
Tabla 3. Estándares de calidad del suelo para Cu, Pb y Zn	36
Tabla 4. Operacionalización de la variable dependiente e independiente	53
Tabla 5. Identificación de variables.....	54
Tabla 6. Factores y niveles asociados al diseño factorial	55
Tabla 7. Arreglo del diseño factorial simple	55
Tabla 8. Parámetros iniciales del proceso de electroremediación.....	62
Tabla 9. Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo	65
Tabla 10. Técnicas analíticas utilizadas en el proceso de electroremediación.....	69
Tabla 11. Característica de la calidad del suelo de San Mateo de Viso	73
Tabla 12. Concentración de inicial de Cu, Pb y Zn vs estándares de calidad .	75
Tabla 13. Remoción de Pb, Zn y Cu en cada tratamiento vs estándares de calidad.....	76
Tabla 14. Análisis de supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza	100
Tabla 15. Prueba de Kruskal-Wallis para la remoción de Pb.....	101
Tabla 16. Prueba de U de Mann-Whitney para la remoción de Pb en función del tiempo	102
Tabla 17. Prueba de U de Mann-Whitney para la remoción de Pb en función del tipo de solución humectante.....	102
Tabla 18. Prueba de ANOVA para la remoción de Zn	103
Tabla 19. Prueba de Kruskal-Wallis para la remoción de Cu.....	104

Tabla 20. Prueba de U de Mann-Whitney para la remoción de Cu en función del tiempo	104
Tabla 21. Prueba de U de Mann-Whitney para la remoción de Cu según el tipo de solución humectante	105

RESUMEN

La comunidad de San Miguel de Viso, ubicado en el distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí, Región Lima, posee suelos de uso agrícola los cuales se encuentran contaminados por metales pesados producto de los pasivos ambientales mineros generados por la actividad minera en esta localidad. Por ello la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de un sistema de electrorremediación con arreglo lineal en la remoción de los metales pesados: cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn) presentes en los suelos de uso agrícola de la comunidad de San Miguel de Viso, distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí, Región Lima. Para dicho fin se inició con la caracterización del suelo contaminado, para luego determinar la influencia de la solución humectante y el tiempo de tratamiento en la remoción de metales pesados Cu, Pb y Zn. Se utilizó como soluciones humectantes de suelo el ácido nítrico y ácido fosfórico a concentración 0,1 M, así como ácido nítrico 0,05 M para el control del pH del compartimiento catódico. Los resultados indicaron que la aplicación del sistema electroquímico con arreglo lineal disminuye la concentración de Cu, Pb y Zn hasta un 35%, 51% y 37% respectivamente. Así mismo las soluciones humectantes, ácido nítrico y ácido fosfórico, no presentaron diferencias significativas entre sí en la remoción del porcentaje del Cu, Pb y Zn, con respecto a la eficiencia. Sin embargo, el tiempo de remoción si influyó significativamente en el porcentaje de remoción de Pb, Zn y Cu, siendo el tiempo óptimo de remediación de 10 días.

Palabras claves: Electrorremediación con arreglo lineal, Solución humectante, Tiempo, Suelos, Metales, Plomo, Zinc, Cobre, Ácido Nítrico, Ácido Fosfórico.

ABSTRACT

The community of San Miguel de Viso, located in the San Mateo district, Huarochirí province, Lima Region, has soils for agricultural use which are contaminated by heavy metals as a result of mining environmental liabilities generated by mining activity in this town. Therefore, the objective of this research was to evaluate the efficiency of an electroremediation system with a linear arrangement in the removal of heavy metals: copper (Cu), lead (Pb) and zinc (Zn) present in soils for agricultural use in the San Miguel de Viso community, San Mateo district, Huarochirí province, Lima Region. For this purpose, it began with the characterization of the contaminated soil, to later determine the influence of the wetting solution and the treatment time in the removal of heavy metals Cu, Pb and Zn. Nitric acid and phosphoric acid at 0.1 M concentration were used as soil moisturizing solutions, as well as 0.05 M nitric acid to control the pH of the cathodic compartment. The results indicated that the application of the electrochemical system with a linear arrangement decreases the concentration of Cu, Pb and Zn up to 35%, 51% and 37% respectively. Likewise, the wetting solutions, nitric acid and phosphoric acid, did not present significant differences among themselves in the removal of the percentage of Cu, Pb and Zn, with respect to efficiency. However, the removal time did significantly influenced the removal percentage of Pb, Zn and Cu, with the optimal remediation time being 10 days.

Keywords: Linear array electroremediation, Wetting solution, Time, Soils, Metals, Lead, Zinc, Copper, Nitric Acid, Phosphoric Acid.

INTRODUCCIÓN

La minería es una de las actividades antrópicas que ha afectado globalmente el ambiente de forma intensa en las últimas décadas, al emitir metales pesados en altas concentraciones y contaminar el suelo (Roundhill, 2001, pp. 2-4; Wuana y Okieimen, 2014, p. 7), causando de esta forma desequilibrios ambientales con el riesgo de afectar la salud de las personas, ya que los metales pesados son elementos capaces de ser transferidos directa e indirectamente desde el suelo hacia los sistemas vivos y ejercer su potencial de toxicidad (Wuana y Okieimen, 2014).

La actividad minera ha dejado pasivos ambientales en la parte alta de la quebrada Mayo de San Miguel de Viso, distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí, Región Lima, que impactan la calidad del agua y suelo, como muestra las evaluaciones realizadas por la Autoridad Nacional del Agua y por la Comisión Episcopal de Acción Social (Díaz y Mamani, 2020).

Ante esta situación existen diferentes tecnologías para la remediación de suelos contaminados con metales pesados como: la técnica de arrastre de fluidos, extracción forzada con vapores, oxidación química, Landfarming y la electrorremediación; asimismo su aplicación depende de las características del suelo, capacidad de remoción de contaminantes y el estado final después del tratamiento (García et al., 2011).

La electrorremediación es un proceso electroquímico que consiste en aplicar un campo eléctrico para desplazar los contaminantes fuera del suelo. Es una técnica potenciada con soluciones de mejora que incrementan la movilidad de los metales para alcanzar altas eficiencias de remoción en corto tiempo;

asimismo, la concentración de los metales en el suelo post-tratamiento electroquímico no siempre es homogénea (USEPA, 2007, p. 176; Ottosen y Jensen, 2009, págs. 111-112).

Por ello el objetivo de la presente investigación fue utilizar el sistema de electrorremediación con arreglo lineal, para la remoción de metales pesados Cu, Pb y Zn en suelos contaminados de la comunidad de San Miguel de Viso; como alternativa de tratamiento debido a que es una técnica accesible, versátil, económico, poco estudiada en el país y aplicable en situ.

En este contexto se evaluaron la composición del suelo contaminado de la comunidad de San Miguel de Viso, Huarochirí, Región Lima, así como la influencia de los electrolitos y el tiempo de tratamiento en la remoción de metales pesados; los ensayos electroquímicos se realizaron por triplicado, en celdas de acrílico, durante 10 y 5 días, con placas de acero inoxidable como electrodos, sometidos a 30 V de potencia y el uso del ácido nítrico en el control del pH del compartimiento catódico.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

En el Perú existen muchas fuentes contaminantes de los suelos, debido a las diversas actividades productivas; dentro de ellas, la minería es la mayor fuente que aporta a la contaminación de los suelos por metales. La comunidad de San Miguel de Viso que forma parte del distrito de Huarochirí, está expuesta hace décadas a una relavera proveniente de la Empresa Minera San Donato (actualmente en estado abandonada) donde sus polvos finos impactan directamente sus tierras y también a sus cursos de aguas que riegan sus cultivos. La contaminación de suelos por metales pesados no permite el crecimiento y aumenta la fitotoxicidad en las plantas inhibiendo su desarrollo. Los metales pesados se bioacumulan en zonas específicas de la planta; es por eso que son peligrosos, debido a que ingresa a la cadena alimentaria (Prieto et al., 2009). Actúan en los ecosistemas degradando la calidad del suelo impidiendo su uso agrícola.

La permanencia de los metales pesados conlleva a la destrucción de los suelos naturales y la creación de nuevos suelos (antrosoles). Los antrosoles presentan limitaciones físicas, químicas y biológicas que dificultan la reinserción de vegetación. Otros efectos de la contaminación incluyen la destrucción de la estructura del suelo, la modificación de características estructurales, la acidificación, la ruptura de ciclos geoquímicos y la disminución de la capacidad de cambio y retención de agua (Ortiz et al., 2007, p.35; Sabroso y Pastor, 2004, p. 17).

Dentro de las diferentes técnicas de remediación de suelos contaminados tenemos como alternativas la técnica de arrastre de fluidos, extracción forzada con vapores, oxidación química, Landfarming (técnica que consiste en excavación del suelo contaminado y su disposición en un terreno impermeable para su tratamiento) y la electrorremediación. La tecnología que se ejecuta depende de las características del suelo, de la capacidad de remoción de contaminantes y el estado final después del tratamiento (García et al, 2011). Por ello dentro de esta investigación se opta por el uso de la electrorremediación, conocido como electrocinética, por su versatilidad.

Para el tratamiento electroquímico se requiere ciertas condiciones y/o variables como soluciones humectantes, tiempo de tratamiento y distancia entre electrodos, (LLancari, 2018). Por otro lado, el Comportamiento transitorio de los metales pesados, el flujo electro osmótico, el pH y la migración de contaminantes se ven afectados por la duración del tratamiento, la especiación inicial, la polaridad del contaminante y el tipo de suelo durante la electrorremediación (Al-Hamdan y Reddy, 2008).

La presente investigación aplicó la técnica de electrorremediación en suelos contaminados con metales pesados de la comunidad de San Miguel de Viso, Huarochirí, Región Lima, con el fin de evaluar el efecto de este tratamiento en la remoción de metales de este suelo y contribuir a la solución y/o mitigación de esta problemática.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ¿Cuál es la eficiencia del sistema de electroremediación con arreglo lineal para la remoción de metales pesados (Cu, Pb y Zn) de suelos contaminados de la comunidad de San Miguel de Viso?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la calidad del suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso, en lo que corresponde a la concentración de metales pesados?
- ¿Cuál es la influencia de la solución humectante en el porcentaje de remoción de Cu, Pb y Zn?
- ¿Cuál es la influencia del tiempo en el porcentaje de remoción de Cu, Pb y Zn?
- ¿En qué medida el sistema de electroremediación con arreglo lineal reduce la concentración de Cu, Pb y Zn en los suelos contaminados de la comunidad San Miguel de Viso?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Evaluar la eficiencia del sistema de electroremediación con arreglo lineal en la remoción de los metales pesados de suelos contaminados de la comunidad de San Miguel de Viso.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la calidad del suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso, en lo que corresponde a la concentración

de metales pesados.

- Determinar la influencia de la solución humectante en el porcentaje de remoción de Cu, Pb y Zn.
- Determinar la influencia del tiempo en el porcentaje de remoción de Cu, Pb y Zn.
- Determinar el porcentaje de remoción de Cu, Pb y Zn, del suelo tratado por sistema de electroremediación con arreglo lineal de los suelos contaminados de la comunidad de San Miguel de Viso.

1.4. Limitantes de la investigación

Las principales limitaciones que se presentarán en la realización de este estudio serán:

1.4.1. Limitante Teórico:

Si bien se han desarrollado diversas investigaciones referentes al tratamiento electrocinético para suelos contaminados con metales pesados, existe insuficiente información acerca del efecto que puede tener este tratamiento en metales como el Cu y Zn. Asimismo, tampoco se ha reportado en la literatura el uso de soluciones humectantes como ácido nítrico y el ácido fosfórico en la electroremediación.

1.4.2. Limitante Temporal:

La aplicación y seguimiento del tratamiento electroquímico, se llevó a cabo entre el 28 de mayo hasta el 27 de diciembre del 2022 en horario diurno y nocturno con periodo de medición cada 2 horas.

1.4.3. Limitante Espacial:

El estudio exsitu realizado en el laboratorio de la facultad de ingeniería ambiental y recursos naturales de la Universidad Nacional del Callao, brindó resultados que podrán ser inferidos a suelos contaminados por relaves mineros en el lugar de estudio que comprende la zona agrícola del centro poblado de la comunidad de San Miguel de Viso, ubicado en el distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí, Lima; afectada por los pasivos minero ambiental, que se encuentra a una altitud de 3090m.s.n.m. siendo la zona de difícil accesibilidad, de alta pendiente y senderos angostos.

II.MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1 Internacionales:

Aragón (2013), en su tesis titulada “Diseño a escalas laboratorio y piloto de un sistema de remediación cinética de suelos contaminados con metales pesados”, tuvo como propósito implementar el tratamiento electroquímico como una técnica de remediación insitu. Para ello se diseñó un sistema de tratamiento de remediación electrocinética a escala laboratorio; aplicándose a tres tipos de suelos (andesítica, suelo agrícola, relave minero) contaminados con metales pesados (Cu, Cr, Pb, Zn); empleándose tres tipos de agentes humectantes (sulfato de sodio, sulfato ferroso y ácido acético), y el Test Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), para evaluar la eficacia del método propuesto en diferentes regiones de los suelos sometidos a remediación. Los resultados mostraron que para una matriz andesítica (un suelo contaminado artificialmente) se verificó una efectiva migración de metales pesados (Cu, Cr, Pb, Zn) hacia las zonas cercanas a los electrodos; obteniéndose mejores resultados de remoción para el suelo agrícola con sulfato ferroso como agente humectante. Asimismo, el relave minero que fue sometido a la modalidad con pozos utilizando electrodos de grafito (10 V), sulfato ferroso como agente humectante y un tiempo de tratamiento de 104 horas; lográndose una remoción del 95 % de Cu y 74 % de Zn en las zonas intermedias de la celda.

Alcalino (2012), en su tesis titulada: “Análisis y comparación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales”, tuvo como

objetivo fue analizar y comparar tecnologías de remediación a suelos contaminados con metales Cu y As, entre ellas, la electrorremediación. Para ello se diseñó una celda electrolítica para tratar 1,4 kg de suelo con electrodos de acero inoxidable 316 y se experimentó en dos tiempos, 16 y 24 h, finalmente se cuantificó la concentración de metales por las metodologías ICP-OES e ICP-Masa. Los resultados mostraron una mayor remoción de los metales en el mayor tiempo de experimentación, concluyendo que se requiere de mayor tiempo de tratamiento para tener una correcta migración del frente ácido y, por ende, de los metales presentes en la muestra, asimismo se observó que el As requiere menor tiempo de tratamiento en comparación del Cu, por lo que el metal objetivo también define la duración.

Granda (2011), en su tesis titulada: "Evaluación de la técnica de electrorremediación de suelos contaminados por metales pesados" estableció como propósito evaluar la técnica de electrorremediación de suelos contaminados con metales pesados (Pb, As y Zn). En función a ello se analizaron conjuntamente medidas de pH, concentración de contaminantes para tres distancias entre electrodos, dos tiempos de tratamiento y dos tipos de electrolitos. Los resultados mostraron que los tratamientos más eficientes en la remoción de metales fueron T12 (15 cm de distancia de electrodos, 24 h de electrorremediación y de electrolito Ac. Fosfórico), para el plomo y el zinc y el T8 (10 cm de distancia de electrodos, 24 h de electrorremediación y de electrolito ácido fosfórico), para el arsénico. Se concluye altas eficiencias de remoción entre 82,4 y 99,9%, logradas debió a que el sistema logra valores de pH entre 2 y 4 que permiten una mayor movilidad de los metales.

Zulfiqar et al., (2017), en su investigación denominada “La perturbación de la movilidad de los iones por las partículas de hierro durante la remediación electrocinética del suelo contaminado” tuvieron como propósito encontrar la influencia de las partículas de Fe^{2+} en la movilidad de los iones Pb^{2+} , durante la remediación electrocinética, en suelos contaminados deliberadamente por nitrato de plomo $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ y utilizándose electrodos de hierro y grafito. Los resultados muestran que los iones Fe^{2+} de los electrodos de hierro, producidos debido al ambiente ácido en el compartimiento del ánodo, afectaron la movilidad de las partículas de plomo, asimismo los iones Fe^{2+} de menor conductividad iónica disminuyen la movilidad de otras partículas en el suelo; de esta forma los electrodos de hierro produjeron una región de empobrecimiento cerca del ánodo, siendo menos eficientes que el electrodo de grafito, siendo este 15 veces más eficiente en la remoción para Pb^{2+} .

García et al, (2011), en su investigación titulada “Electrorremediación de suelos arenosos contaminados por Pb, Cd y As provenientes de residuos mineros, utilizando agua y ácido acético como electrolitos”, reportaron la remoción de contaminantes como Pb, Cd y As de un suelo real, de tipo arenoso (93% arena), contaminado por la oxidación de residuos mineros, de la zona de Zimapán Hidalgo, a un tiempo de tratamiento de 24 h a un potencial constante de 20 V, usándose agua desionizada, CH_3COOH y $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ 0,001 M, ya sea como humectante del suelo o como electrolito. Al final de los experimentos se logró una remoción de 12% (98 ppm) para Pb, 20% (7 ppm) para Cd y 22% para As (79 ppm). Así mismo se determinó que los suelos de tipo arenosos presentan mayor intercambio iónico, la concentración de Pb y Cd disminuyó en

todos los experimentos, pero se encontraron mejores resultados cuando se utiliza ácido acético como anolito y catolito. Para el As se observa una disminución del 22% de concentración inicial para el experimento I. A esto se puede atribuir a la previa humectación del suelo con un electrolito, así como el control del pH bajo estas condiciones favorece la remoción de este contaminante. También la remoción de varios contaminantes metálicos presentes en una muestra de un suelo real es posible, a pesar de las interacciones presentes (matriz porosa-contaminante) a un potencial de 20 V.

Al-Hamdan y Reddy (2008), en su investigación titulada “Comportamiento transitorio de metales pesados en suelos durante la remediación electrocinética”, a escala de laboratorio evaluaron el comportamiento transitorio de Cr (VI), Ni (II) y Cd (II) combinados en diferentes suelos durante la remediación electrocinética (caolín y glacial) con 1, 2, 4 y 10 días de tiempo de tratamiento. Los resultados mostraron que, en caolín, el grado de migración de Ni (II) y Cd (II) hacia el cátodo aumentó a medida que aumentaba el tiempo de tratamiento; en suelo glacial no tuvo ningún efecto debido a su alta capacidad de taponamiento. En ambos suelos, la migración de Cr (VI) hacia el ánodo aumentó a medida que aumentaba el tiempo de tratamiento. Sin embargo, fue más alta en el segundo debido a un mayor pH. La reducción y migración de Cr (VI) a Cr (III), fueron significativamente afectados por el tiempo de tratamiento. Demostrando que el flujo electroosmótico, como la dirección y el grado de migración y eliminación de contaminantes depende de la polaridad del contaminante, el tipo de suelo y duración del tratamiento.

2.1.2 Nacionales

Se realizó una revisión bibliográfica, de las cuales son consideradas importantes como antecedentes para el fortalecimiento de este trabajo. A continuación, se exponen algunos de ellos:

Escobar y Ocas (2016), en su tesis titulada: “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” presentaron un estudio fisicoquímico en una celda de electroremediación experimental, de un suelo real tipo arenoso (65%) (relave minero), provenientes de la mina Paredones, 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 V durante 24 h (36 experimentos). Al terminar los experimentos se recuperó el suelo, se determinó el pH, observando que el suelo presenta una gran capacidad de amortiguamiento. Se logró una remoción de 45.85% de Pb con ácido acético 0.03 M y 22.96 V. determinando que la concentración del electrolito, la densidad de corriente y el tiempo influyen notablemente en el proceso de electroremediación de Pb del relave minero.

LLancari (2018), en su tesis titulada “Recuperación del suelo contaminado con Zn mediante la electroremediación de la ex - mina santa rosa de cata de cañete” realizó una investigación que consistió en recuperar un suelo contaminado con Zn, mediante la Electroremediación a escala de laboratorio, en dicho estudio se emplearon 2 tratamientos T1 y T2 con un voltaje de 30 V, en un tiempo de humectación de 24 h y 12 h para T1 y T2 respectivamente, en el

T1 se utilizó ácido fosfórico 0,01 M (electrolito) y agua destilada, asimismo, para el T2 se utilizó ácido acético 0,03 M (electrolito) y agua destilada. A una distancia de 15 cm para el T1 y T2. Y finalmente en el experimento, el autor consiguió obtener una remoción de 77,083% y 71,3% para el T1 y T2, respectivamente. Sin embargo, se pudo identificar que el tiempo de humectación del suelo, se obtuvo mejores resultados empleando un tiempo de 24 h. La distancia entre electrodo y tipo de electrolito se obtuvieron buenos resultados utilizando ácido fosfórico 0,01 M y una distancia de 15 cm, reduciendo satisfactoriamente la concentración del Zn en el suelo.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Suelo

Podemos entender al suelo, como un sistema dinámico complejo, constituido por componentes bióticos y abióticos. Representa el hábitat principal y el puerto de la actividad biológica y la diversidad, y apoya varios servicios de los ecosistemas (Morgado, et al., 2018).

Sobre su formación, se sabe que es resultado de la alteración de los materiales parentales, causada por agentes meteorológicos y organismos vivos y condicionados por la topografía. Es un proceso muy lento y susceptible a la intemperie de las rocas progenitoras. La tasa media de formación de suelo es de aproximadamente 695 kg/ha/año, lo que equivale a 0,0056 cm de espesor/año. Por esta razón, el suelo se considera un recurso no renovable (Durães, et al., 2018). Sobre su composición, podemos encontrar las 3 fases interconectadas: sólida, líquida y gaseosa. De las anteriores, la fracción sólida es la más

representativa (más del 50%), siendo fuente, sumidero y destino de diferentes materiales e incluso, contaminantes (Durães et al., 2018); su proporción es dependiente al tamaño y forma de las partículas sólidas (Kalev y Toor, 2018). Pero no como una masa continua y compacta, sino como una matriz porosa tridimensional. Este volumen “hueco”, formado por poros, cámaras, canales y grietas es la red espacial para el flujo de gases y líquidos (Morgado et al., 2018).

2.2.1.1 Propiedades fisicoquímicas del suelo. La formación del suelo depende de varios factores, como el material parental, la topografía, el clima, la biota y el tiempo. Estos factores influirán en la formación del suelo, así como las propiedades de este, influyendo en todas sus funciones, servicios ambientales y capacidad para producir bienes (Morgado et al., 2018).

Para un correcto análisis de los suelos, será necesario determinar las propiedades fisicoquímicas del material, tales como: Textura, pH, conductividad eléctrica, materia orgánica, contenido de fósforo, potasio, carbonatos y capacidad de intercambio catiónico (Acta, 2004).

2.2.1.1.1 Textura. La textura está relacionada con el tamaño de las partículas de la fracción sólida e inorgánica del suelo (Mohamed y Paleologos, 2018), y a la proporción relativa de arenas, limos y arcillas presentes (Rai, et al., 2017), como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

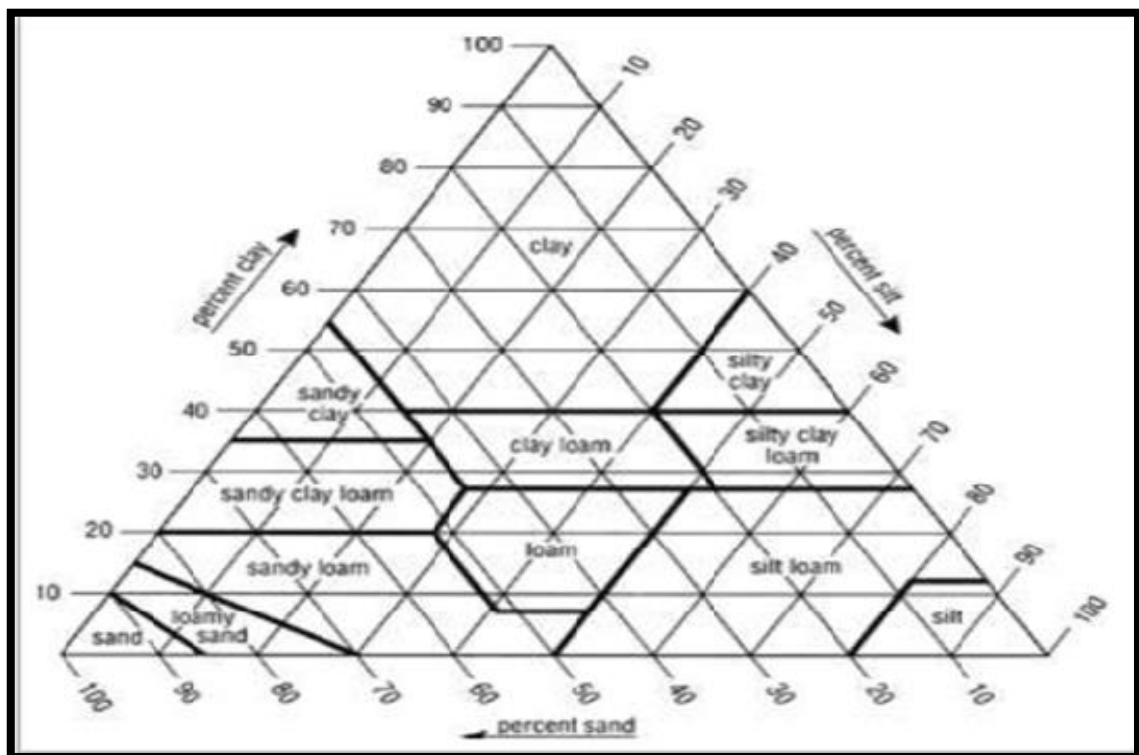
Diámetros de partícula de suelo

Fracción del suelo	Sistema del Dpto. USA	Sistema Internacional
	Diámetro en mm	Diámetro en mm
Arena muy gruesa	1,0-2,0	-
Arena gruesa	0,5-1,0	0,2-2,0
Arena media	0,25-0,5	-
Arena fina	0,1-0,25	0,02-0,2
Arena muy fina	0,05-0,1	0,002-0,02
Limos	0,002-0,05	-
Arcilla	<0,002	<0,002

Nota. tomado de López (2013, p.26).

Figura 1

Distribución y clasificación de la textura del suelo



Nota. tomado de Rai et al., (2017).

2.2.1.1.2. pH. El pH determina la acidez o alcalinidad del suelo dentro de un rango que va de 0 a 14 (Kalev y Toor, 2018). Para los suelos, el pH usualmente se encuentra entre los valores de 4 y 8,5 unidades, afectado por el potencial Redox, la presencia de carbonatos y la capacidad amortiguadora de agentes naturales o agregados por la actividad humana (Durães et al., 2018). Es un factor que, junto a las arcillas la materia orgánica, afecta la Capacidad de Intercambio Catiónico, la solubilidad y precipitación de los componentes químicos del suelo.

2.2.1.1.3 Conductividad eléctrica. Es la capacidad de un medio o espacio físico para permitir el paso de corriente eléctrica, para cada tipo de suelo hay un valor de conductividad eléctrica. En electrorremediación los cambios de pH del suelo modifican la conductividad global del medio por lo que se forman perfiles de voltaje. Este factor está en relación de la naturaleza del sustrato y principalmente de la variación de pH como efecto del proceso electrocinético, pues se crean perfiles de voltaje que alteran la conductividad (De la Rosa et al., 2007, p. 133).

2.2.1.1.4. Materia orgánica. La materia orgánica es el resultado de la descomposición inicial, transporte y acumulación de residuos vegetales y animales (Volk y Loeppert, 2018). A esto añadimos la presencia de los microorganismos y su actividad bioquímica, que puede influir en características como la porosidad, los ciclos biogeoquímicos que se dan en el suelo (Pavao-Zuckerman, 2008) y la formación de los horizontes (Kalev y Toor, 2018).

2.2.1.1.5. Capacidad de intercambio catiónico. La capacidad del suelo para absorber e intercambiar iones es su "capacidad de intercambio". Si bien las

cargas positivas y negativas están presentes en las 13 superficies coloidales, los suelos de esta región están dominados por cargas negativas y tienen una carga general negativa (neta). Por lo tanto, se atraen más cationes (iones positivos) a los sitios de intercambio que los aniones (iones negativos), y los suelos tienden a tener mayores capacidades de intercambio de cationes (CEC) que las capacidades de intercambio de aniones (AEC). Los suelos de textura fina suelen tener una mayor capacidad de intercambio que los suelos gruesos debido a una mayor proporción de coloides (Volke y Velasco, 2002, p.18).

2.2.1.2. Contaminación de los suelos. Los contaminantes en el suelo solo se volverán peligrosos cuando se perciban efectos nocivos, ya que no toda la biota reaccionará de manera similar. De esta manera, cuando la contaminación del suelo afecta la biota, todas las funciones y servicios del suelo pueden modificarse potencialmente; por lo tanto, son un tema a tener en cuenta en los procedimientos de Evaluación de la Calidad. Además, las alteraciones climáticas también inducen presiones sobre el suelo, al alterar su composición física, química y estructural (Morgado et al., 2018).

Pueden tener orígenes naturales o antropogénicos y la mayoría de los suelos contaminados en el mundo contienen mezclas complejas de uno o ambos grupos, aunque difieren en comportamiento. Una gran diferencia entre estos grupos es la Susceptibilidad a la Degradación, siendo dependiente a las propiedades del compuesto y condiciones ambientales para los orgánicos, y nula degradación para los inorgánicos, lo que se traduce en una acumulación en organismos vivos (Durães et al., 2018).

Tabla 2*Inventario de pasivos ambientales mineros*

Pasivo	Coordenadas UTM (PSAD 56): Este / Norte	
Desmonte de mina de Huaqui	361945	8694350
Desmonte de mina Esperada	357108	8692528
Relaveras Millotingo (1,2 y 3)	366104	8691120
Desmonte de mina Monterrey 1	360673	8701140
Relavera San Donato	357003	8694166
Desmonte de mina Rinconada(A)	358940	8696115
Bocamina S.M. Pacococha	364748	8689430
S.A/Unidad Carolina		
Relave S.M.R.L Planta	365450	8689620
Concentradora Huarochirí		
Desmonte de mina Victoria	358436	8693706

Nota. Ministerio de Energía y Minas. RM N°290-2006.

2.2.2. Metales pesados

Según la tabla periódica los metales pesados son aquellos elementos químicos de alta densidad (mayor a 4 g/cm^3), masa y peso atómico por encima de 20 y son tóxicos en concentraciones bajas. Como ejemplo se tiene Aluminio (Al), Berilio (Be), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cadmio (Cd), Mercurio (Hg), plomo (Pb), entre otros (Londoño et al., 2016).

Los metales pesados se definen comúnmente como un conjunto de metales y metaloides que poseen densidades al menos 5 veces más altas que las del agua ($> 6 \text{ mg/cm}^3$), algunos esenciales en cantidades traza para plantas (Co, Cu, Fe, Mn, Mo y Zn) y animales (los anteriores más Cr y Ni), mientras que otros son totalmente perjudiciales (Cd, Hg, Pb y As) (Ahmad, et al., 2014), ya sea que se encuentren estos en su estado libre, en compuestos orgánicos, como los del Hg, o en sus estados oxidados, como el Cr(VI) (Durães et al., 2018).

Hay que resaltar que la fracción reactiva (las formas solubles e intercambiables) de los metales pesados son una mayor causa de toxicidad del suelo en comparación a especies precipitadas e insolubles (Liu et al., 2018). Son constituyentes naturales de la corteza terrestre y liberados en fenómenos como la actividad volcánica. Apartando su origen geogénico poco común (Liu et al., 2018), son las actividades antropogénicas como la minería, el uso industrial y agrícola, los que aumentan su abundancia en el medio ambiente ya sea incorporándolos o incrementando su concentración (RoyChowdhury, et al., 2017), causando el deterioro de los servicios ecosistémicos, la red trófica y la salud humana eventualmente (Liu et al., 2018). La eliminación de este tipo de contaminantes, de medios porosos sólidos como los suelos y los sedimentos, ha sido un desafío tecnológico para los ingenieros y científicos en las últimas décadas (Krcmar et al., 2018).

La liberación de metales pesados ha sido muchas veces la causa de alteraciones crónicas en el sistema nervioso, tracto gastrointestinal y disfunción renal (Zhou et al., 2018), incluso en bajos niveles de exposición. Muchos de ellos pueden encontrarse en la lista de la Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de los Estados Unidos (RoyChowdhury et al., 2017), principalmente el Arsénico (Nº1), Plomo (Nº2), Mercurio (Nº3), Cadmio (Nº 7) y Cromo y sus compuestos orgánicos e inorgánicos.

2.2.2.1. Plomo. Número atómico 82, peso atómico 207, color azulado, Forma muchas sales, óxidos y compuestos (Londoño et al., 2016).

2.2.2.1.1 Efectos del plomo en el medio ambiente. El plomo se encuentra en pequeñas cantidades en el ambiente, pero las mayores

concentraciones son el resultado de las actividades humanas como: combustión del petróleo, procesos industriales, combustión de residuos sólidos, entre otros.

Las actividades humanas generan que las partículas de plomo se depositen en el suelo, la superficie del agua y viajen a través del aire permaneciendo en la atmósfera. Entre los principales deterioros al medio ambiente se tiene la pérdida de fertilidad del suelo limitando la síntesis clorofílica de las plantas y la perturbación en el fitoplancton en el caso del recurso agua; aunque algunas plantas pueden absorber hasta 500 ppm de plomo (Bonilla V., 2013).

2.2.2.1.2 Efectos del plomo en la salud. El plomo afecta principalmente al sistema nervioso, tanto en niños como en adultos. La exposición ocupacional prolongada de adultos al plomo causa alteraciones en algunas funciones del sistema nervioso. Los niveles de exposición altos pueden dañar seriamente el cerebro y los riñones en adultos o en niños y pueden causar la muerte. En mujeres embarazadas, los niveles de exposición altos pueden producir abortos. En hombres, la exposición a altos niveles de plomo puede alterar la producción de espermatozoides (ASTDR 2007). El diagrama del plomo es necesario para ver su movilidad de este a diferentes pH.

2.2.2.2. Cobre. Es un metal no ferroso con un número atómico igual a 29. Su utilidad se debe a sus propiedades químicas, eléctricas, físicas y mecánicas, además de su abundancia. La mayor parte del cobre en el mundo se obtiene de los sulfuros minerales como la calcocita, covelita, calcopirita, bornita y enargita. Tiene dos isótopos naturales estables ^{65}Cu y ^{63}Cu y nueve isótopos inestables (radiactivos). De cientos de compuestos fabricados de manera industrial, el más

importante es el sulfato de cobre (Londoño et al., 2016).

2.2.2.2.1 Efectos del cobre en el ambiente. Las actividades humanas como la extracción de minerales, fundición, minería, residuos domésticos, fertilizantes, fungicidas, plaguicidas han sido las que mayor aporte tienen frente al aumento de las concentraciones en el suelo y en agua mediante sus diferentes rutas de movilización en el medio ambiente (Lagos, 2012). En concentraciones elevadas es tóxico y sus efectos se los ve reflejados en las plantas, afectando el crecimiento radicular con lesiones en las raíces y formando raicillas cortas de color pardo (Kamunde & Wood, 2004).

2.2.2.2.2 Efectos del cobre en la salud. La ingestión accidental de compuestos de cobre es relativamente inofensiva si se toman las debidas medidas a tiempo, como inducir al vómito permitiendo liberar gran parte de la sustancia ingerida. Por otra parte, las actividades relacionadas con fragmentos de cobre metálico se pueden alojar en los ojos causando uveítis, abscesos y finalmente pérdida de los ojos. Otra actividad que genera riesgo son las fumigaciones de viñedos, lo que genera lesiones pulmonares y granulomas hepáticos cargados de cobre (Nordberg, 2012).

2.2.2.3. Zinc. El zinc con numero atómico igual a 30, Es un metal de color blanco azulado que arde en el aire con llama verde azulada (Londoño et al., 2016).

2.2.2.3.1 Efectos del Zinc en el ambiente. Los óxidos de zinc son utilizados como catalizador en la manufactura del caucho e insumo de pigmentos para plásticos, cosméticos y tintas de imprenta. Además, otros compuestos de

Zn se utilizan como fertilizantes ($ZnSO_4$), complemento vitamínico, aditivo en jabones y como catalizador para purificar agua. Por lo que el inadecuado manejo estos productos o sus residuos permiten que el Zn se incorpore al ambiente como contaminante (Emsley, 2001; Gray, 2006).

2.2.2.3.2 Efectos del Zinc en la salud. El zinc es un elemento importante para los seres vivos, aunque su deficiencia o exceso pueden causar efectos adversos en las funciones biológicas (O'Neill, 1998). Los efectos tóxicos del zinc por la exposición oral ocasionan náuseas, vómitos, calambres abdominales y diarrea. La exposición aguda por inhalación del zinc y sus compuestos desarrolla fiebre por humos metálicos, neumonitis química y bronquial (Franzblau y Fromes, 2005; Smith, Williams, 2005).

Tabla 3

Estándares de calidad del suelo para Cu, Pb y Zn

Parámetros	Unidades	Usos de suelo agrícola
Cobre	mg/kg	63 ^b
Zinc	mg/kg	200 ^b
Plomo	mg/kg	70 ^a

Nota. a “Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo”, (DS N° 011-2017), Perú, para el Pb y Cu b=Canadian y “soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Summary tables”, (Consejo Canadiense del Medio Ambiente, 2007).

2.2.3 Tipos de remediación de suelos

2.2.3.1 Biorremediación. Es un proceso que utiliza las habilidades catalíticas de los organismos vivos para degradar y transformar contaminantes

tanto en ecosistemas terrestres como acuáticos, presenta un enorme potencial en la mitigación de la contaminación ambiental. La biorremediación se ha centrado en la explotación de la diversidad genética y versatilidad metabólica que caracteriza a las bacterias para transformar contaminantes en productos inocuos o, en su defecto, menos tóxicos, que pueden entonces integrarse en los ciclos biogeoquímicos naturales (Garbisu, Amézaga, & Alkorta, 2002).

2.2.3.2 Fitorremediación. La fitorremediación de suelos contaminados se basa en el uso conjunto de plantas, enmiendas del suelo y técnicas agronómicas para eliminar, retener, o disminuir la toxicidad de los contaminantes del suelo (Chaney et al., 1997). Este grupo de fitotecnologías reúne un gran número de ventajas, especialmente la limpieza y la economía; no utilizan reactivos químicos peligrosos, ni afectan negativamente a la estructura del suelo, sólo aplican prácticas agrícolas comunes; además, el proceso se realiza 'in situ' evitando costosos transportes (Cunningham et al., 1995).

2.2.3.3 Electrorremediación. Dentro de la diversidad de tecnologías de remediación, figura la Electrorremediación; estudiado para el tratamiento de suelos, lodos y sedimentos (Cameselle y Gouveia, 2018) con el objetivo de estabilizar y controlar la lixiviación de los contaminantes originados de residuos urbanos e industriales (Peppicelli et al., 2018). Desde los primeros ensayos, en las dos últimas décadas del siglo XX, ha demostrado su capacidad de remover algunos contaminantes orgánicos y metálicos (cuando la contaminación se debe a un sólo metal) a escalas de laboratorio con resultados cercanos al 100% de remoción, y de campo con resultados variados (De La Rosa et al., 2007). Esta tecnología se basa en la aplicación de un gradiente de potencial eléctrico para

transportar y eliminar metales pesados, tiene un uso extensivo para la remediación de suelos (Cheng et al., 2017). Movilizando iones y moléculas polares a través de la Electromigración, el Flujo Electroosmótico (Yuan et al., 2017), la Electroforesis y la Difusión, hacia las cámaras de los electrodos donde se acumulan para finalmente ser dispuestos (Cameselle & Gouveia, 2018). Para lograr esto se requiere el empleo de electrodos, usualmente humectados con un electrolito para mejorar las condiciones de conducción del campo eléctrico (De La Rosa et al., 2007).

2.2.3.3.1 Electromigración. Es el movimiento de iones debido al campo eléctrico hacia el electrodo de carga opuesta. La electromigración es responsable del transporte de iones libres como H^+ , OH^- , cationes (metales pesados, amonio, etc.) y aniones (cloruro, cianuro, fluoruro, nitrato, etc.) y también compuestos orgánicos ionizables. La tasa de migración depende principalmente no solo del volumen del ion y de su carga, sino también en las interacciones con la superficie de las partículas sólidas de suelo que pueden retardar el movimiento. La electromigración es el mecanismo responsable del transporte de metales pesados. (Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , etc.), aniones inorgánicos (F^- , As , CN^- , NO_3^- , etc.), y algunos iónicos. o moléculas orgánicas ionizables (acetato, oxalato, etc.) durante el tratamiento electrocinético. de un suelo contaminado. El aporte real de la electromigración al transporte de un ion específico depende de la conductividad del suelo, la porosidad del suelo, pH, la gradiente de voltaje, la concentración del ion y la presencia de otros iones que compiten en el transporte de carga eléctrica. La tasa de electromigración de un ion específico es proporcional a su carga eléctrica y el gradiente de voltaje (Cameselle y G, 2015).

2.2.3.3.2 Electroósmosis. Es el flujo neto de agua inducido por el campo eléctrico en la estructura porosa del suelo. En general, las partículas del suelo están cargadas. Dado que el asunto es globalmente neutral, una serie de contra iones neutralizan esa carga. Los contraiones son concentrados en la capa difusa de la doble capa eléctrica. Bajo el efecto de un campo eléctrico, el exceso de iones en la capa difusa cerca de la superficie de la partícula del suelo migra en un plano paralelo a la superficie del suelo en la dirección del electrodo opuesto. Esos iones están en solución acuosa, por lo tanto, solvatados. En su movimiento, los iones arrastran las moléculas de agua solvatadas; este movimiento se transmite a las moléculas vecinas debido a las interacciones dipolo-dipolo, formando una tasa plana perfil del agua que fluye a través del poro. En general, las partículas del suelo son electronegativas, por lo que los contraiones serán positivos; de ahí, la dirección de electroosmótica fluirá hacia el cátodo. La electroósmosis es el transporte dominante; mecanismo para contaminantes inorgánicos y orgánicos en solución o emulsionado en el líquido intersticial (Cameselle y Gouveia, 2015). En comparación con otras técnicas, permite una menor exposición de los operadores a los contaminantes y una disposición de los residuos concentrados en las cercanías de los electrodos (Vázquez et al., 2004); y últimamente se le ha considerado una tecnología flexible y eficaz, con la capacidad de complementarse con otras técnicas de remediación (Krcmar et al., 2018). Además, se desarrolla una migración dirigida de los contaminantes, evitándose la dispersión fuera de la superficie o volumen de tratamiento como sucede frecuentemente en el Arrastre de Fluidos (De La Rosa et al., 2007), lo que se interpreta como un mayor nivel de aceptabilidad y sostenibilidad (Ferrucci,

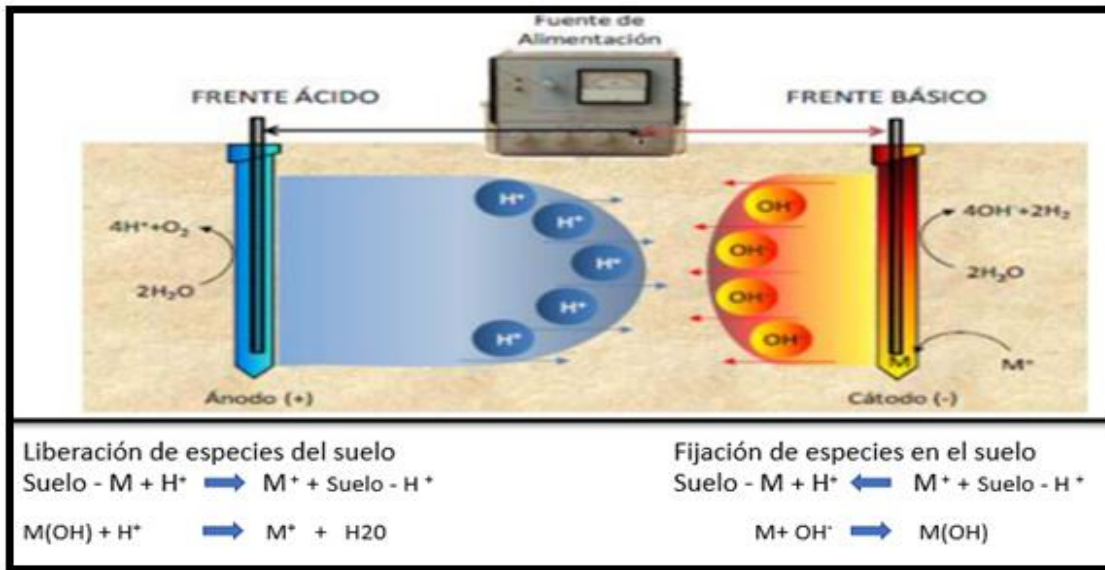
et al., 2017).

2.2.4 Sistema De Electrorremediación

2.2.4.1 Electrólisis. El proceso consta de dos electrodos que están conectados a un flujo de energía eléctrica y sumergidos en una solución (comúnmente agua), el que está conectado al polo positivo es conocido como ánodo y el conectado al polo negativo como cátodo, cada electrodo atrae a los iones opuestos, así el ánodo atrae a los iones negativos y es el lugar donde aparece el oxígeno, mientras que en el cátodo se atraen a los positivos haciendo que el hidrógeno aparezca allí (Velásquez y Quiceno, 2013).

Figura 2

Proceso de electrólisis del agua



Nota. tomado de (López, 2013).

2.2.4.2 Naturaleza de los electrodos. Los electrodos utilizados en electroremediación habitualmente se fabrican con materiales como platino, grafito o titanio para impedir que tengan contacto con el sustrato y las soluciones

electrolíticas, evitando de esta manera que se contamine la muestra o que se obtengan reacciones indeseadas (De la Rosa et al., 2007).

Los electrodos empleados en electrorremediación, deben tomar 5 consideraciones al momento de seleccionar (Bayardo,2006). Tales como las propiedades de conducción eléctrica del material, disponibilidad y costo, facilidad de fabricación, resistencia mecánica y resistencia a la corrosión.

2.2.4.3 Densidad de corriente e intensidad del campo eléctrico.

(Alshawabkeh, et al., 2010), señala que tanto la densidad de corriente e intensidad de campo Estas dos características están en función de las propiedades del suelo contaminado, tales como conductividad eléctrica, espaciamiento entre electrodos y tiempo de tratamiento requerido. Cuando un suelo tiene una conductividad alta, por ejemplo, la intensidad de corriente se logra mantener constante cuando se incrementa la densidad de corriente. (Alshawabkeh, et al., 2010) manifiesta que la mayor eficiencia de la intensidad de corriente está en el rango de 0,10 a 0,01 mA/cm² para el desarrollo de la electrorremediación.

2.2.4.4 Solución humectante. La especie química de los contaminantes y sus transformaciones son determinantes para el desarrollo de la remediación electrolítica (De la Rosa et al., 2007, p. 134).

El estudio de (Alshawabkeh, et al., 2010) señala que la reducción de contaminantes en el suelo, algunas veces puede verse afectada por estas transformaciones; por consiguiente, se deben usar soluciones que brinden la solubilización de contaminantes para humectar el sustrato y permita mejorar su

movilidad (p. 29). (Alshawabkeh, et al., 2010) manifestaron que las soluciones empleadas como agentes humectantes deben Ser estables químicamente, Tener afinidad por los contaminantes del suelo, No originar residuos tóxicos en el suelo, ser selectivos y no tener afinidad por las partículas de sustrato.

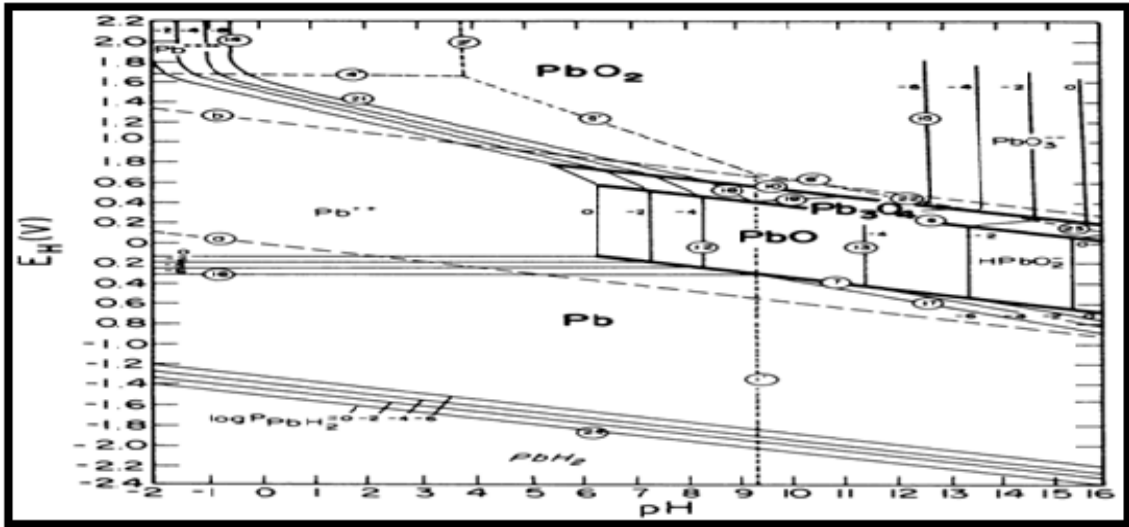
2.2.5. Factores que Influyen en la electroremediación del suelo

2.2.5.1 pH. Un factor crítico es el mantenimiento del pH cerca de los electrodos donde hacen aparición frentes ácidos y básicos, con valores de hasta 2 y 12 unidades, respectivamente (Ramadan et al., 2018). Estos frentes al movilizarse por el interior del suelo, influyen de modo apreciable en la eficacia de la remoción de los contaminantes; por ejemplo, al precipitar los metales como hidróxidos en el caso del frente básico (Vázquez et al., 2004), lo que reduce la movilidad de los contaminantes.

Es necesario conocer no solamente el pH del medio acuoso, sino también su potencial de reducción Eh (medido en volts). Estas dos propiedades, Eh y pH, son representadas en el conocido diagrama de Pourbaix, el cual define las regiones termodinámicas estables del metal y del agua, y en donde las líneas que dividen las fases de estabilidad son calculadas a partir de la ecuación de Nernst y de las constantes de equilibrio de los compuestos metálicos. Dicho diagrama indica también que condiciones de bajo implican medios acuosos reductores y altos de soluciones con gran capacidad oxidante, es decir bien aireada (Jones, 1996, p. 50; McCafferty, 2010, pp. 95-96; Wulfsberg, 1991, pp. 146-147).

Figura 3

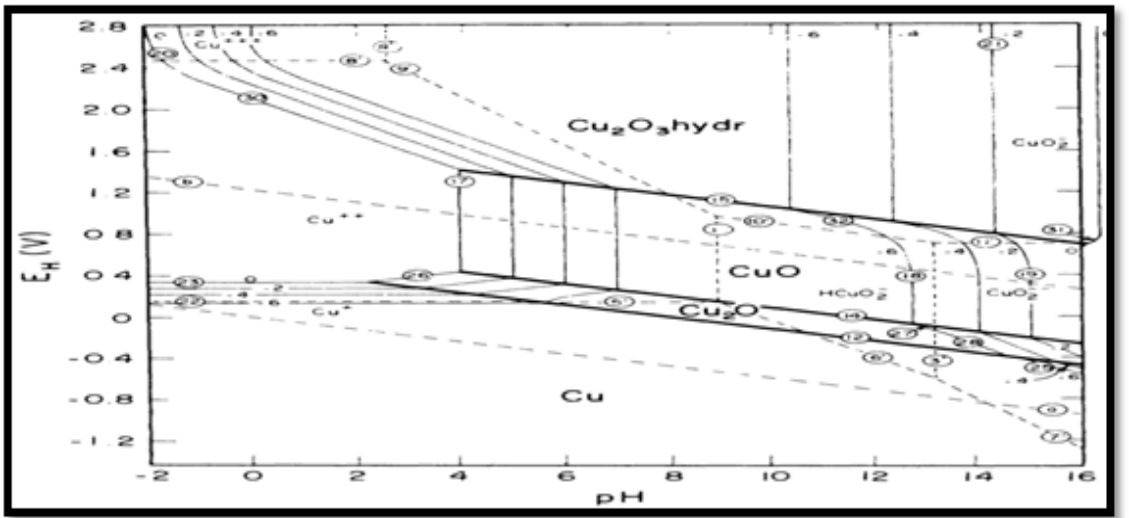
Diagrama de pourbaix para el plomo



Nota. tomado de (Pourbaix,1973).

Figura 4

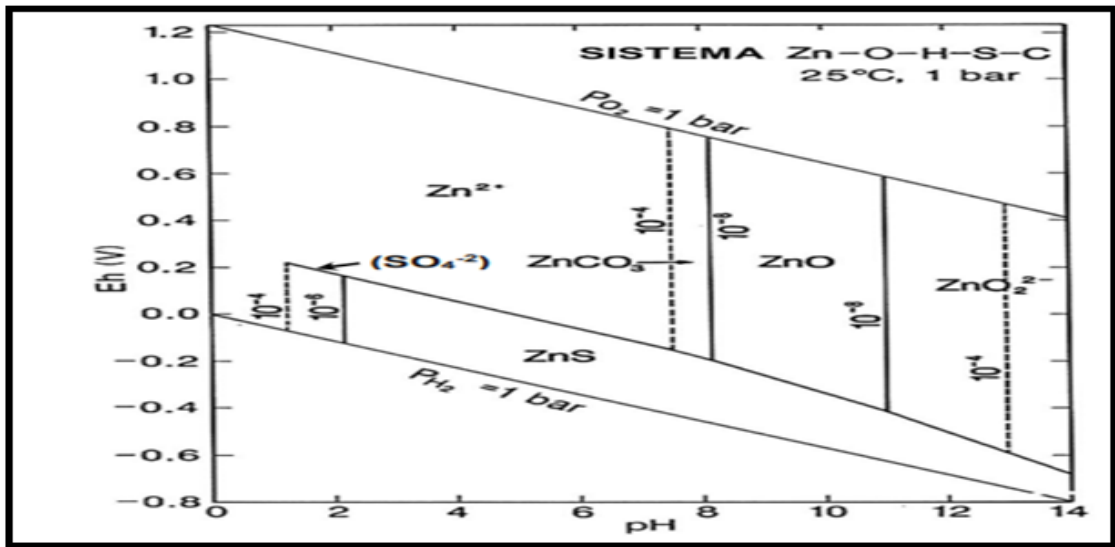
Diagrama de pourbaix para el cobre



Nota. tomado de (Pourbaix,1973).

Figura 5

Diagrama de Pourbaix para el zinc



Nota. tomado de Pourbaix, M., 1973.

2.2.5.2 Conductividad eléctrica. Es definida como el paso de la corriente eléctrica en un medio físico que permite el movimiento de iones, depende del tipo de suelo durante el tratamiento electrocinético. Se calcula mediante la resistencia que pueda presentar dicho suelo en el tránsito de los iones. Un pH variado puede alterar la conductividad del suelo dentro de un sistema (De La Rosa et al., 2007).

2.2.5.3 Naturaleza y química del suelo. Suelos de baja permeabilidad hidráulica, saturados preliminarmente con una solución electrolítica adecuada (Ferrucci et al., 2017) y de textura fina fueron los que dieron mejor respuesta en niveles de laboratorio (López et al., 2018), mientras que otras experiencias demostraron que materiales aislantes y conductores presentes naturalmente, pueden reducir la eficiencia.

También podemos señalar que una menor viscosidad de la fracción

líquida del suelo y mayor constante dieléctrica que, según la ecuación de Helmholtz-Smoluchowski, permiten una mayor movilidad de los iones metálicos.

$$EO = \frac{\varepsilon\zeta}{\mu} \frac{\partial\delta}{\partial x}$$

De la ecuación presentada, EO es la velocidad de migración promedio de los iones metálicos y ζ su potencial Zeta; ε y μ corresponden respectivamente, a los valores de Constante dieléctrica y viscosidad del suelo. El gradiente eléctrico $\partial\delta/\partial x$ será un valor controlado (Liu et al., 2018).

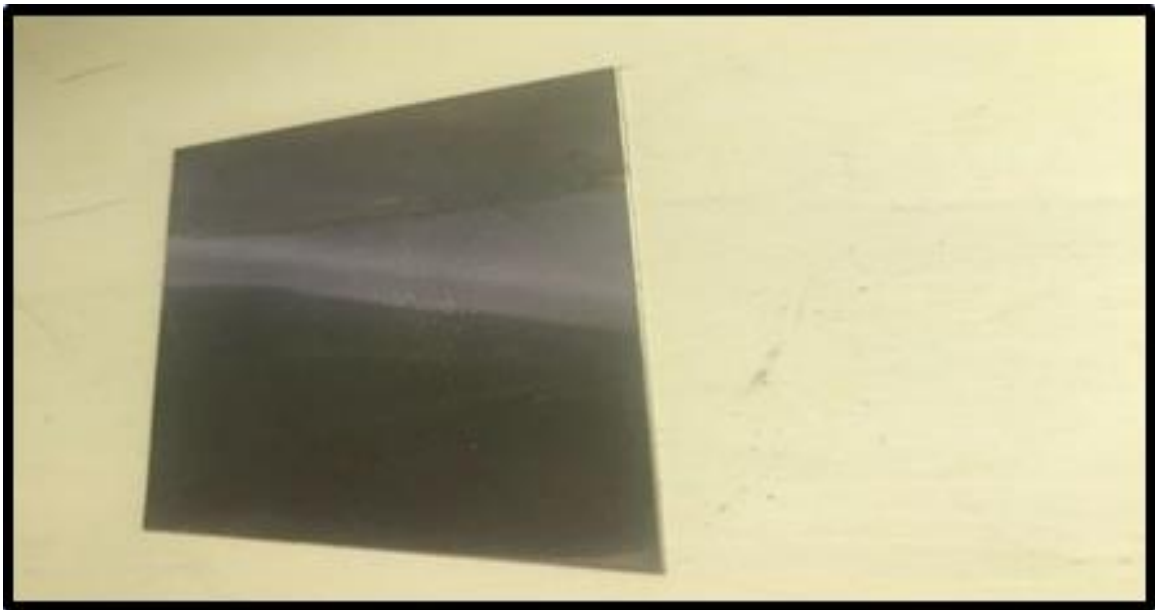
2.2.5.4 Tipo y arreglo de los electrodos. Para constituir un buen contacto en los electrodos y descargar los gases generados por la electrolisis del agua, se deben emplear electrodos de material poroso. También, la forma, el tamaño, la separación y arreglo entre electrodos determina la magnitud de remoción de contaminantes en el suelo (De la Rosa et al., 2007). Los electrodos pueden ser de: hierro, acero, grafito, etc. Entre todos ellos el acero inoxidable 316 tiene mejores condiciones y características.

2.2.5.5 Electrodo acero inoxidable 316. La materia 316 resiste a la corrosión MAS que el 304, no da una Manera general, si no especialmente cuando se trata de una corrosión por picaduras. Los elementos que producen este tipo de corrosión son: flúor, cloro, bromo, y yodo, los cuales se denominan en términos químicos halógenos. El elemento más conocido de ellos es el cloro, presente en el mar, en ambientes marinos y en agua potable. Para proteger al acero inoxidable de las acciones del cloro (cloruros, ion cl.) se introduce en la aleación el elemento molibdeno (MO) en una proporción del 2% al 3%. El molibdeno dentro del acero inoxidable forma compuestos químicos que protegen

al material de la corrosión por picaduras el material AISI 316 también se suele denominar como 18/8/2 refiriéndose al contenido de cromo/níquel/molibdeno. (Poveda y Prieto I.,2011). Acero Inoxidable 316 (Figura 6) Propiedades y características Física-Químicas. Fundación Universitaria los Libertadores.

Figura 6

Electrodo de acero inoxidable



2.2.5.6 Velocidad de migración de los iones. Es importante destacar que la electrorremediación implica un tratamiento de duración relativamente largo (varias semanas dependiendo del grado y tipo de contaminación) (Vázquez, 2004). Dependiendo de la velocidad total a la que se mueven los iones metálicos en el suelo, la remediación electrocinética puede demorar de algunos días hasta años (Liu et al., 2018).

2.2.6 Electrorremediación

Es un tratamiento basado en la teoría de que una corriente de baja

densidad movilizará contaminantes en forma de especies cargadas. Una corriente que pasa entre los electrodos genera que los medios acuosos, los iones y las partículas se movilen a través del suelo, los desechos y el agua. Los contaminantes que terminan en los electrodos se pueden eliminar mediante electrodeposición, precipitación y adsorción con resinas de intercambio iónico o mediante el bombeo de agua cerca del electrodo (USEPA, 2007, p. 176).

2.2.7 Ácido nítrico

Es un agente humectante que favorece al incremento de la movilidad de los iones en el suelo. Sus iones H^+ neutralizan los OH^- electrogenerados y sus aniones no reaccionan significativamente con el suelo, migrando hacia el ánodo sin formar sales insolubles con los metales. No obstante, se debe evitar el exceso de ácido como solución humectante debido a que podría neutralizar el potencial Zeta de los poros y limitar la electroósmosis (Bahemmat et al., 2016; Li, 2018).

2.2.8 Ácido fosfórico

Es un agente humectante del suelo que favorece al incremento de la movilidad, solubilidad y biodisponibilidad de los iones en el suelo. Evita la generación de precipitados metálicos en la zona catódica y optimiza la eficiencia de la electrorremediación, adicionando de forma regulada los ácidos muy solubles y poco reactivos con el suelo (Alshawabkeh, et al., 2010; Cameselle, 2015, p. 175).

2.2.9 Tiempo de tratamiento

Es el tiempo en el proceso de tratamiento electroquímico que aplicamos para relacionar la eficiencia en cada tiempo.

2.2.10 Remoción de Metales pesados en suelos contaminados

Es un grupo de metales que se utilizan en la industria como el Cadmio, Cobre, Plomo, Mercurio y Zinc. Que Son considerados generalmente tóxicos.

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 Electrorremediación con arreglo lineal

Esta técnica establece que se puede aprovechar el transportar iones metálicos de un compartimiento anódico a un catódico, para remover metales pesados en el suelo, para ello en medio de los compartimientos se posiciona el suelo contaminado (arreglo lineal), asistido por una solución humectante que facilitara la disponibilidad de los metales en el fluido intersticial (fluidos líquidos y gaseoso entre las partículas sólidas del suelo) del suelo. Todo lo anterior se encuentra sustentado por la diferencia de potencial eléctrico, que permite transportar metales mediante la electromigración y flujo electroosmótico.

2.3.2 Remoción de los metales pesados presentes en los suelos contaminados:

La remoción de metales pesados, es un constructo, que establece la idea de la separación o disminución del contenido, masa o concentración de cada metal a niveles aceptables por la comunidad científica, la remoción de metales pesados en suelo es establecida para la investigación como la disminución de la concentración del metal en suelo, concentración que es expresada en mg del metal por cada kg de suelo; asimismo la remoción es cuantificada en unidades adimensionales como el porcentaje.

2.4 Definición de Términos Básicos

Algunas de las definiciones básicas que se tomarán en cuenta para la investigación, son las siguientes:

Calidad de suelos

Es la capacidad natural del suelo de cumplir diferentes funciones: ecológicas, agronómicas, económicas, culturales, arqueológicas y recreacionales. Es el estado del suelo en función de sus características físicas, químicas y biológicas que le otorgan una capacidad de sustentar un potencial ecosistémico natural y antropogénicas (MINAM, 2014).

Electrorremediación

Es una tecnología de remediación prometedora y se usa ampliamente para extraer metales pesados de los suelos. Aplica un potencial eléctrico para transportar y eliminar metales pesados mediante electromigración y flujo electroosmótico (Saberri et al., 2018).

Estándar de calidad ambiental

Es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos (MINAM, D.S. N° 002-2017).

Remediación

Tarea o conjunto de tareas a desarrollarse en un sitio contaminado con la finalidad de eliminar o reducir contaminantes, a fin de asegurar la protección de la salud humana y la integridad de los ecosistemas (MINAM, 2014).

Sitio contaminado

Aquel suelo cuyas características químicas han sido alteradas negativamente por la presencia de sustancias químicas contaminantes depositados por la actividad humana, en concentraciones tal que en función del uso actual o previsto del sitio y sus alrededores represente un riesgo a la salud humana o el ambiente (MINAM, 2014).

Suelo

Material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad (MINAM, D.S N°011-2017, Anexo).

Suelo agrícola

Suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas (MINAM, D.S N°011-2017, Anexo).

III.Hipótesis y Variables

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis General

- ✓ El Sistema de electroremediación con arreglo lineal tiene una alta eficiencia de remoción de los metales pesados presentes en el suelo contaminado de la comunidad de San Miguel de Viso.

3.1.2 Hipótesis Específicas

- ✓ El suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso, tiene concentraciones de metales pesados mayores que los establecidos en el ECA peruano para suelos y la norma de referencia (Guías Canadienses de Calidad del Suelo).
- ✓ El tipo de solución humectante influye significativamente en la remoción de Cu, Pb y Zn del suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso.
- ✓ El tiempo de tratamiento influye significativamente en la remoción de Cu, Pb y Zn del suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso.
- ✓ El sistema de electroremediación con arreglo lineal permite un alto porcentaje de remoción de Cu, Pb y Zn, del suelo contaminados de la comunidad de San Miguel de Viso.

3.2 Definición Conceptual de las Variables

Variable Independiente

Sistema de electroremediación con arreglo lineal:

Es el tratamiento que se realiza mediante un proceso electroquímico

movilizando los contaminantes presentes en el suelo hacia el cátodo, en forma de especies cargadas. Que al aplicarse corriente eléctrica a los electrodos genera iones y partículas que se movilizan a través de los medios acuosos y el suelo. Finalmente, los contaminantes que llegan a los electrodos se pueden eliminar mediante precipitación o mediante el bombeo de agua cerca del electrodo (Velásquez y Quiceno, 2013).

Variable dependiente

Remoción de los metales pesados presentes en los suelos contaminados:

Remoción de elementos que forman compuestos y que se encuentran en los suelos, por ser a altas concentraciones perjudiciales y tóxicas para la biota y ecosistemas asociados al suelo. Sobre todo, si estos metales provienen de actividades antrópicas como la generación de relaves mineros (Datta, 2011).

3.2.1 Operacionalización de Variables

La investigación a realizar será netamente experimental, en ese sentido existe una relación entre las variables, ver Tabla 4:

Tabla 4*Operacionalización de la variable dependiente e independiente*

Tipo de Variable	Dimensión	Indicador	Unidad de Medida	Método de Investigación	Técnica de recolección de datos
Variable Independiente: Sistema de electrorremediación con arreglo lineal	Solución humectante de ácido nítrico (0,1M) y ácido fosfórico (0,1M)	pH	Unidad de pH	Método Inductivo	4500-H ⁺ -B
		Conductividad	μS/cm		Conductímetro
		Intensidad de corriente	A		Multímetro
	Tiempo	5 días de tratamiento	Días		Cronómetro
		10 días de tratamiento			
Variable Dependiente: Remoción de los metales pesados en los suelos contaminados	concentración del Pb en suelo tratado	% de remoción Pb	mg Pb / kg suelo	ICP (Inductively Coupled Plasma) - 3500-Pb	
	concentración del Zn en suelo tratado	% de remoción Zn	mg Zn / kg suelo	ICP (Inductively Coupled Plasma) - 3500-Zn	
	Concentración del Cu en suelo tratado	% de remoción Cu	mg Cu / kg suelo	ICP (Inductively Coupled Plasma) - 3500-Cu	

IV. Diseño Metodológico

4.1 Tipo y diseño de la Investigación

De acuerdo a Hernández (2014), el trabajo de investigación es un estudio explicativo, con enfoque cuantitativo y es un diseño experimental.

El enfoque explicativo busca manifestar las causas que producen los efectos sobre las variables dependientes mediante un patrón predecible, para un Conjunto de muestras, e indicar las condiciones en que se manifiesta (Hernández, et al., 2014).

Por otro lado, la causalidad en un estudio experimental se consigue manipulando la variable independiente (sistema de electrorremediación con arreglo lineal) para observar sus efectos en la variable dependiente (remoción de los metales pesados en los suelos contaminados), ver Tabla 5.

Tabla 5

Identificación de variables

Independiente	Dependiente
Sistema de electrorremediación con arreglo lineal	Remoción de los metales pesados en los suelos contaminados

En la investigación se optó por un tipo de diseño de experimento denominado, diseño factorial simple, con dos factores (factor Inter sujetos: solución humectante y factor inter sujetos: tiempo) y dos niveles (A1 y A2; B1 y B2) en cada factor, ver Tabla 6, lo que permitió establecer un arreglo de 2X2, con tres replicas en cada combinación, resultando un tamaño experimental de 12 corridas, ver Tabla 7.

Tabla 6*Factores y niveles asociados al diseño factorial*

Factor	Nombre	Niveles	Descripción	Unidades
A	Solución	A1	Ácido fosfórico	pH
	Humectante	A2	Ácido nítrico	pH
B	Tiempo	B1	10 días	Días
		B2	5 días	Días

Tabla 7*Arreglo del diseño factorial simple*

Tiempo		
Solución humectante	B1 (5 días)	B2 (10 días)
A1 (Ácido nítrico)	Y ₁₁₁	Y ₁₂₁
	Y ₁₁₂	Y ₁₂₂
	Y ₁₁₃	Y ₁₂₃
A2 (Ácido fosfórico)	Y ₂₁₁	Y ₂₂₁
	Y ₂₁₂	Y ₂₂₂
	Y ₂₁₃	Y ₂₂₃

Nota. Y_{i,j,k}, donde i=(A1, A2); j=(B1,B2), k=(replica 1, 2 y 3), Y=(remoción de plomo, cobre y zinc)

4.2 Método de la investigación

El método de la investigación es el método inductivo, este método permite generar premisas generales a partir de situaciones específicas (Hernández et al., 2014), es así que en la investigación los resultados obtenidos de la

experimentación con electrorremediación en el suelo, podrán ser inferidos a todos los suelos contaminados de la localidad San Miguel de Viso.

Asimismo, para poder llevar a cabo la investigación se establecieron procesos y etapas, las cuales se describen a continuación.

4.2.1 Estudios preliminares

Esta etapa sirvió como línea base de la investigación y consistió en la recopilación de toda la literatura científica o estado del arte (publicación científica de los últimos años) relacionado con las variables de estudio.

4.2.2 Recopilación de información

En esta etapa se recopiló toda información relacionada a la contaminación por pasivos mineros, consultando para tal fin el inventario de pasivos ambientales mineros del Ministerio de Energía y Minas. Asimismo, se revisó información complementaria disponible como estudios de impacto ambiental, zonificación ecológica y económica, monitoreos existentes, información general, estadísticas de la región, departamento, municipal, información del Ministerio de Energía y Minas, de la Autoridad Nacional del Agua y Ministerio de Agricultura.

4.2.3 Preparación de la cartografía

En esta etapa se buscó imágenes satelitales del “Google Earth” y mapas del sistema de información geológicos catastral minero (Geocatmin), de las diferentes fuentes de sistema cartográfico con el fin de seleccionar las de mayor calidad. Con esta información cartográfica se realizó un mapa base para la evaluación del suelo contaminado por metales pesados. Este mapa se utilizó en la evaluación insitu del área de estudio y fue crucial en la determinación de

elementos como, distancia de los pasivos ambientales mineros a los distintos entornos; humanos, ambiental (cuerpos de agua superficial) y económico (Castro y Huamán, 2013).

4.2.4 Determinación de la composición del suelo contaminado por pasivos Ambientales mineros de San miguel de viso

4.2.4.1 Toma de muestra. En esta etapa se realizó la toma de muestras en suelos de la zona agrícola afectada indirectamente por los pasivos ambientales. La toma de muestras se efectuó en un área de potencial interés (API) menor a 0,5ha., luego según lo establecido en la guía de muestreo de suelos aprobado por R.M. N°085-2014-MINAM, se recopilaron 6 submuestras

4.2.4.1 Análisis de la muestra. Luego de obtener una muestra homogenizada (muestra representativa), se llevó al laboratorio acreditado (Analytical laboratory E.I.R.L.) para su análisis y determinación de la concentración de metales pesados por el método Inductively Coupled Plasma (ICP). Por otro lado, la caracterización del suelo (textura, porosidad, % de humedad, temperatura y pH) se llevó a cabo en la Universidad Nacional Agraria La Molina.

4.2.5 Diseño el Sistema de Electrorremediación Lineal

La implementación de un sistema de Electrorremediación a nivel laboratorio se empleó diversos materiales.

La estructura del sistema fue armada geoméricamente de forma rectangular (40 cm de largo, 9 cm de ancho y 15 cm de alto) y construidas de acrílico transparente de 2,5 mm de espesor. Presentan tres compartimientos,

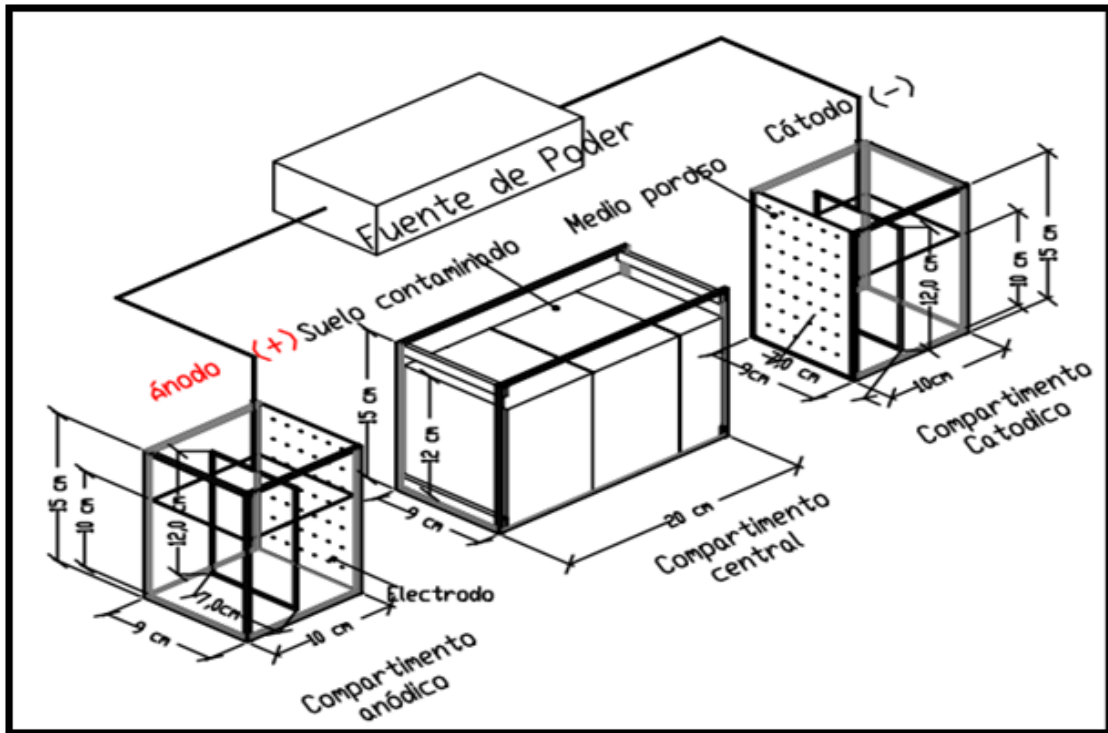
uno en cada extremo para el compartimiento anódico y catódico (10 cm x 9 cm x 15 cm cada uno), y uno en el centro para la muestra de suelo contaminado (20 cm x 9 cm x 15 cm) (Bahemmat et al., 2016). Se utilizaron placas de acrílico de 9cmx15cm con perforaciones de 0,5 cm de Diámetro, recubiertos con papel filtro Whatman N° 40 para separar los fluidos de las muestras de suelo.

Se usaron placas de acero inoxidable 316 (7 cm x 12 cm) con un espesor de 0,5 mm como electrodos, ya que el acero inoxidable 316 es un material resistente a la oxidación, y una aplicabilidad satisfactoria dadas sus características de conductividad eléctrica y de bajo costo (Escobar y Ocas, 2016, p. 71).

Finalizando el diseño se instalaron envases de plástico de 1 L capacidad sobre una base de madera elevada, en estos envases se almacenaron los electrolitos, mediante una válvula y una manguera se controla el caudal en el tratamiento. En la figura 7 se detallan el diseño del sistema electroquímico a escala de laboratorio.

Figura 7

Celdas y medidas del sistema electroquímico



4.2.6 Acondicionamiento de las muestras de suelo

4.2.6.1 Preparación de soluciones humectantes. Se preparó soluciones de ácido fosfórico y ácido nítrico al 0,1 M con reactivos químicos para análisis: (H_3PO_4) al 85%-87% y (HNO_3) al 65%. El volumen de la solución requerida de (H_3PO_4) 0,1 M: 5,6 mL para cada ensayo. El volumen de la solución requerida de (HNO_3) 0,1 M: 5,75 mL para cada ensayo.

4.2.6.2 Pretratamiento de las muestras suelo. El suelo fue removido de elementos gruesos y secado al medio ambiente bajo la sombra durante 72 horas, luego fue triturado y pasado a través de un tamiz de 2 mm. El suelo resultante se humectó en relación 1:0,3 (g de suelo: mL de solución) con cada solución humectante en función al orden de los experimentos y se homogenizó de forma

manual por varios minutos hasta obtener una pasta, la cual se dejó reposar por 2 horas (Bahemmat et al., 2016).

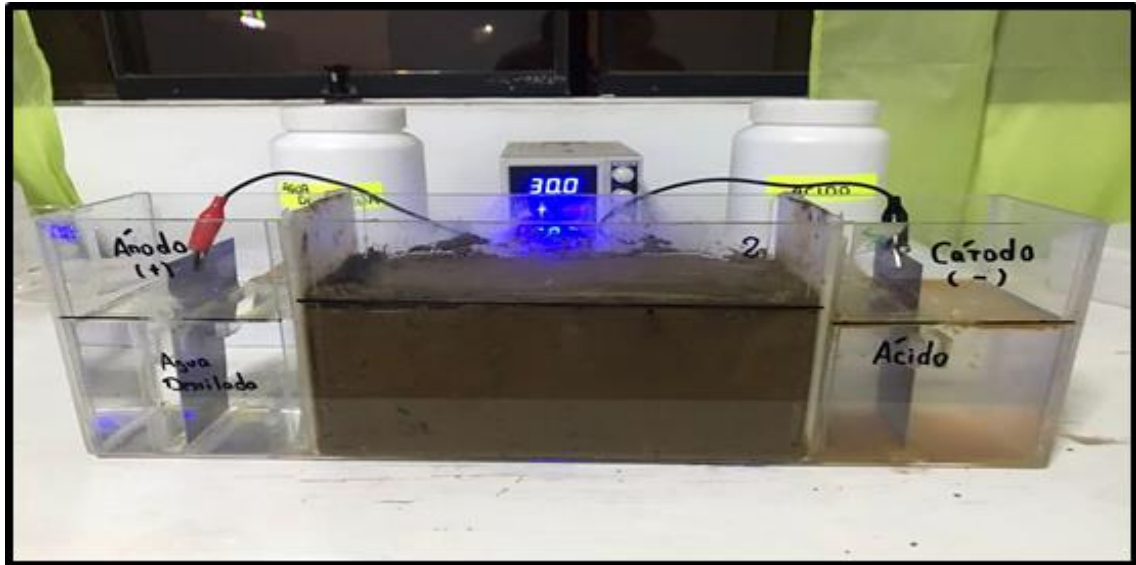
4.2.6.3 Instalación del sistema electroquímico. El sistema electroquímico a escala de laboratorio utilizada para esta investigación lo constituyen dos celdas, las cuales trabajaron en manera simultánea con el fin de reducir el periodo de experimentación. La Figura 8 muestra el sistema electroquímico a escala de laboratorio, donde presentan tres compartimentos, el central donde se empaquetó y compactó el suelo contaminado hasta una altura de 12 cm (2,75 kg) y los dos laterales donde se ubicaron los electrodos, los fluidos anódicos y catódicos.

Éstos dos últimos se llenaron hasta los 9 cm, 1 cm por debajo del suelo para evitar la mezcla superficial de las soluciones (Masi, 2017, p. 70), además, sus volúmenes de 1 L de agua destilada y 3,5 mL de ácido nítrico, fueron actualizados cada 24 h desde sus correspondientes reservorios para mantener la conductividad eléctrica del sistema y controlar el pH del fluido catódico. En el compartimento catódico se dispusieron también aberturas laterales a los 10 cm de altura para purgar el exceso de fluido por el fenómeno electro-osmótico (Ottosen y Jensen, 2005, p. 267). Cada celda electroquímica estuvo conectada a una fuente de poder de corriente continua (marca UNI-T 30V/5A) para abastecerse de energía, y entre ellos en serie se utilizó un multímetro digital (marca Prasek PR-85) para medir la intensidad de corriente durante el proceso.

Se utilizó un pH-metro marca Hanna HI-98103 para monitorear el pH del suelo y de los fluidos, y en este último se midió también la conductividad eléctrica (CE) con un conductímetro marca TDS&CE.

Figura 8

Presentación del sistema de electroremediación lineal en funcionamiento



Nota. Presentación del Sistema de Electroremediación lineal en funcionamiento.

4.2.6.4 Condiciones Experimentales. Se realizaron dos ensayos electroquímicos por triplicado, EC-1, EC-2, durante 10 y 5 días (tabla 8). En ellos, el compartimiento anódico se completó con 1 L de agua destilada y el compartimiento catódico con 1 L de ácido nítrico 0,1 M; ambos compartimientos se cambiaron cada 24 h principalmente para controlar el pH alcalino del entorno catódico (Bahemmat et al., 2016).

Se compactó en el compartimiento central 2,5 kg de suelo humectado con 825 mL de solución ácida, es decir, ácido nítrico 0,1 M para el primer tratamiento (EC-1) y ácido fosfórico 0,1 M para el segundo (EC-2), ambos experimentos mejorados (Bahemmat et al., 2016; Escobar y Ocas, 2016).

Todos los tratamientos electroquímicos se trabajaron a un potencial constante de 30 V, equivalente a un campo eléctrico de $1,5 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$, por medio de un multímetro digital instalado en el circuito se monitoreó la intensidad de

corriente eléctrica cada 2 h en las primeras 24 h, La medición de pH y conductividad eléctrica de los fluidos anódicos y catódicos se realizaron cada 2 h al insertar directamente los sensores (Bahemmat et al., 2016; Saberi et al., 2018; Tang et al., 2017).

Tabla 8

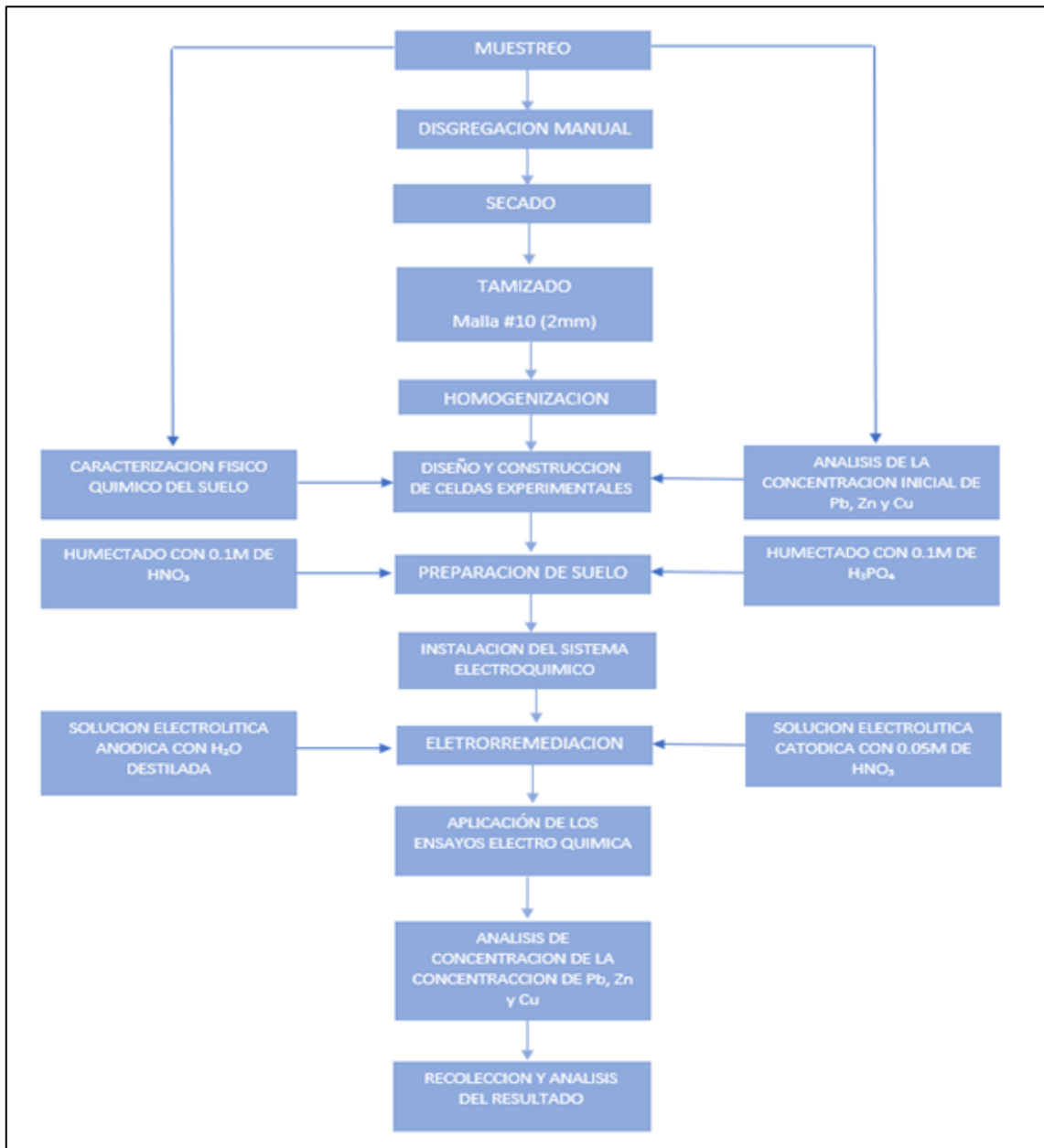
Parámetros iniciales del proceso de electroremediación

Parámetros	(SE-1) HNO ₃	(SE-2) H ₃ PO ₄
Diferencia de potencial(V)	30	30
Tiempo(días)	10	10
Tiempo(días)	5	5
Electrodos	Acero inoxidable	Acero inoxidable
Área de electrodos cm ²	84	84
Volumen del compartamiento anódico(L)	1 L (agua destilada)	1 L (agua destilada)
Volumen del compartamiento catódico(L)	1 L ácido nítrico 0,05M	1 L ácido nítrico 0.05M
Masa de la muestra de suelo (kg)	2,75	2,75
Relación suelo: solución humectación (g/mL)	1: 0,3	1: 0,3
Solución humectante del suelo	Ácido nítrico 0,01 M	Ácido fosfórico 0,01 M

Nota: SE: Sistema electroquímico

Figura 9

Presentación del proceso experimental



4.3 Población y Muestra

4.3.1. Población

La población de la investigación está constituida por suelos contaminados con metales pesados proveniente de los pasivos ambientales mineros (PAMs) abandonados por la minera San Donato, la zona agrícola impactada es

procedente de la localidad de “San Miguel de Viso”, ubicado en el distrito de San Mateo, provincia de Huarochirí, Lima.

4.3.2 Muestra

La muestra está representada por 36kg que fueron tomadas a una profundidad de 30cm cuya muestra se obtuvo por el Método de muestreo no probabilístico en 6 puntos como se observa en la Figura 10, con el fin de obtener una muestra compuesta representativa del suelo contaminado con metales pesados de acuerdo al protocolo estipulado en la *Guía para el Muestreo de Suelos* que establece el Ministerio del Ambiente de acuerdo al Decreto Supremo N° 011-2017.

Figura 10

Ubicación de los puntos de muestreo



En la Tabla 9 se indica la ubicación de la toma de muestras de suelo del área cercana a la minera “San Donato”, en la zona baja del centro poblado donde las muestras fueron tomadas para su análisis en laboratorio.

Tabla 9

Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo

	Código	Coordenadas		Descripción
		Latitud	Longitud	
Muestras de suelo del área cercana a la minera “San Donato”	MB1	-1,806373	-6,326976	Zona baja del centro poblado
	MB2	-1,806332	-6,326770	Zona baja del centro poblado
	MB3	-1,806291	-6,326917	Zona baja del centro poblado
	MB4	-1,806231	-6,326791	Zona baja del centro poblado
	MB5	-1,806215	-6,326911	Zona baja del centro poblado
	MB6	-1,806142	-6,326850	Zona baja del centro poblado

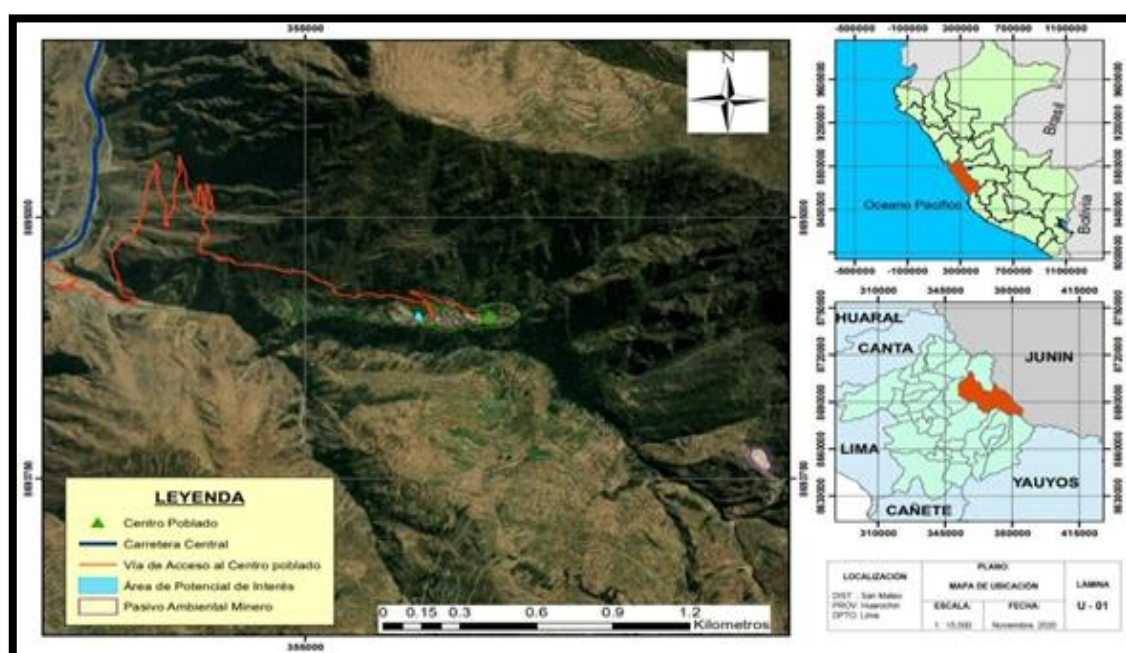
4.4 Lugar del estudio

El presente trabajo de investigación tiene relación con la comunidad de San Miguel de Viso, distrito de San Mateo de Huánchor, provincia de Huarochirí, región Lima.

Esta comunidad está ubicada en las coordenadas geográficas 11°48´ de latitud y 76°19´ de longitud, sobre los 3090 msnm a la altura del kilómetro 85 de la carretera central. Sus pobladores se dedican específicamente a la agricultura y ganadería, muy pocos se dedican a la minería, aun cuando su territorio se encuentra mineralizado con yacimientos polimetálicos.

Figura 11

Mapa de ubicación de San Miguel de Viso



La comunidad tiene tres anexos: Tambo de Viso, Pacota y Chacahuaro (Castro y Huamán, 2013). Esta comunidad posee una población de 91 habitantes de acuerdo con el sistema de consulta de centros poblados del INEI realizado en base a los resultados del censo nacional del 2017. Además, cuenta con 133 viviendas con energía eléctrica y red pública de desagüe. También cuenta con carretera afirmada y el uso de transporte público es a través de ómnibus con una frecuencia diaria.

Por otra parte, las unidades litológicas presentan la serie Volcánico-

Sedimentaria que está constituido por lavas y brechas andesíticas de color gris azulado a verdoso, con bastante oxidación, por el contenido de pirita, tobas andesíticas y algunas intercalaciones de areniscas. Por tanto, en general hay volcánicos y sedimentos, pero con predominio de la facies tobácea y un alto porcentaje de minerales ferromagnesianos que por alteración dan, a las rocas, coloración rojizovioláceo (INGEMET, 1983).

4.4.1 Vía de Acceso

El ingreso por el norte se accede por la carretera panamericana norte, hasta terminar el distrito de ATE y entrar por a la carretera central para continuar por, Huachipa, Chosica, y finalmente Huarochirí a la altura del kilómetro 85 km de la carretera central, se ingresa subiendo aproximadamente 500 m más de altura y está representada en la Figura 12 por una línea anaranjada que va en dirección al centro poblado de San Miguel de Viso.

Figura 12

Vía de acceso de San Miguel de Viso



Nota. Imagen satelital proporcionada por (Google Earth, 2020).

4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

Para poder comparar los datos se utilizarán, los estándares de calidad ambiental (ECA) para Suelos, los Parámetros Inorgánicos de su Anexo, mas no será limitante para la evaluación del comportamiento de otros metales (D.S. N° 011-2017).

- ✓ DS-002-2013 MINAM-Guía para el muestreo de suelos.
- ✓ DS-002-2014 MINAM- Disposiciones complementarias para la aplicación de los estándares de calidad ambiental (ECA).
- ✓ RM-N°085-2014-MINAM.
- ✓ Los parámetros serán analizados en laboratorio, para ello se utilizará el método de ensayo EPA 3050.
- ✓ Se realizará una encuesta a la población de acuerdo a lo recomendado por la “guía para la elaboración de planes de descontaminación de suelos” - Estipulado en la RM-85-2014- MINAM.
- ✓ Canadian soil quality guidelines for the protection of environmental and human health: Summary tables”, Consejo Canadiense del Medio Ambiente, 2007.

4.5.1 Materiales y Equipos

4.5.1.1 Trabajo en Gabinete. Libros, escritorio, folletos, artículos y bibliografías.

4.5.1.2 Trabajo de Campo. Almacén de muestras, bolsas plásticas, libreta de campo, lápices, espátula, electrodos de acero inoxidable, cables,

palana, pico, wincha, fuente de poder, cámara fotográfica, equipo de protección personal, GPS, Multiparámetro, Camioneta / transporte de carga, conductímetro.

4.5.1.3 Trabajo en Laboratorio. Espátula, Matraz, vaso precipitado, pipeta, bureta, probeta, bombilla, gotero, luna de reloj, bagueta, matraz, piseta, balanza eléctrica, PH-metro, termómetro, ICP.

4.5.1.4 Reactivos. Agua destilada, ácido nítrico y ácido fosfórico de grado analítico.

4.5.1 Técnicas Analíticas

Las técnicas analíticas utilizadas para este proyecto están conformadas por parámetros físico-químicos, donde se hace mención a la norma donde se encuentran los métodos estandarizados para la aplicación de la técnica en el laboratorio donde se encuentra el proyecto descritas en la Tabla 10.

Tabla 10

Técnicas analíticas utilizadas en el proceso de electrorremediación

Parámetro	Unid.	Norma técnica	Método
Textura	%	NTC 6299-2018	Método de Bouyoucos
Densidad	g/cc	ASTM D7263:2018	Método de la probeta
Humedad	%	NTC 6230:2018	Método gravimétrico
Temperatura	°C	2550	Termómetro
pH	-----	4500-H ⁺ -B	Electrométrico
Conductividad Eléctrica	μS/cm	2510 B.	Conductímetro
Metales Pesados	ug/l	3125B	
Pb	ug/l	3500-Pb	ICP (Inductively Coupled Plasma)
Cu	ug/l	3500-Cu	
Zn	ug/l	3500-Zn	

4.6 Análisis y Procesamiento de Datos

Para esta investigación se seleccionó el programa SPSS (SPSS,2014, p.1), además, se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA), del programa SPSS, proporcionándonos herramientas que permite consultar datos y formular hipótesis de pruebas adicionales de forma rápida, así como ejecutar procedimientos para facilitar relaciones entre variables e identificar tendencias. (Rubio y Berlanga,2011).

4.6.1 Tratamiento Estadístico

En este punto tuvo como finalidad evaluar si las variables independientes (solución humectante y tiempo), tienen o no efectos sobre tres variables dependientes (concentración de Pb, Zn y Cu en el suelo). Por ello, se consideró aplicar análisis múltiples de varianza (ANOVA) bidireccionales.

Esto es, para condiciones de la presente investigación:

i) **H₀:** $\mu_1 = \dots = \mu_{i..}$, contra

H_a: por lo menos $\mu_i \neq \mu_{i'}$ para $i \neq i'$,

Donde H₀ y H_a representan lo siguiente:

H₀: El promedio de concentración de Pb, Zn y Cu en el suelo debido a la Solución Humectante es igual para todos.

H_a: Existe diferencias significativas entre el promedio de concentración de Pb, Zn y Cu en el suelo debido a la Solución Humectante.

ii) **H₀:** $\mu_{.1.} = \dots = \mu_{.j.}$, contra

H_a: por lo menos $\mu_{.j} \neq \mu_{.j'}$. para $j \neq j'$,

Donde H₀ y H_a representan lo siguiente:

H₀: El promedio de concentración de Pb, Zn y Cu debido al Tiempo, es igual en todos los casos.

H_a: Existe diferencia significativa entre el promedio de la concentración de Pb, Zn y Cu debido al Tiempo.

iii) **H₀:** $\mu_{ij} - \mu_{i.} - \mu_{.j} + \mu = 0$, contra

H_a: $\mu_{ij} - \mu_{i.} - \mu_{.j} + \mu \neq 0$ para algún i y j.

Donde H₀ y H_a representan lo siguiente:

H₀: El promedio de concentración de Pb, Zn y Cu debido a la Interacción de la solución humectante y el tiempo del suelo es igual para todos.

H_a: Existe diferencias significativas entre el promedio de concentración de Pb, Zn y Cu debido a la Interacción de la solución humectante y el tiempo en el suelo.

4.6.2 Porcentaje de Remoción

Para determinar el porcentaje de remoción en los suelos contaminados por relaves mineros, el laboratorio ALAB (Analytical laboratory E.I.R.L.) realizó la recepción y análisis de las muestras de suelos, con la finalidad de obtener las concentraciones de los metales pesados antes, durante y después del tratamiento electrocinéticos. Después de haber llevado el monitoreo de las

concentraciones, se evaluarán los resultados y se determinará finalmente el grado de remoción de metales pesados.

$$\%Remocion\ de\ Metales\ Pesados = \frac{100(co - cf)}{co}$$

V.RESULTADOS

En las siguientes secciones se presentan los resultados descriptivos de parámetros como concentración y porcentaje de remoción de plomo, zinc y cobre en suelos contaminados, así como parámetros complementarios como pH, conductividad eléctrica (CE) e intensidad de corriente (I) que explican el desplazamiento de los iones desde el suelo hacia los fluidos y viceversa en los sistemas de electrorremediación.

5.1 Resultados Descriptivos

5.1.1 Característica de la Calidad del Suelo de San Mateo de Viso

La composición del suelo contaminado por Pasivos Ambientales Mineros de San Miguel de Viso, demuestran una alta concentración de metales, tal y como se observa en la Tabla 11, característicos de un suelo fuertemente ácido (pH=5,5) y de clase textural franco arenoso (Anexo 3).

Tabla 11

Característica de la calidad del suelo de San Mateo de Viso

Parámetros de Calidad	Unidad	Resultados
Aluminio	mg/kg MS	10 554,95
Antimonio	mg/kg MS	4,25
Arsénico	mg/kg MS	44,90
Bario	mg/kg MS	103,04
Berilio	mg/kg MS	0,66
Bismuto	mg/kg MS	<0,20
Boro	mg/kg MS	4,06

Parámetros de Calidad	Unidad	Resultados
Cadmio	mg/kg MS	5,466
Calcio	mg/kg MS	3 432,8
Cerio	mg/kg MS	30,10
Cobalto	mg/kg MS	6,71
Cobre	mg/kg MS	177,481
Cromo	mg/kg MS	9,98
Estaño	mg/kg MS	0,94
Estroncio	mg/kg MS	75,18
Fosforo	mg/kg MS	1 341,54
Hierro	mg/kg MS	35 058,91
Litio	mg/kg MS	8,754
Magnesio	mg/kg MS	4 734,90
Manganeso	mg/kg MS	454,61
Mercurio	mg/kg MS	<0,04
Molibdeno	mg/kg MS	7,61
Níquel	mg/kg MS	5,97
Zinc	mg/kg MS	339,37
Plomo	mg/kg MS	163,94

Nota. MS: masa de suelo

En la tabla anterior se puede observar altas concentraciones de Pb, Zn y Cu, por lo que en la Tabla 12 se comparan estos valores con los límites establecidos en las regulaciones pertinentes para la conservación de suelos; en dicha tabla se demuestra que las concentraciones de estos metales se

encuentran por encima de los límites permitidos.

Tabla 12

Concentración de inicial de Cu, Pb y Zn vs estándares de calidad

Metal	Concentración Inicial (mg.kg ⁻¹)	ECA-Suelo uso	Norma de referencia: Guía
		Agrícola ^a (mg.kg ⁻¹)	Canadiense de calidad de suelos ^b (mg.kg ⁻¹)
Pb	163,94	70	-
Zn	339,37	-	200
Cu	177,48	-	63

Nota. a= ECA para suelo, (DS N° 011-2017); b= (Consejo Canadiense del Medio Ambiente, 2007, pp-1-2)

5.1.2 Remoción de Pb, Zn, Cu en suelos contaminados en cada tratamiento

La remoción de plomo, zinc y cobre en suelo contaminados por pasivos ambientales mineros, se determinó mediante el indicador “porcentaje de remoción”, para este cálculo se consideró la concentración inicial y la concentración final de estos metales después de la aplicación de los sistemas de electrorremediación en el suelo, asimismo las concentraciones finales y porcentajes de remoción se compararon con los estándar de calidad de suelo y los porcentajes de remoción teórico (en función de los estándares de calidad de suelo para cada metal) respectivamente, tal y como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13

Remoción de Pb, Zn y Cu en cada tratamiento vs estándares de calidad

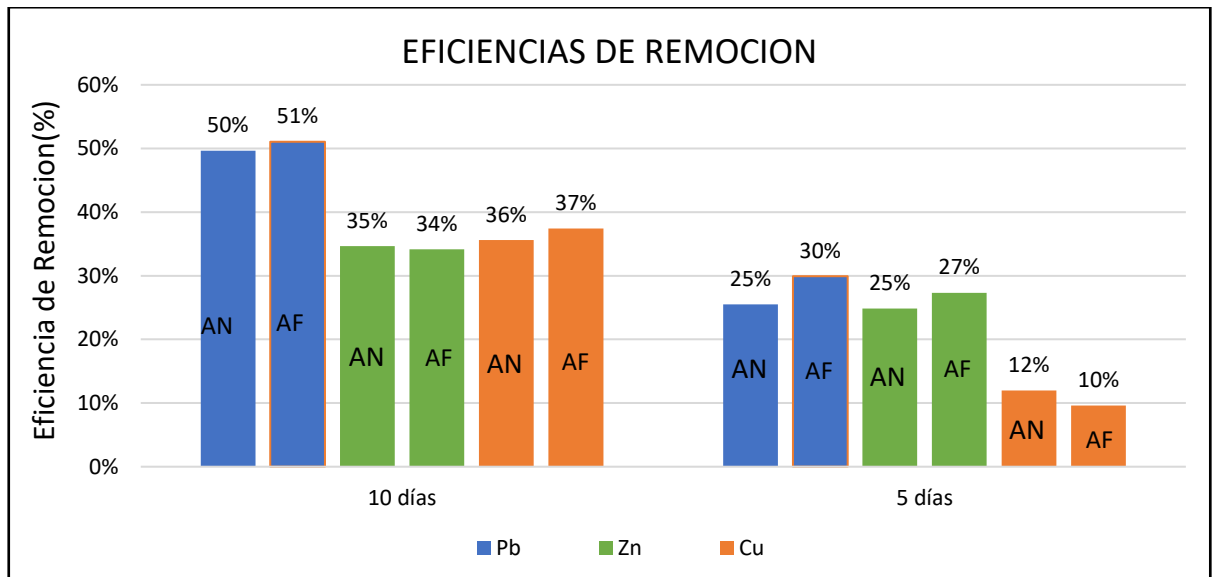
Tiempo	SH	Plomo					Zinc					Cobre				
		Ci (mg/kg)	Cf (mg/kg)	ECA (mg/kg)	% R	% R Teo	Ci (mg/kg)	Cf (mg/kg)	NR (mg/kg)	% R	% R Teo	Ci (mg/kg)	Cf (mg/kg)	ECA (mg/kg)	% R	% R Teo
5 días	AN		122,14 (5,5)		25,49%		254,99 (80,55)		24,86%			156,25 (21,33)		11,96%		
	AF		114,84 (13,48)		29,95%		246,64 (44,82)		27,32%			160,4 (17,02)		9,62%		
		163,94		70	57,3%	339,37		200	41%		177,48		63	64,5%		
10 días	AN		82,58 (43,22)		49,63%		221,80 (102,1)		34,64%			114,32 (63,62)		35,59%		
	AF		80,24 (41,75)		51,05%		223,51 (121,31)		34,14%			111,10 (63,42)		37,40%		

Nota. SH (solución humectante), AN (ácido nítrico), AF (ácido fosfórico), Ci (concentración inicial), Cf (concentración final), ECA (Estándares de calidad de suelo), NR (norma de referencia, guías canadienses de calidad de suelos), %R (% de remoción), %R Teo (porcentaje de remoción teórico, calculado a partir de los límites de calidad para suelos).

Según cuadro anterior, en la Figura 13, se presentan gráficamente los porcentajes de remoción en función a la solución humectante añadida al suelo contaminado y al tiempo de tratamiento.

Figura 13

Comparación de los porcentajes de remoción en cada tratamiento

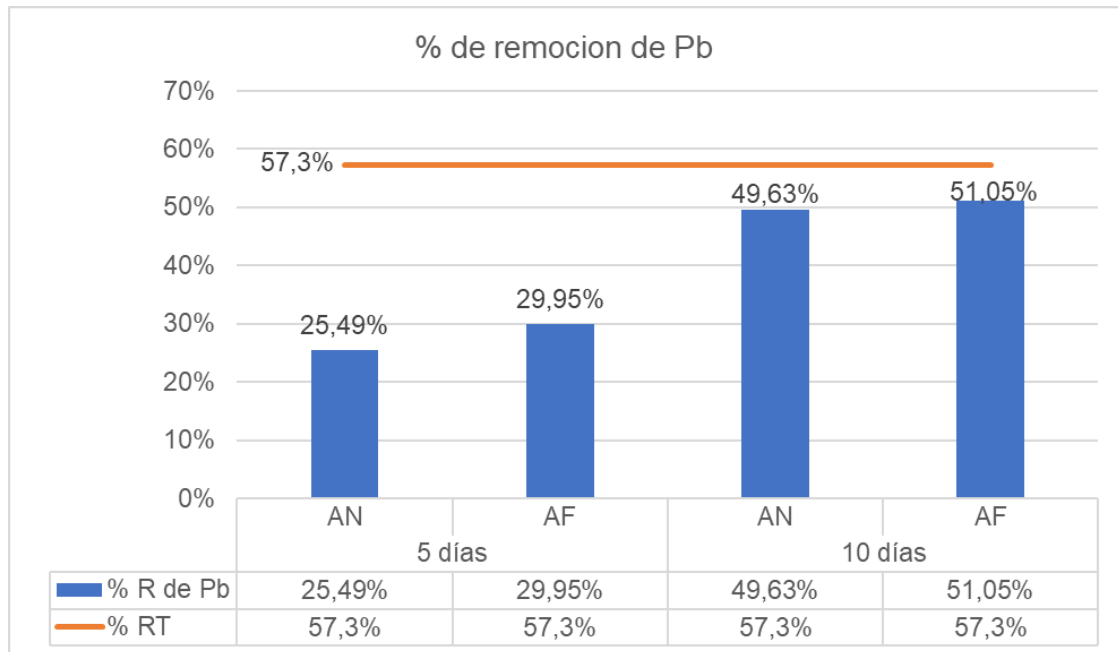


Nota. AN (ácido nítrico), AF (ácido fosfórico)

Asimismo, en la Figura 14 se presentan los porcentajes de remoción de plomo en suelo en cada tratamiento, y se comparan con el porcentaje teórico derivado, que representa el porcentaje mínimo que debe lograrse para cumplir con la concentración establecido en el ECA suelos para este metal. En la figura se puede observar que los mayores porcentajes de remoción de plomo se obtuvieron en los sistemas de electroremediación con un periodo de tratamiento de 10 días, a pesar de ello ningún tratamiento logro el porcentaje teórico requerido, por lo que podría inferirse que los tratamientos son poco eficientes para lograr el objetivo que dispone la normativa.

Figura 14

Remoción de plomo

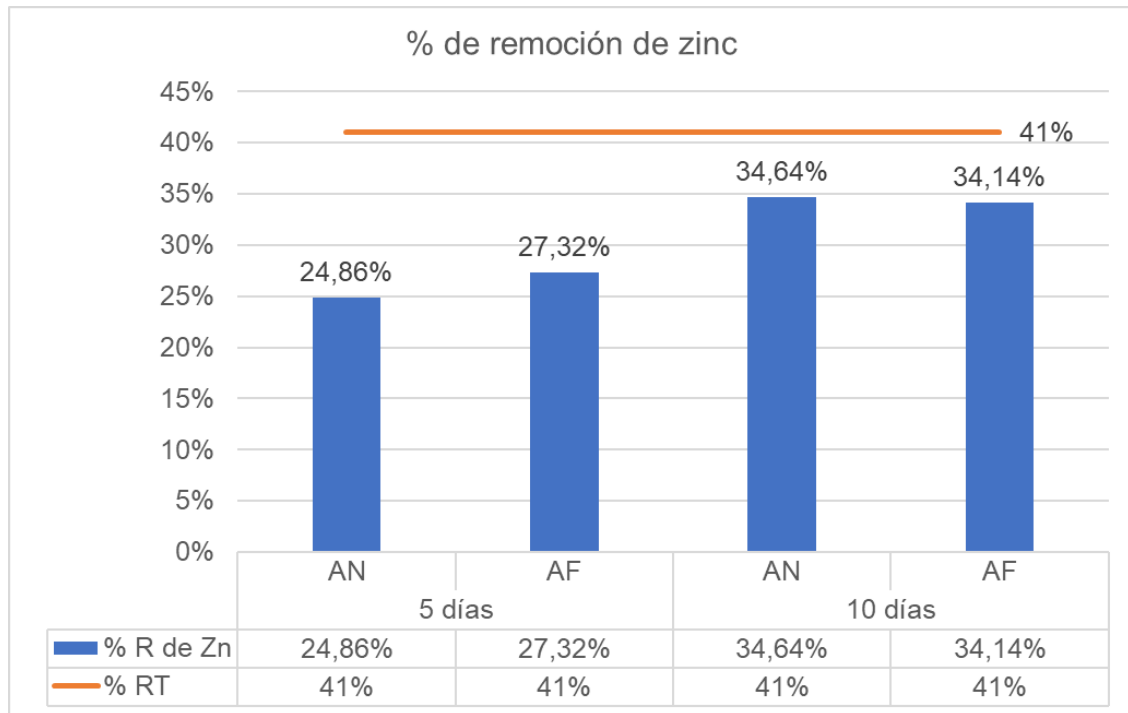


Nota. %R de Pb (% de remoción de plomo), % RT (porcentaje de remoción teórico), AN (ácido nítrico), AF (ácido fosfórico)

Por otro lado, en cuanto a la remoción de zinc en cada tratamiento, en la Figura 15 se puede observar que los sistemas de electroremediación con un periodo de duración de 10 días fueron los que reportaron mayores porcentajes de remoción; sin embargo estos tratamientos no lograron alcanzar los porcentajes de remoción teóricos que garantizan obtener concentraciones finales de 200 mg/kg tal y como lo establece la norma de referencia “guías canadienses de calidad de suelo” (Consejo Canadiense del Medio Ambiente, 2007, pp-1-2).

Figura 15

Remoción de zinc

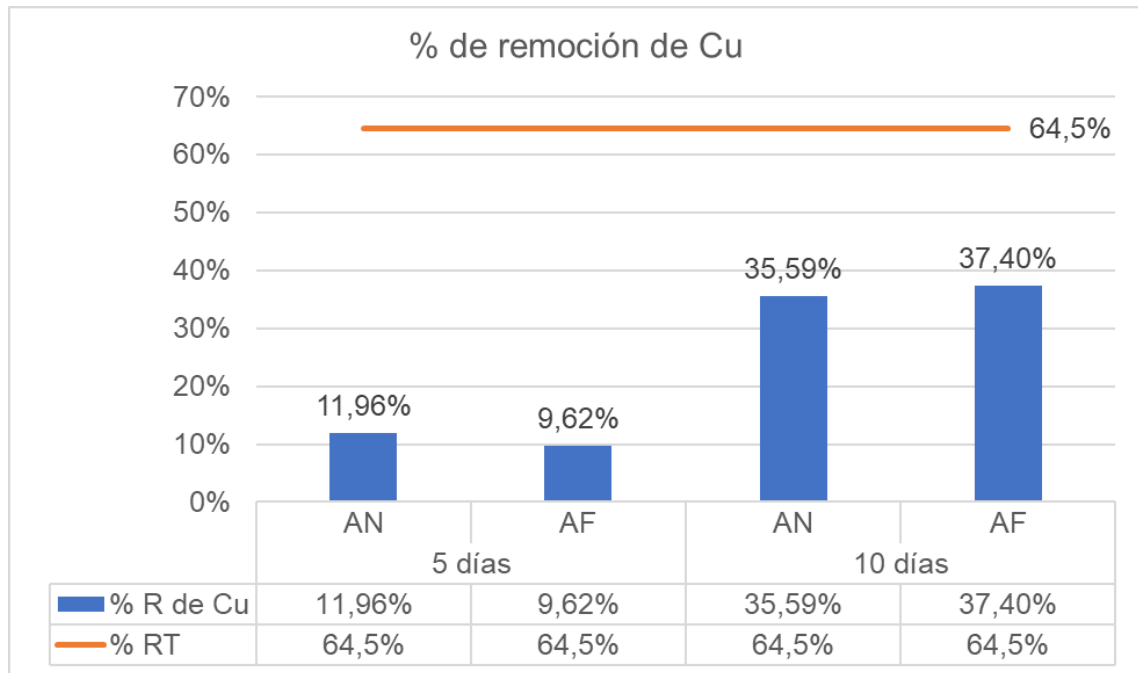


Nota. %R de Zn (% de remoción de zinc), % RT (porcentaje de remoción teórico), AN (ácido nítrico), AF (ácido fosfórico)

Finalmente, en la Figura 16 se presentan los datos de remoción de cobre en cada tratamiento, donde se observa que las remociones más altas pertenecen a los sistemas de electroremediación de suelos con un periodo de tratamiento de 10 días, asimismo se muestra gráficamente que ninguno de estos porcentajes de remoción alcanzan el porcentaje de remoción mínimo requerido para que el suelo contaminado obtenga concentraciones de cobre dentro de lo establecido en los estándares de calidad de suelo, específicamente para uso agrícola.

Figura 16

Remoción de cobre



Nota. %R de Cu (% de remoción de cobre) % RT (porcentaje de remoción teórico), AN (ácido nítrico), AF (ácido fosfórico)

5.1.3 Variación de PH, CE e Intensidad de los fluidos

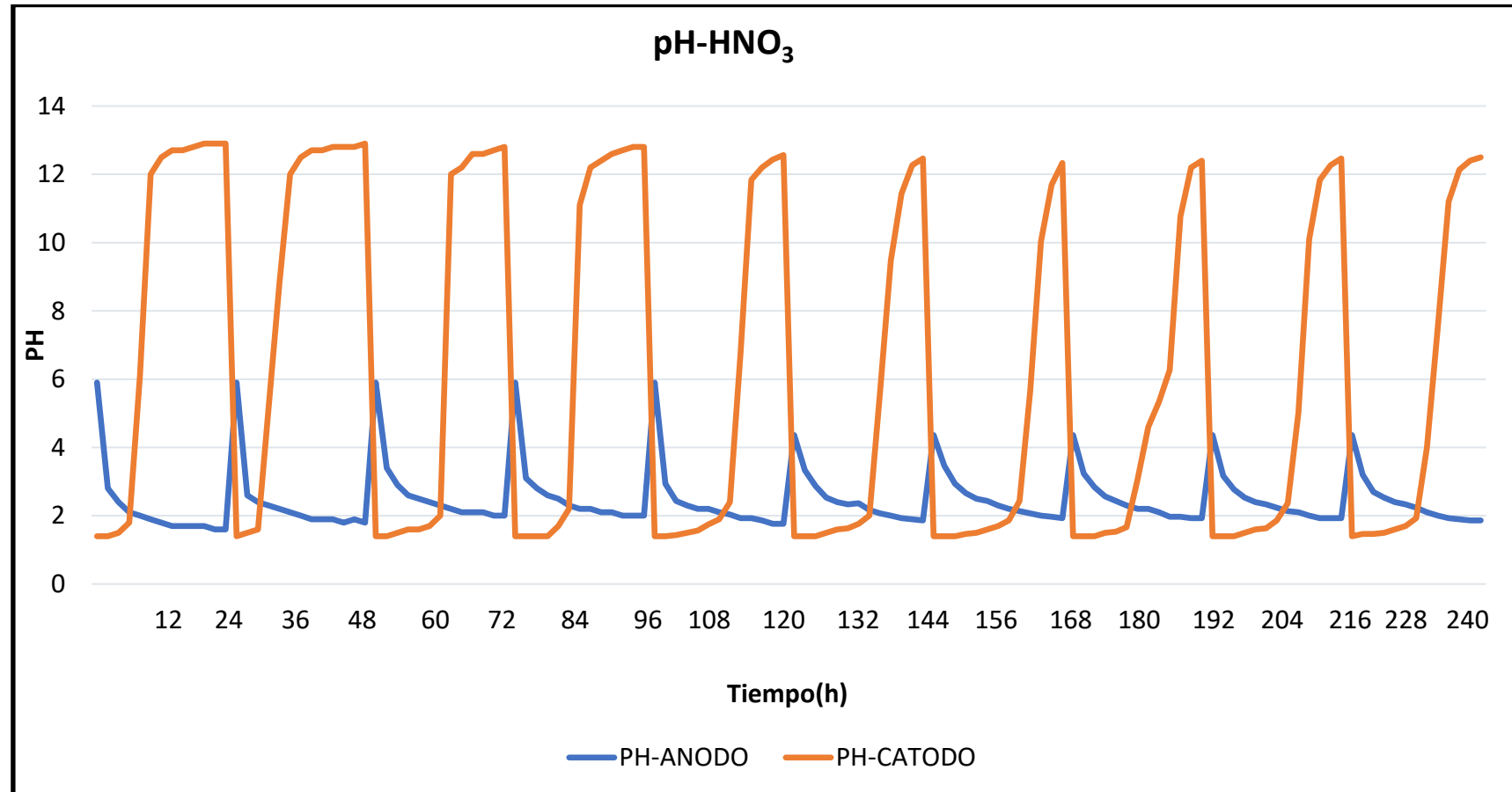
5.1.3.1. Tratamiento de 10 días. Se observa en la Figura 17 y 18 que el pH del fluido del compartimiento anódico en los ensayos SE-1 (sistema electroquímico con suelo humectado con ácido nítrico 0,1M) y SE-2 (sistema electroquímico con suelo humectado con ácido fosfórico 0,1M), descendió gradualmente desde 5,9 hasta 2,0 después de 8h, posterior a ello se mantuvo alrededor de 2,0 hasta las 24h, tiempo previsto para actualizar dicho fluido. Este comportamiento fue semejante durante los 10 días de tratamiento.

Asimismo se observa que, en el compartimiento catódico, el pH incrementó su valor desde 1,4 hasta 12,7 durante las primeras 16h de

tratamiento para el SE-1, y en la prueba SE-2 el pH incrementó de 1,4 hasta 11,2 a las 94h de tratamiento, luego de esto se mantuvo un incremento de pH de 1,4 hasta alrededor de 12,0 en los siguiente días de tratamiento tanto para SE-1 y SE-2, con estos resultados se demostró que existe una tendencia a generar condiciones muy ácidas en el comportamiento anódico y condiciones alcalinas en el compartimiento catódico, producto de la electrolisis de agua.

Figura 17

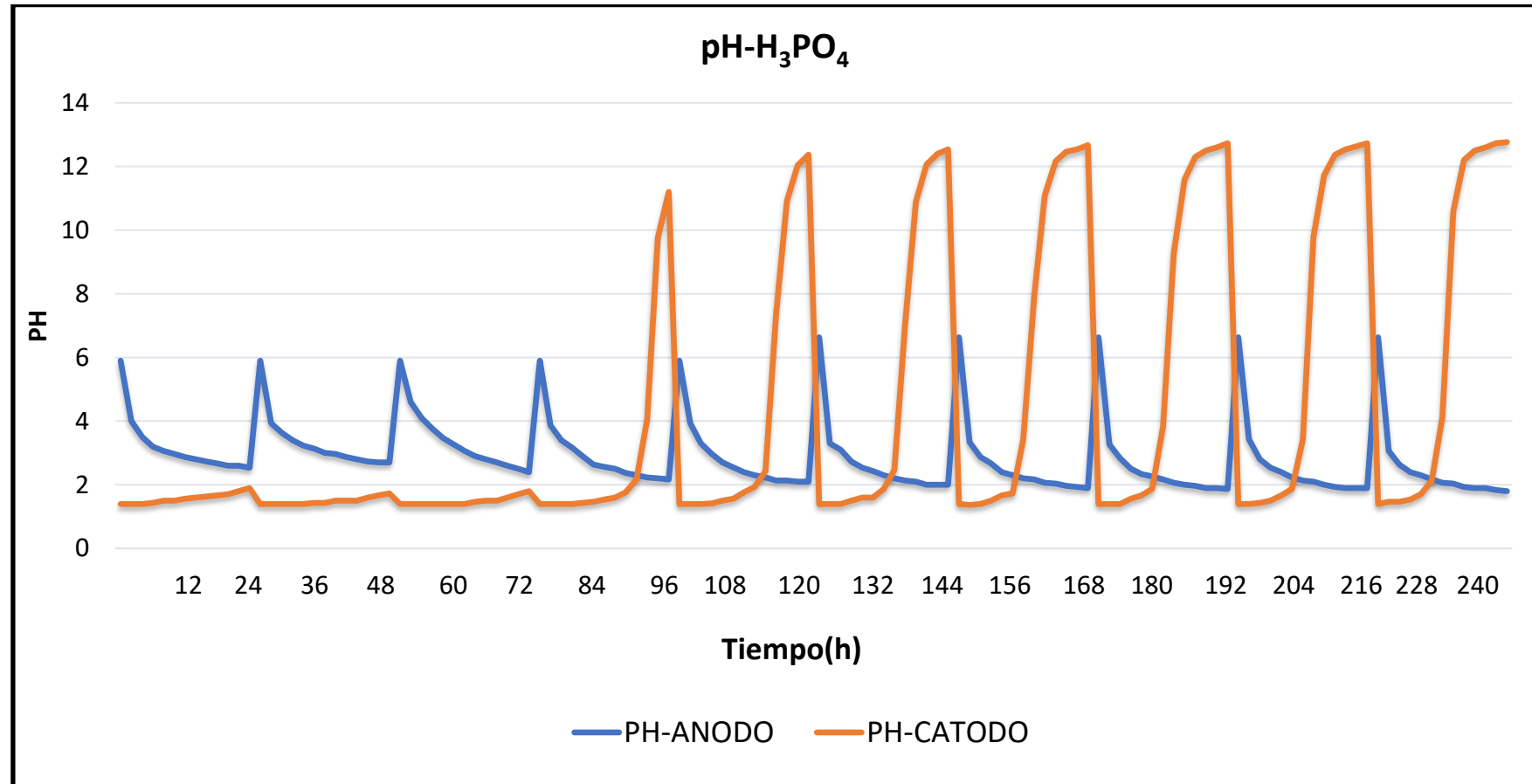
pH del fluido anódico y catódico en el SE-1 durante 10 días de tratamiento



Nota. SE-1= sistema electroquímico con suelo humectado con ácido nítrico 0,1M

Figura 18

pH del fluido anódico y catódico en el SE-2 durante 10 días de tratamiento



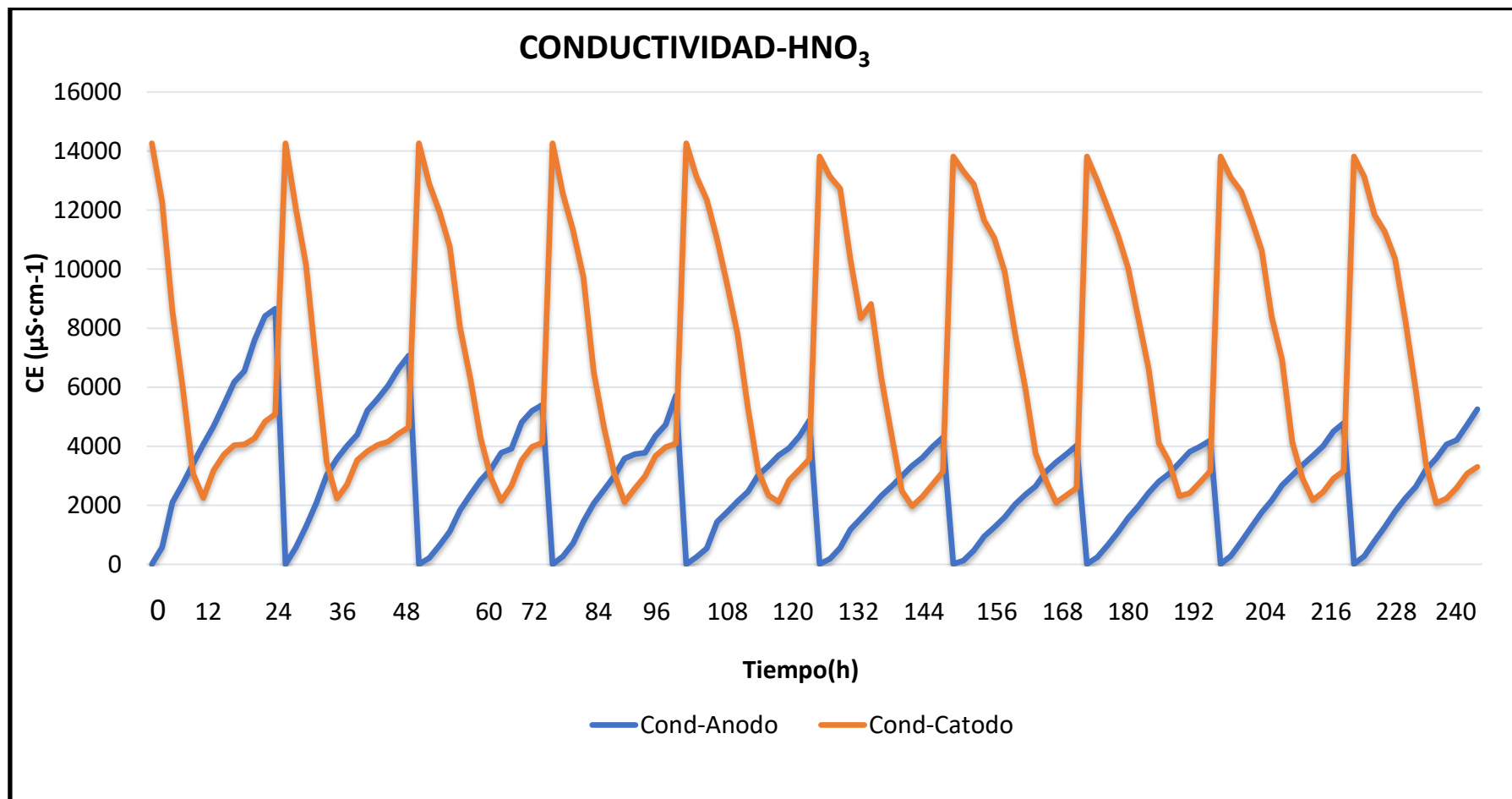
Nota. SE-2= sistema electroquímico con suelo humectado con ácido fosfórico 0,1M

Por otra parte, la Figura 19 y Figura 20 muestra que la CE del fluido anódico agua destilada ascendió gradualmente durante las primeras 24 h de 0 a $8602 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (EC-1) y de 0 a $1084 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (EC-2) respectivamente, luego descendió a 0 por la actualización del fluido. Este ciclo se repitió cada 24 h, de manera que los resultados posteriores son similares.

Se observa también que en la Figura 19 y Figura 20 que la CE del fluido catódico ácido nítrico, disminuyó desde 14264 a $4902 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ durante las primeras 24 h (EC-1); caso análogo sucedió en la prueba EC-2, donde la CE se redujo de 14264 a $6020 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ durante las 24 h, después de ello, la CE en ambos Experimentos fluctuaron en torno a $4278 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, ciclo que se repitió cada 24 h. De estos resultados se puede inferir que la CE del fluido anódico se incrementó posiblemente por la migración de iones desde el suelo y por los iones H^+ electrogenerados, mientras que la CE del fluido catódico disminuye potencialmente por el desplazamiento de los OH^- electrogenerados y por la precipitación de los cationes metálicos que llegan a él.

Figura 19

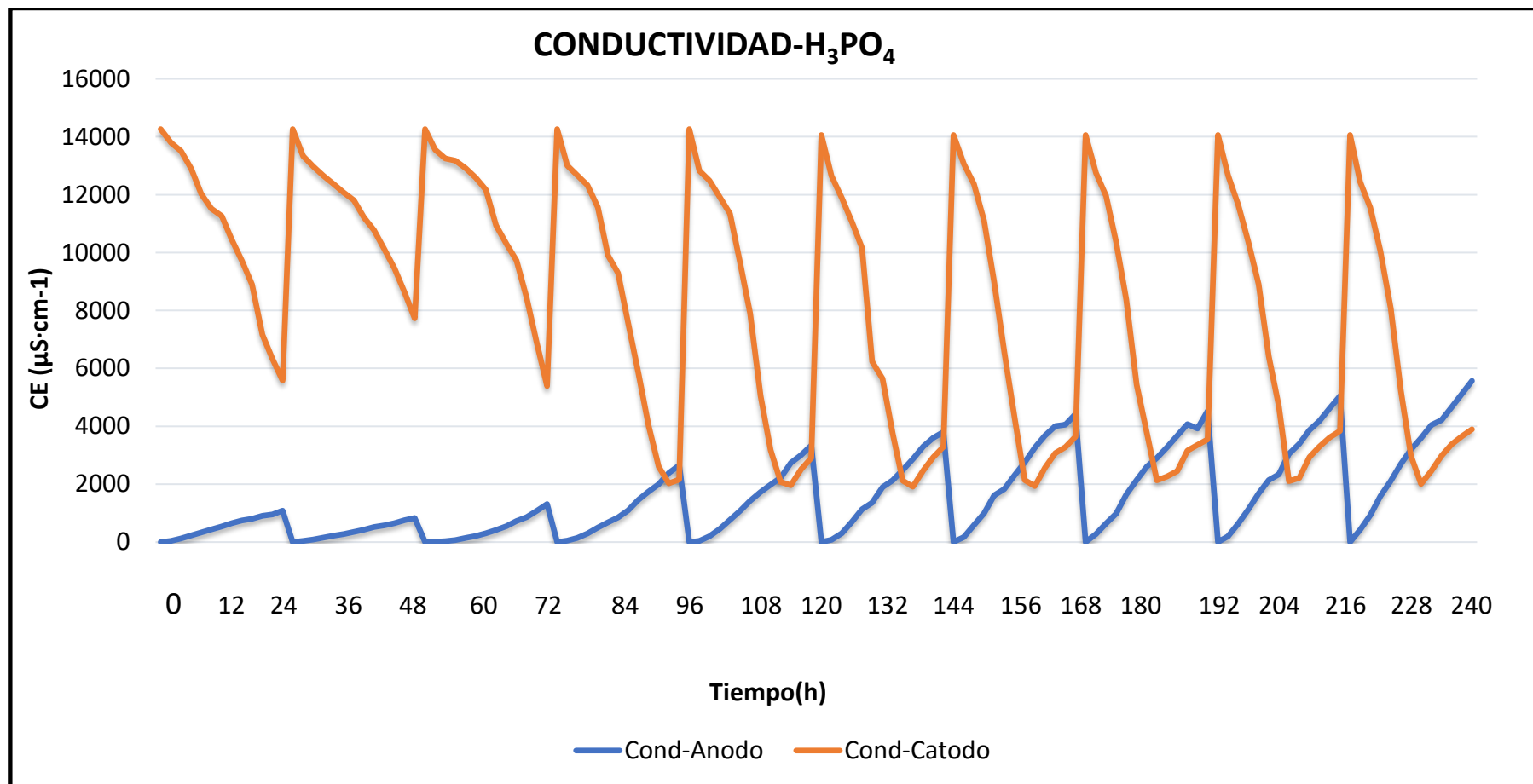
Conductividad eléctrica (CE) del fluido del compartimiento anódico y catódico del SE-1 durante 10 días de tratamiento



Nota. SE-1= sistema electroquímico con suelo humectado con ácido nítrico 0,1 M

Figura 20

Conductividad eléctrica (CE) del fluido del compartimiento anódico y catódico del SE-2 durante 10 días de tratamiento



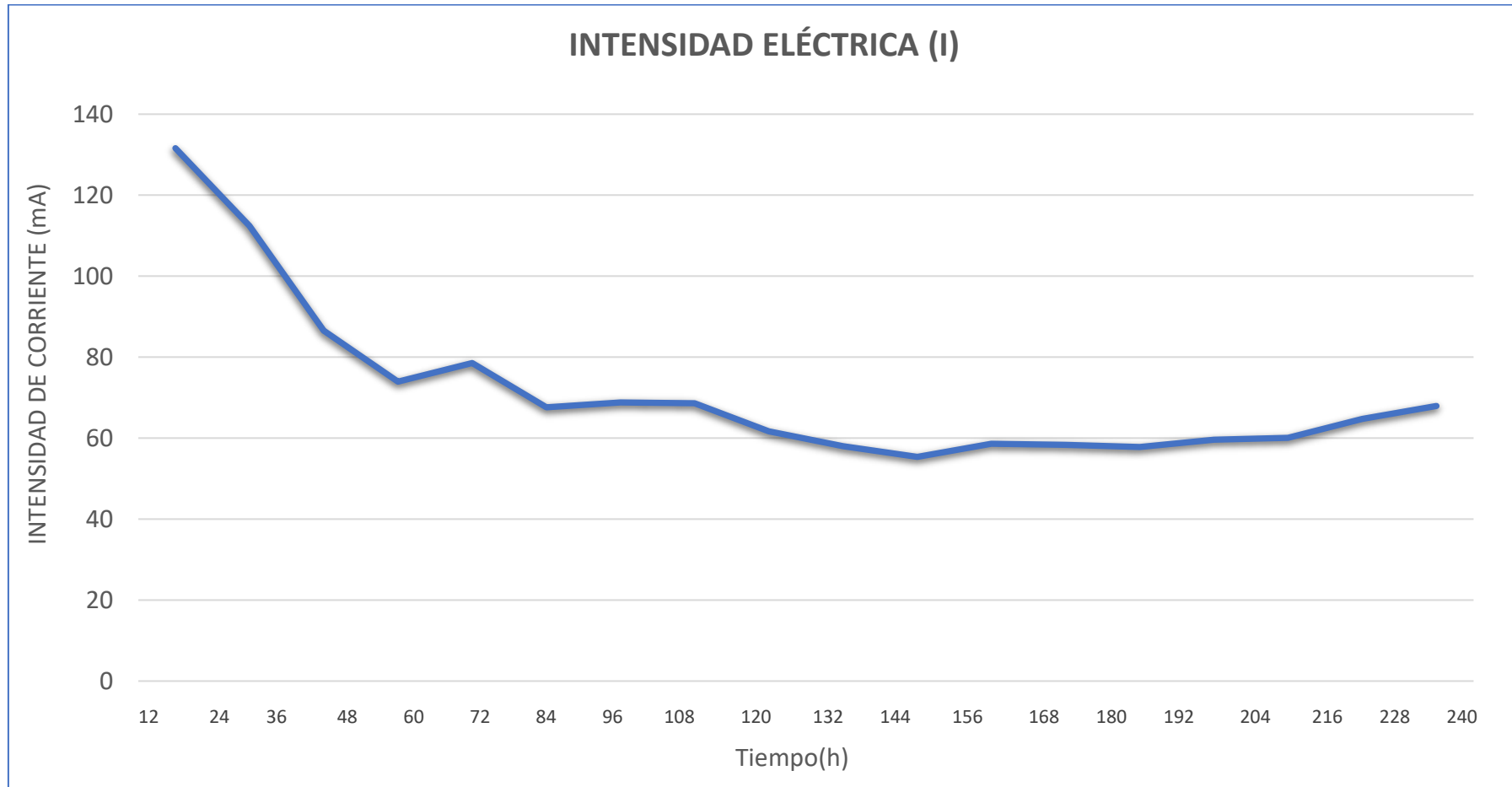
Nota. SE-2= sistema electroquímico con suelo humectado con ácido fosfórico 0,1 M

Variación de Intensidad corriente

La intensidad de corriente varió durante los ensayos electroquímicos tal como se muestra en la Figura 21. Observándose que una vez agregado el electrolito este aumenta rápidamente de 0 a 136 mA; durante las primeras 12 h tanto para el EC-1; alcanzando un ligero descenso de 72 mA a las 85 h, para posteriormente fluctuar alrededor de 65 mA. En la Figura 22. La prueba EC-2 alcanzo rápidamente un pico moderado de 53 mA a las 90 h, luego aumento alrededor de los 80 mA a los 10 días de tratamiento. Estos datos permitieron interpretar que en la prueba EC-2 fue más intensa la migración de iones durante las últimas horas, a comparación de las primeras horas que tuvo poca intensidad, probablemente por el agotamiento de los iones en el suelo. El ensayo EC-1 por su parte mostro un flujo aproximadamente constante en el tiempo, posiblemente por la reducida disponibilidad de iones.

Figura 21

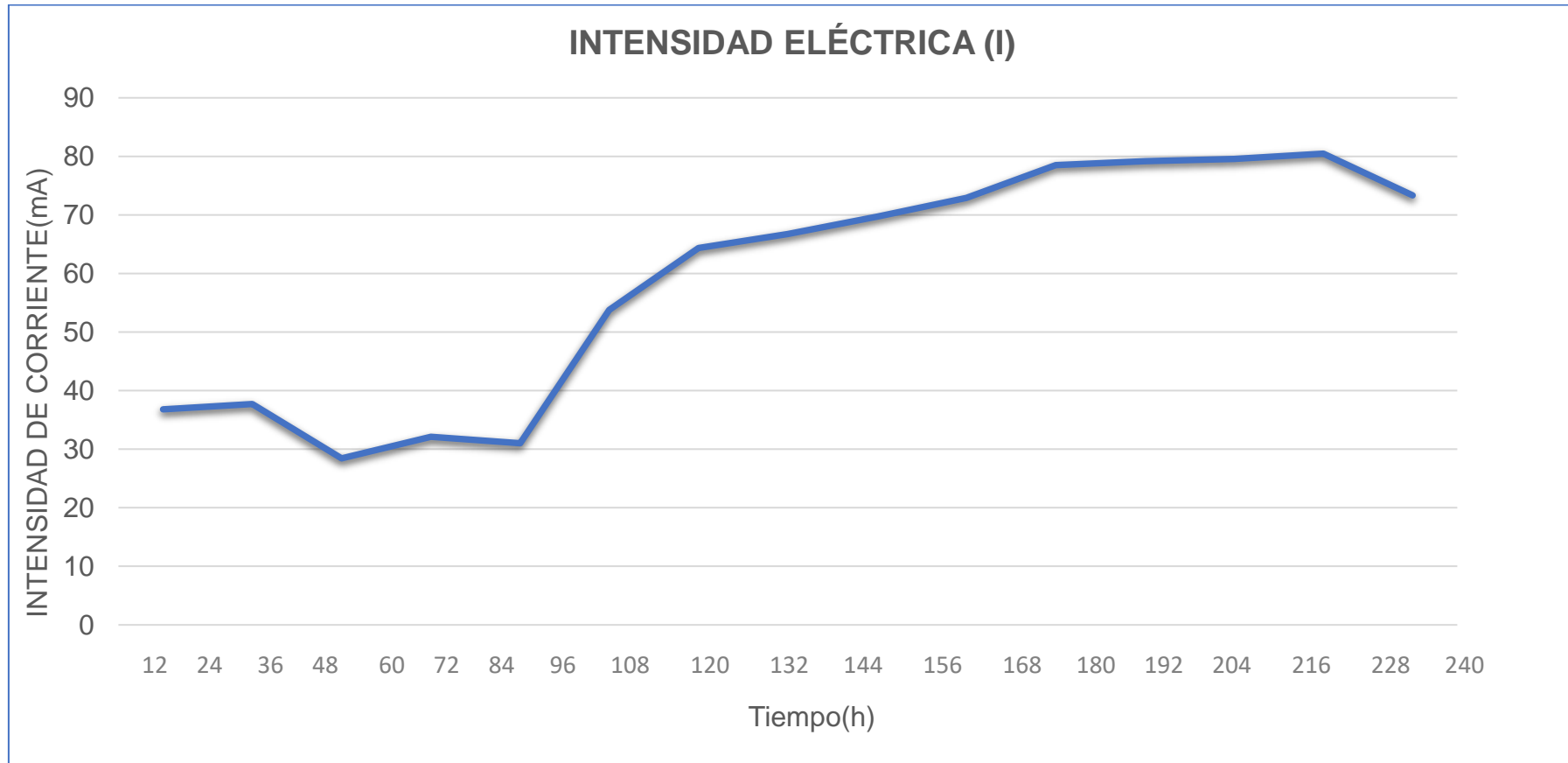
Variación de la corriente eléctrica en el SE -1 durante 10 días de tratamiento



Nota. SE-1= sistema electroquímico con suelo humectado con ácido nítrico 0,1 M

Figura 22

Variación de la corriente eléctrica en el SE-2 durante 10 días de tratamiento



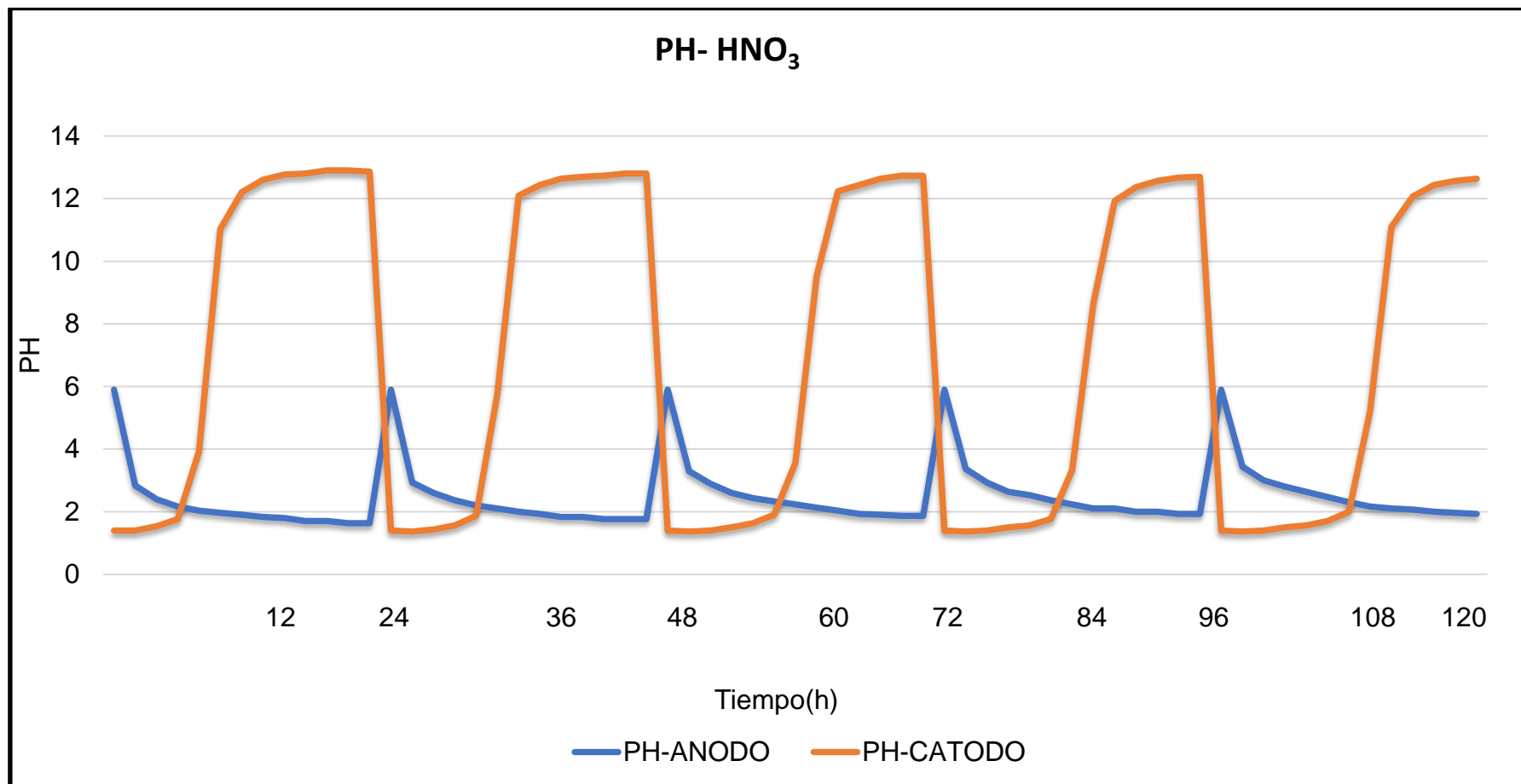
Nota. SE-2= sistema electroquímico con suelo humectado con ácido fosfórico 0,1M

5.1.3.2 Tratamiento de 5 días. Se observa en la Figura 23 y 24 que el pH del agua destilada, fluido anódico en los ensayos EC-1(suelo humectado con ácido nítrico 0,1 M) y EC-2 (suelo humectado con ácido fosfórico 0,1 M), descendió gradualmente desde 5.9 hasta 2.0 después de 8 h, posterior a ello se sostuvo alrededor de 2,0 hasta las 24 h, tiempo previsto para actualizar dicho fluido. Este último proceso se repitió hasta completar los 5 días de tratamiento, obteniendo resultados semejantes.

Por el contrario, el pH del fluido catódico ácido nítrico se incrementó desde 1,4 hasta 12,7 durante las primeras 16 h para el EC-1, y 1.4 hasta 10.7 a las 22 h en la prueba EC-2, reaccionando el cuarto día de tratamiento, luego del cual, ambos ensayos mantuvieron su pH alrededor de 12,0, con estos resultados se demostró que existe una tendencia a generar condiciones muy acidas en el comportamiento anódico y condiciones alcalinas en el compartimiento catódico, producto de la electrolisis de agua.

Figura 23

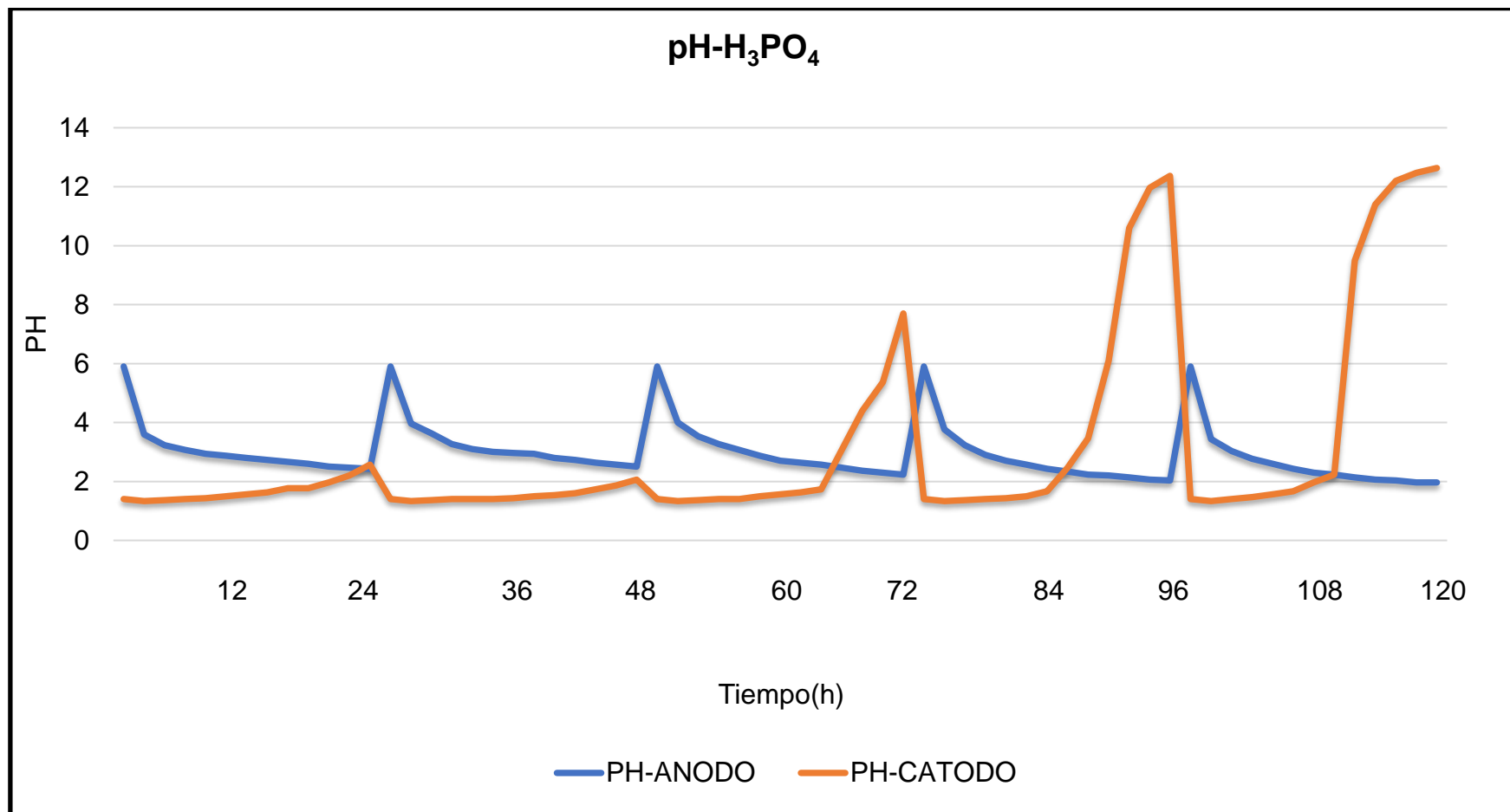
pH del fluido anódico y catódico en el SE-1 durante 05 días de tratamiento



Nota. SE-1= sistema electroquímico con suelo humectado con ácido nítrico 0,1 M

Figura 24

pH del fluido anódico y catódico en el SE-2 durante 05 días de tratamiento



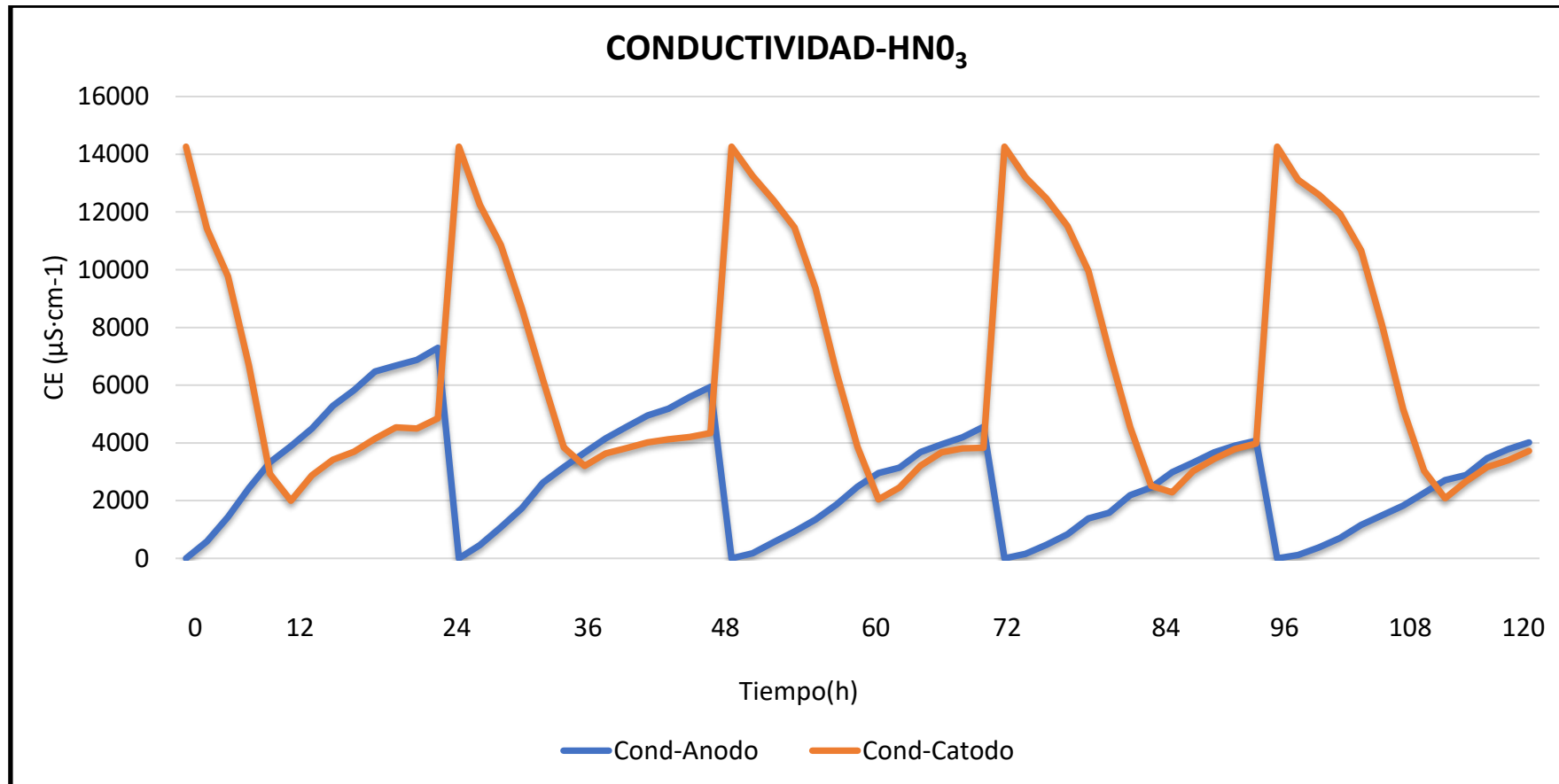
Nota. SE-2= sistema electroquímico con suelo humectado con ácido fosfórico 0,1 M

Por otra parte, la Figura 25 y Figura 26 muestra que la CE del fluido anódico agua destilada ascendió gradualmente durante las primeras 24 h de 0 a $7295 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (EC-1) y de 0 a $1361 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (EC-2), luego descendió a 0 por la actualización del fluido. Este ciclo se repitió cada 24 h, de manera que los resultados posteriores son similares.

Se observa en la Figura 25 y Figura 26 que la CE del fluido catódico, ácido nítrico, disminuyó desde 14264 a $4850 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ durante las primeras 24 h (EC-1); caso análogo sucedió en la prueba EC-2, donde la CE se redujo de 14264 a $3300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ durante las 24 h, después de ello, la CE en ambos experimentos fluctuaron en torno a $3702 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, ciclo que se repitió cada 24 h. De estos resultados se puede inferir que la CE del fluido anódico se incrementó posiblemente por la migración de iones desde el suelo y por los iones H^+ electrogenerados, mientras que la CE del fluido catódico disminuye potencialmente por el desplazamiento de los OH^- electrogenerados y por la precipitación de los cationes metálicos que llegan a él.

Figura 25

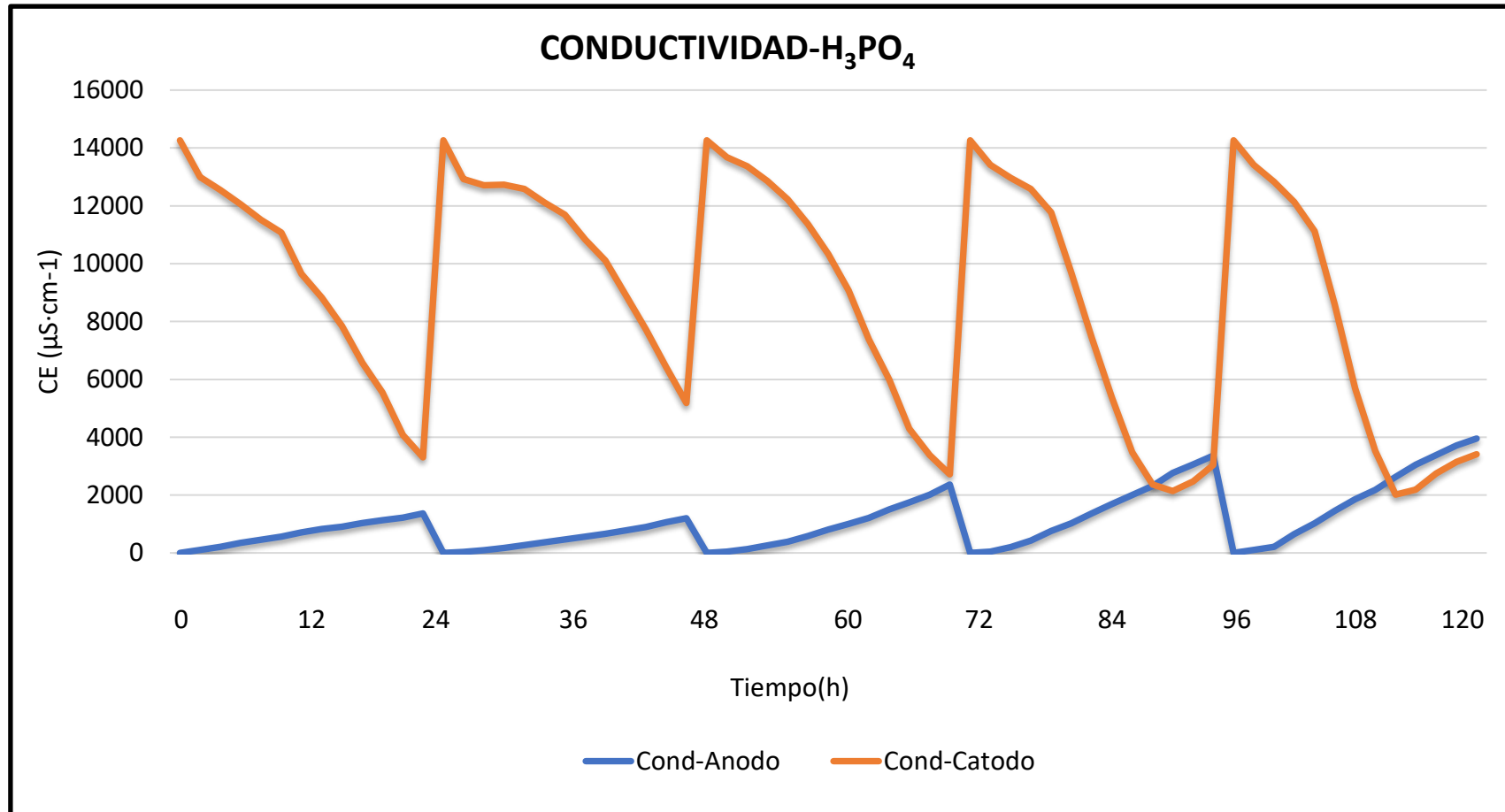
Conductividad eléctrica (CE) del fluido del compartimiento anódico y catódico del SE-1 durante 05 días de tratamiento



Nota. SE-1= sistema electroquímico con suelo humectado con ácido nítrico 0,1M

Figura 26

Conductividad eléctrica (CE) del fluido del compartimiento anódico y catódico del SE-2 durante 05 días de tratamiento



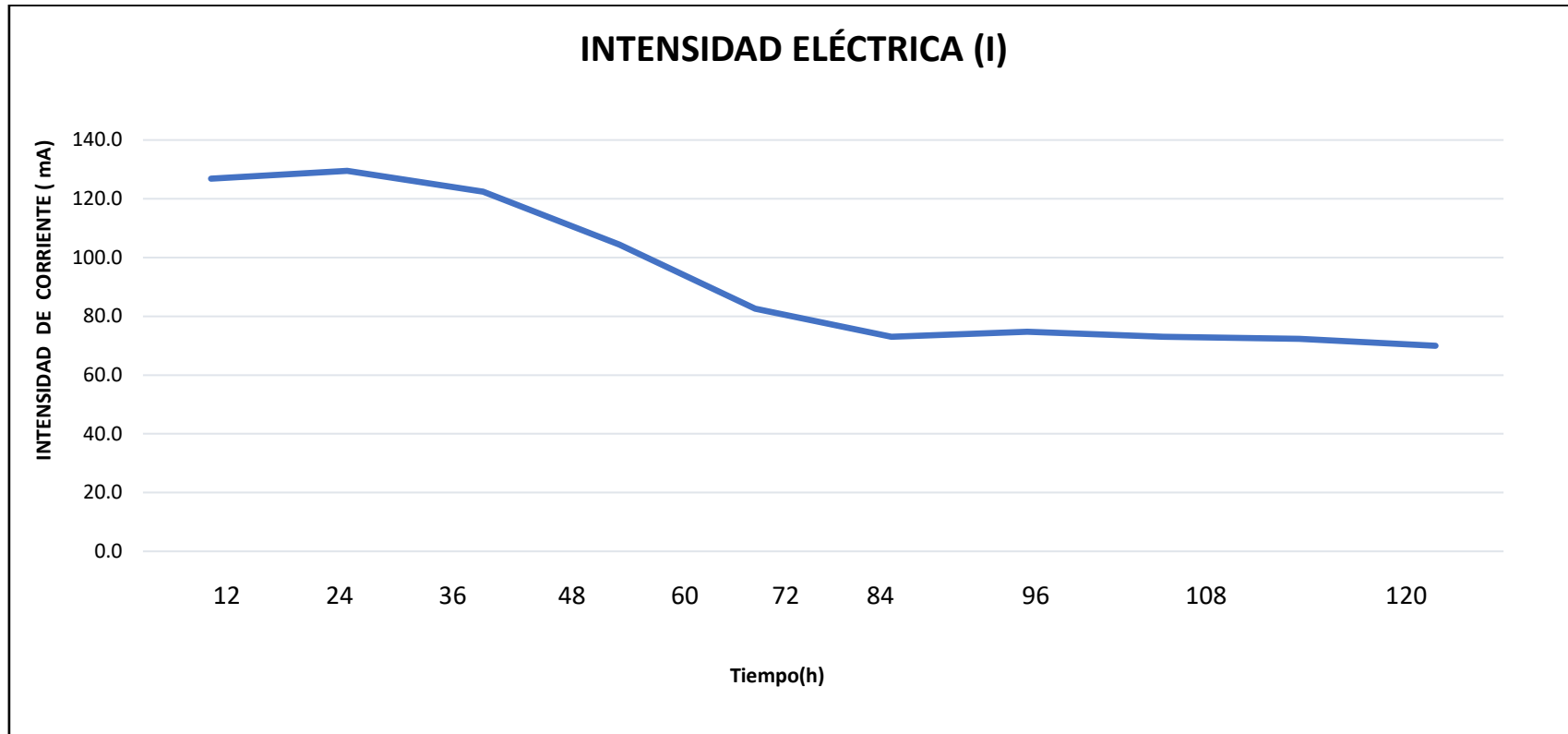
Nota. SE-2= sistema electroquímico con suelo humectado con ácido fosfórico 0,1 M

Variación de intensidad de corriente

La intensidad de corriente varió durante los ensayos electroquímicos como se muestra en la Figura 27. Observándose que una vez agregado el electrolito en la prueba EC-1, este aumenta rápidamente de 0 a 127 mA; durante las primeras 12 h para EC-1; alcanzando un ligero descenso de 73 mA a las 85 h, para posteriormente fluctuar alrededor de 71 mA. En la Figura 28. La prueba EC-2 alcanzo rápidamente un pico moderado de 63 mA a las 85 h, luego aumento alrededor de los 75 mA y completar los 5 días de tratamiento. Estos datos permitieron interpretar que en la prueba EC-2 fue más intensa la migración de iones durante las últimas horas, a comparación de las primeras horas que tuvo poca intensidad, probablemente por el poca presencia de iones en el suelo. El ensayo EC-1 por su parte mostro un flujo aproximadamente constante en el tiempo, a partir de las 78 h. pudiendo apreciar que hubo más intensidad las primeras horas, y una reducción de intensidad en las últimas horas posiblemente por la reducida disponibilidad de iones.

Figura 27

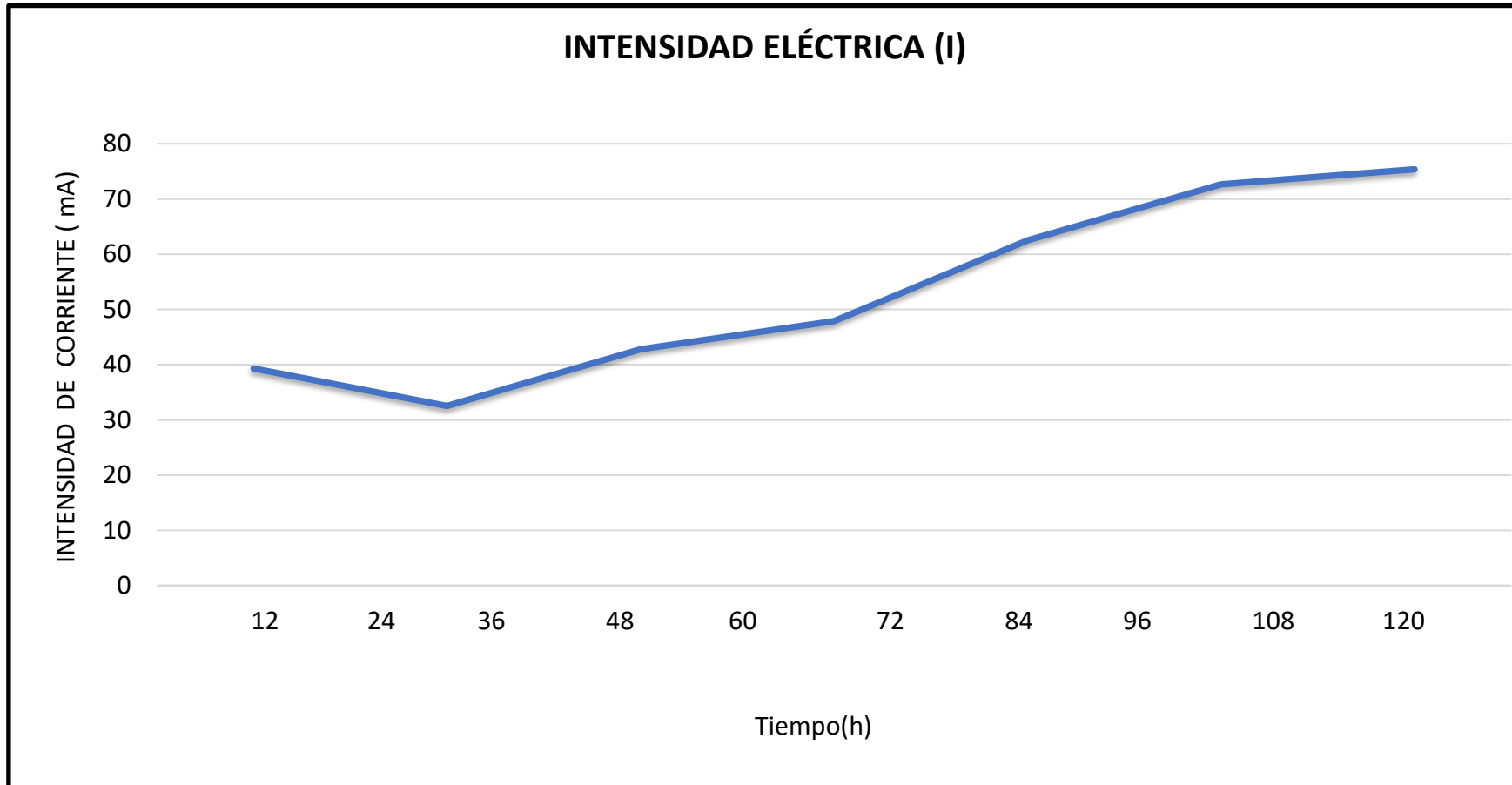
Variación de la corriente eléctrica en el SE -1 durante 05 días de tratamiento



Nota. SE-1= sistema electroquímico con suelo humectado con ácido nítrico 0,1 M

Figura 28

Variación de la corriente eléctrica en el SE-2 durante 05 días de tratamiento



Nota. SE-2= sistema electroquímico con suelo humectado con ácido fosfórico 0,1 M

5.2 Resultados inferenciales

Para el análisis inferencial, en primer lugar, se pusieron a prueba los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk, válido para muestras menores a 50 datos) y homogeneidad de varianza (prueba de Levene) de los datos. Validados estos supuestos se realizaron pruebas paramétricas de lo contrario se optó por pruebas no paramétricas, tal y como se puede observar en la Tabla 14. Cabe resaltar que estas pruebas permiten la contrastación de hipótesis en el capítulo siguiente.

En la Tabla 14, se puede observar que, tanto para el plomo como para el zinc, todos los datos de remoción de cada grupo formado la combinación del tipo de solución humectante y el tiempo tiene distribución normal, pues poseen p - valores mayores al nivel de significancia 0,05 (5%), sin embargo solo poseen homogeneidad de varianza entre grupos los datos de remoción de zinc; por lo que a para determinar diferencias de remoción de este metal entre grupos independientes se hizo uso de la prueba paramétrica ANOVA Inter sujetos. En cuanto a los datos de remoción de plomo, al no cumplirse uno de los supuestos se hizo uso del análisis no paramétrico Kruskal-Wallis y U de Mann-Whitney.

Por otro lado, los datos de remoción de cobre en los grupos conformados por ácido fosfórico a 5 días y ácido fosfórico a 10 días no poseen distribución normal, por lo que no podrían buscarse diferencias entre grupos utilizando un análisis paramétrico, a cambio de ello usamos el análisis no paramétrico Kruskal-Wallis y U de Mann-Whitney para la comparar grupos de dos en dos.

Tabla 14*Análisis de supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza*

Metales	Solución Humectante	Shapiro-Wilk			Homogeneidad de varianza		Cumplimiento de supuestos
		Estadístico	gl	p - valor	Estadístico de Levene	p - valor	
[Pb] Plomo	Ácido nítrico a 5 días	0,981	3	0,735	5,490	0,024	NO
	Ácido nítrico a 10 días	0,869	3	0,293			
	Ácido fosfórico a 5 días	0,954	3	0,587			
	Ácido fosfórico a 10 días	0,802	3	0,119			
[Zn] Zinc	Ácido nítrico a 5 días	0,890	3	0,355	1,501	0,287	SI
	Ácido nítrico a 10 días	0,970	3	0,670			
	Ácido fosfórico a 5 días	0,995	3	0,859			
	Ácido fosfórico a 10 días	0,808	3	0,134			
[Cu] Cobre	Ácido nítrico a 5 días	0,882	3	0,331	4,737	0,035	NO
	Ácido nítrico a 10 días	0,764	3	0,32			
	Ácido fosfórico a 5 días	0,750	3	0,01			
	Ácido fosfórico a 10 días	0,769	3	0,042			

Nota. Fuente, SPSS; gl=grado de libertad, nivel de significancia $\alpha=0,05$

5.2.1 Análisis no paramétrico para la remoción de plomo

Con el fin de buscar diferencias de remoción de plomo entre todos los grupos formados por la combinación de todos los niveles o categorías de cada factor, se utilizó la prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis, en la Tabla 15, se pueden observar los resultados de esta prueba, donde se obtiene un p valor mayor a 0,05 (5%), por lo que se concluye que no existe diferencias de remoción de este metal entre los diferentes grupos conformados.

Tabla 15

Prueba de Kruskal-Wallis para la remoción de Pb

Hipótesis Nula	Prueba	p - valor	Decisión
La distribución de la remoción de plomo es la misma entre las categorías de combinación de todos los factores	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	0,099	Retener la Hipótesis nula

Nota. Fuente; SPSS; nivel de significancia $\alpha=0,05$

Asimismo, la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney, nos ayudó a evaluar las diferencias de cada factor por separado, en la Tabla 16 se obtienen los resultados de esta prueba, donde se concluye con un p valor menor a 0,05 (5%), que, si existen diferencias de remoción de plomo en función del tiempo, específicamente para el quinto día y décimo día.

Tabla 16*Prueba de U de Mann-Whitney para la remoción de Pb en función del tiempo*

Hipótesis Nula	Prueba	p - valor	Decisión
La distribución de la remoción de plomo es la misma entre las categorías de días de tratamiento.	Prueba de Mann-Whitney para muestras independientes	0,015	Rechazar la Hipótesis nula

Nota. Fuente; SPSS; nivel de significancia $\alpha=0,05$.

Por otro lado, en la Tabla 17, se presentan los resultados del análisis no paramétrico U de Mann-Whitney para determinar diferencias de remoción de plomo considerando solo las categorías o niveles de factor tipo de ácido (solución humectante), se observa un p – valor mayor a una significancia igual a 0,05 (5%), por lo que se concluye que el tipo de ácido o solución humectante no influye en la remoción de este metal.

Tabla 17*Prueba de U de Mann-Whitney para la remoción de Pb en función del tipo de solución humectante*

Hipótesis nula	Prueba	p - valor.	Decisión
La distribución de la remoción de plomo es la misma entre las categorías de tipo de ácido.	Prueba de Mann-Whitney para muestras independientes	0,589	Retener la Hipótesis nula

Nota. Fuente; SPSS; nivel de significancia $\alpha=0,05$.

5.2.2 Análisis paramétrico para la remoción de zinc

En las Tabla 18 se presenta el análisis de varianza Inter sujetos, donde se considera el efecto por separado de cada factor y su interacción, en la remoción de zinc, en dicha tabla se observa que el tipo de solución humectante, el tiempo ni la interacción Tiempo* Solución Humectante posee influencia en la remoción de este metal.

Tabla 18

Prueba de ANOVA para la remoción de Zn

Variable	Suma de Cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	p-valor
Solución	0	1	0	0,04	0,951
Humectante					
Tiempo	0,021	1	0,021	0,283	0,609
Tiempo* Solución					
Humectante	0,001	1	0,001	0,009	0,927

Nota. Fuente, SPSS; gl= grados de libertad; Intervalo de confianza=95%; Nivel de significancia $\alpha = 0,05$

5.2.2 Análisis no paramétrico para la remoción de cobre

Con el fin de buscar diferencias de remoción de cobre entre todos los grupos formados por la combinación de todos los niveles o categorías de cada factor, se utilizó la prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis, en la Tabla 19, se pueden observar los resultados de esta prueba, donde se obtiene un p valor mayor a 0,05 (5%), por lo que se concluye que no existe diferencias de

remoción de este metal entre los diferentes grupos conformados.

Tabla 19

Prueba de Kruskal-Wallis para la remoción de Cu

Hipótesis nula	Prueba	p - valor	Decisión
La distribución de la remoción de cobre es la misma entre las categorías de combinación de todos los factores	Prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes	0,408	Retener la Hipótesis nula

Nota. SPSS; nivel de significancia $\alpha=0,05$.

Asimismo, la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney, nos ayudó a evaluar las diferencias de cada factor por separado, en la Tabla 20 se obtienen los resultados de esta prueba, donde se concluye con un p valor mayor a 0,05 (5%), que, no existen diferencias de remoción de cobre en función del tiempo, específicamente para el quinto día y décimo día.

Tabla 20

Prueba de U de Mann-Whitney para la remoción de Cu en función del tiempo

Hipótesis Nula	Prueba	p - valor	Decisión
La distribución de la remoción de cobre es la misma entre las categorías de días de tratamiento	Prueba de Mann-Whitney para muestras independientes	0,132	Retener la Hipótesis nula

Nota. Fuente; SPSS; nivel de significancia $\alpha=0,05$

Por otro lado, en la Tabla 21, se presentan los resultados del análisis no paramétrico U de Mann-Whitney para determinar diferencias de remoción de cobre considerando solo las categorías o niveles de factor tipo de ácido (solución humectante), se observa un p – valor mayor a una significancia igual a 0,05 (5%), por lo que se concluye que el tipo de ácido o solución humectante no influye en la remoción de este metal.

Tabla 21

Prueba de U de Mann-Whitney para la remoción de Cu según el tipo de solución humectante

Hipótesis Nula	Prueba	p - valor	Decisión
La distribución de la remoción de cobre es la misma entre las categorías de tipo de ácido	Prueba de Mann- Whitney para muestras independientes	0,818	Retener la Hipótesis nula

Nota. Fuente; SPSS; nivel de significancia $\alpha=0.05$

VI.DISCUSIONES DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

Contrastación de la hipótesis general

H₀: El sistema de electrorremediación con arreglo lineal no tiene una alta eficiencia de remoción de los metales pesados presentes en el suelo contaminado caso San Miguel de Viso.

H_A: El sistema de electrorremediación con arreglo lineal tiene una alta eficiencia de remoción de los metales pesados presentes en el suelo contaminado caso San Miguel de Viso.

Los resultados demostraron que aunque el sistema de electrorremediación permite remover Pb, Zn y Cu de suelos contaminados por pasivos ambientales mineros, los porcentajes de remoción son insuficientes para permitir lograr reducir la concentración final a niveles aceptables según la normatividad ambiental; por ello se rechaza la hipótesis alterna y se acepta la hipótesis nula de que “el sistema de electrorremediación con arreglo lineal no tiene una alta eficiencia de remoción de los metales pesados presentes en el suelo contaminado caso San Miguel de Viso”.

Contrastación de la primera hipótesis específica

H₀: El suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso, no tiene concentraciones de metales pesados mayores que los establecidos en el ECA peruano para suelos y la norma de referencia (guías canadienses de calidad del suelo

H_A: El suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso, tiene concentraciones de metales pesados mayores que los establecidos en el ECA peruano para suelos y la norma de referencia (guías canadienses de calidad del suelo).

Según los resultados de la Tabla 12, se puede observar que los metales pesados Pb, Zn y Cu se encuentran por encima de los límites que establece la norma nacional (ECA para suelo, categoría uso agrícola, plomo y cobre) y de referencia (guía canadiense de calidad de suelo, categorías uso agrícola, zinc) para un uso de suelo agrícola. Por lo tanto, se desestima la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna de que “el suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso, tiene concentraciones de metales pesados mayores que los establecidos en el ECA peruano para suelos y la norma de referencia (guías canadienses de calidad del suelo)”.

Contrastación de la segunda hipótesis específica

H₀: El tipo de solución humectante no influye significativamente en la remoción de Pb, Zn y Cu del suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso.

H_A: El tipo de solución humectante influye significativamente en la remoción de Pb, Zn y Cu del suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso.

Según la Tabla 17, con un p valor igual a 0,589 se concluye que el tipo de ácido o solución humectante no influye en la remoción de plomo, asimismo en la Tabla 18, con un p-valor igual a 0,951 se concluye que el tipo de solución

humectante tampoco influye en la remoción de zinc; finalmente la Tabla 21, brinda un p-valor igual a 0,818 por lo que se infiere que el tipo de solución humectante tampoco tiene efecto en la remoción de cobre. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis alterna y acepta la nula de que “el tipo de solución humectante no influye significativamente en la remoción de Pb, Zn y Cu del suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso”.

Contrastación de la tercera hipótesis específica

H₀: El tiempo de tratamiento no influye significativamente en la remoción de Pb, Zn y Cu del suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso.

H_A: El tiempo de tratamiento influye significativamente en la remoción de Pb, Zn y Cu del suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso.

Según la Tabla 16, con un p valor igual a 0,015 se concluye que los días de tratamiento influyen en la remoción de plomo, asimismo en la Tabla 18, con un p – valor igual a 0,609 se concluye que el tiempo no influye en la remoción de zinc; finalmente la Tabla 20, brinda un p-valor igual a 0,132 8 por lo que se infiere que los días de tratamiento tampoco tiene efecto en la remoción de cobre. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis alterna y acepta la nula de que “el tiempo de tratamiento no influye significativamente en la remoción de Pb, Zn y Cu del suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso”.

Contrastación de la cuarta hipótesis específica

H₀: El sistema de electroremediación con arreglo lineal no permite un alto

porcentaje de remoción de Pb, Zn y Cu, del suelo contaminados caso San Miguel de Viso.

H_A: El sistema de electroremediación con arreglo lineal permite un alto porcentaje de remoción de Pb, Zn y Cu, del suelo contaminados caso San Miguel de Viso.

Según las Figuras 14, 15 y 16 las remociones de los metales de Pb, Zn y Cu, debido al sistema de electroremediación con arreglo lineal, no permite porcentajes de remoción altos que garantice obtener concentraciones finales que cumplan con lo establecido por las normas que regulan la calidad del suelo para usos agrícolas; por ello se rechaza la hipótesis alterna y se acepta la nula de que “El sistema de electroremediación con arreglo lineal no permite un alto porcentaje de remoción de Pb, Zn y Cu, del suelo contaminados caso San Miguel de Viso.”

6.2, Contrastación de resultados con otros estudios similares

Los resultados muestran que el suelo para uso agrícola de San Miguel de Viso presenta una alta concentración de metales Pb, Zn y Cu, superando los estándares nacionales (caso Pb y Cu) y canadiense (para el Zn) como se muestra en la Tabla 12, confirmando lo reportado por la (Comisión Episcopal de Acción Social (CEAS), 2015, p. 4).

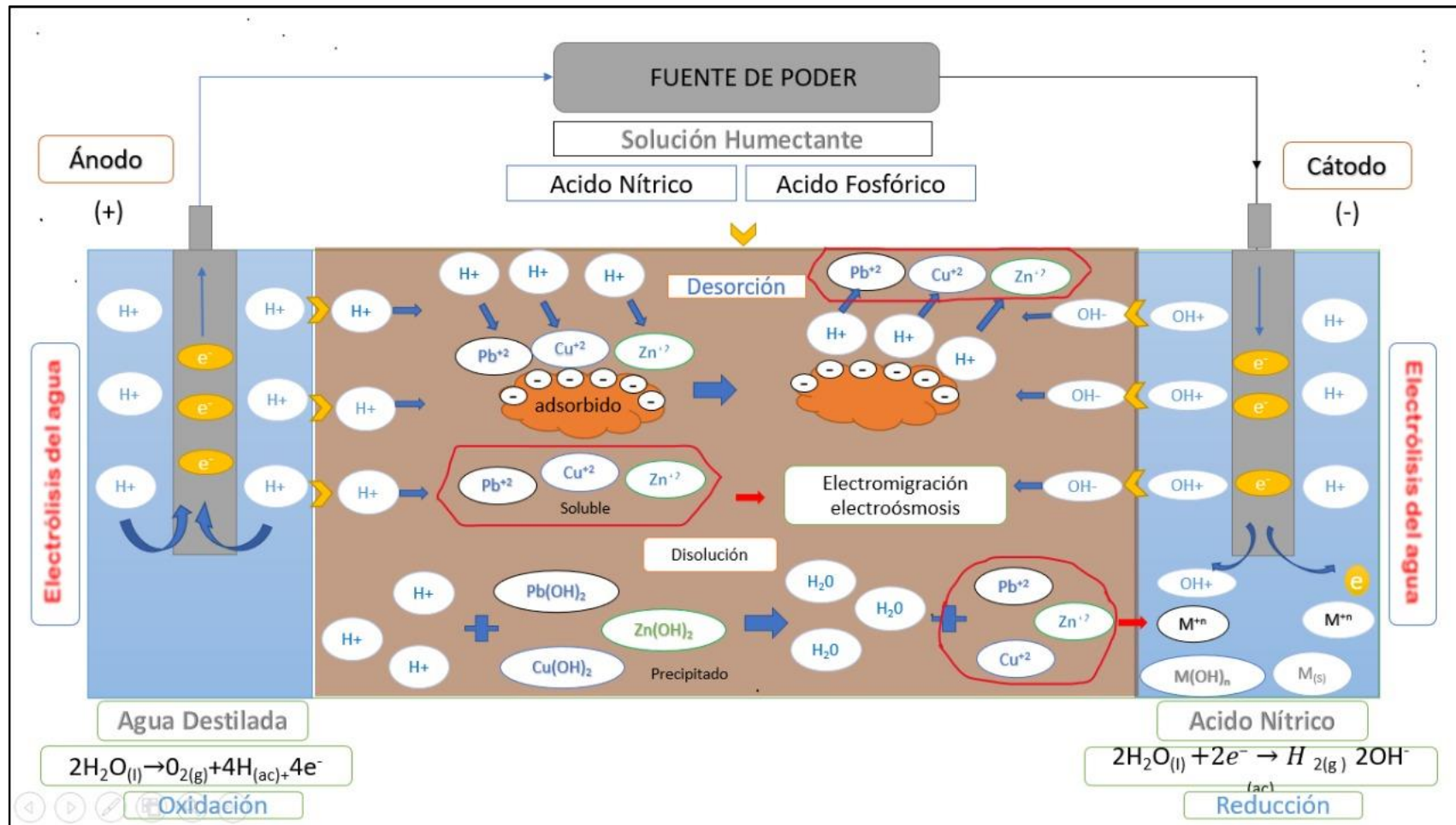
Por otro lado, en nuestro estudio no se encontraron diferencias estadísticamente significativas de remoción de Pb, Zn y Cu al añadir ácido nítrico o fosfórico como solución humectante en el suelo, sin embargo, ambos tipos de ácidos lograron remover estos metales pesados en el suelo contaminado; esto

se podría explicar ya que según (Kim et al., 2012) y (Ryu et al., 2011) a diferencia del agua como solución humectante convencional, el pretratamiento del suelo usando una solución ácida aumenta dramáticamente la conductividad mejorando la desorción de iones desde la superficie del suelo hacia el agua intersticial, en consecuencia, intensifica en mayor medida la desorción/disolución de los metales, facilitando su desplazamiento fuera del suelo por acción del campo eléctrico.

En cuanto al pH del sistema, se registró una fuerte acidez en el lado del compartimiento del suelo y cercano al compartimiento anódico, y una variación mínima de alcalinidad en el entorno catódico, para (Ait Ahmed, 2016) y (Baek y Yang, 2009), este comportamiento se atribuye a electrolisis de agua y al control de pH en el fluido catódico, tal y como se observa en la Figura 29, donde se observa que los iones H^+ y OH^- de los compartimientos de los fluidos se movilizan por electroremediación hacia el cátodo y ánodo respectivamente, y en su trayecto modifican el pH del suelo al acidificarlo en la región cercana del ánodo y alcalinizarlo en la región cercana al cátodo, sin embargo cuando se utiliza ácido nítrico en el compartimiento catódico como neutralizante parcial del frente alcalino, se mantiene el pH del suelo cercano a la neutralidad en ese compartimiento.

Figura 29

Principales fenómenos electrocinéticos y reacciones químicas ocurridos durante la remoción de plomo (Pb), Cobre (Cu) y zinc (Zn)



Por su parte la conductividad eléctrica (CE) mostro un comportamiento distinto en cada compartimiento, incrementándose considerablemente en el ánodo y con una logra tendencia a decrecer en el cátodo; resultados similares fueron reportados por (Kim et al., 2012) y (Almeira y Abou., 2012), para quienes el aumento de la CE en el compartimiento anódico se debe a la aparición de iones H^+ , producto del electrolisis de agua; indicando a su vez que la CE en el fluido catódico disminuyó ligeramente porque los OH^- electrogenerados fueron neutralizados por los H^+ del ácido nítrico.

Los resultados muestran, que el suelo humectado con el ácido nítrico presenta un rápido ascenso de la intensidad de corriente eléctrica durante las primeras 12 horas, para luego apreciar un descenso moderado y una fluctuación cuasi constante hasta las 72 horas, esta tendencia fue similar en los siguientes días de tratamiento; un comportamiento similar fueron reportados por (Al-Hamdan y Reddy, 2008) y (Peng y Tian, 2010), quienes evidenciaron el incremento del flujo de corriente eléctrica al inicio por la alta concentración de cationes dispuestos en el suelo debido a las condiciones de acides, posterior a ello, la intensidad de corriente disminuyo con el ácido nítrico debido al agotamiento de los iones en el suelo, formando una zona de alta resistencia al precipitar los cationes metálicos cerca al compartimiento catódico. En cambio, en los ensayos con ácido fosfórico, la intensidad eléctrica después de un ascenso ligero, se mantuvo en el tiempo debido a la corriente que se utilizó para movilizar los iones fosfato u otros iones metálicos de mayor disponibilidad que el Pb, Zn y Cu.

Los resultados mostraron que tratamiento electroquímico disminuye la concentración de plomo (Pb), Zinc (Zn) y Cobre (Cu) hasta un 51%, 35% y 37% respectivamente, en un suelo real, a escala de laboratorio, durante 5 y 10 días de trabajo, sometido a 30 V de potencia y al emplear ácido nítrico en el control del pH del compartimento catódico, estos resultados concuerdan con Bahemmat et al. (2016), quienes demostraron la viabilidad de la electrorremediación para descontaminar suelos con metales a través de los procesos de electromigración y electroósmosis, potenciado con soluciones de mejora que incrementan la movilidad de los contaminantes.

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

Los autores de este trabajo de investigación se hacen responsables por la información proporcionada en la presente tesis, todo ello en conformidad con el Reglamento del Código de Ética de la Investigación de la UNAC, Resolución de Consejo Universitario N. ° 260 2019-CU.

CONCLUSIONES

- ✓ Los resultados iniciales obtenidos en el análisis de caracterización del suelo determinaron que la clase textural de la muestra de suelo está clasificada como franco arenoso con un pH de 5,55; asimismo las concentraciones del plomo ($163,94 \text{ mg.kg}^{-1}$), Zinc ($339,37 \text{ mg.kg}^{-1}$) y Cobre ($177,48 \text{ mg.kg}^{-1}$) estuvieron por encima de los estándares de calidad de suelo para el uso agrícola, por lo que se puede evidenciar la contaminación del suelo por relaves mineros.
- ✓ De acuerdo al tipo de solución humectante utilizado en el tratamiento electroquímico, se demostró que el ácido nítrico y el ácido fosfórico no presentan diferencias significativas entre sí en la remoción de los metales Pb, Zn y Cu.
- ✓ El tiempo de duración de tratamiento en el porcentaje de remoción de Pb, presenta mejores resultados para 10 días de tratamiento en comparación a 5 días.
- ✓ El tratamiento electroquímico del sistema lineal disminuye la concentración de plomo (Pb), Zinc (Zn) y Cobre (Cu) hasta un 51%, 35% y 37% de su concentración inicial respectivamente, en un suelo real, a escala de laboratorio, durante 5 y 10 días de tratamiento, sin embargo, estos porcentajes de remoción no logran concentraciones finales menores o iguales a los establecidos en los estándares de calidad de suelo (DS N° 011-2017).

RECOMENDACIONES

- ✓ Ampliar el seguimiento de los parámetros en el tratamiento electroquímico para controlar - monitorear eficientemente el traslado de los metales y sus condiciones en cada sector del recipiente de la muestra.
- ✓ Se recomienda evaluar tiempos más prolongados para el tratamiento de electrorremediación con el fin de lograr mayores remociones de metales pesados.
- ✓ Tomar como referente los resultados obtenidos en esta investigación para complementar estudios de evaluación de riesgos a la salud y al medio ambiente en sitios contaminados, específicamente en la localidad de San Miguel de Viso.
- ✓ Complementar el sistema electroquímico con otros tipos de tratamientos (físicoquímicos o biológicos), que permitan mejorar el rendimiento en la remoción de metales pesados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmad, W., Najeeb, U., y Zia, M. H. (2014). Chapter 2: Soil Contamination with Metals: Sources, Types and Implications en K. Hakeem, M. Sabir, M. Ozturk, y A. Mermut (Ed.), *Sources, Types and Implications. Soil Remediation and Plants: Prospects and Challenges*. Elsevier. ISBN0127999132, 9780127999135
- Alcaino, G. (2012). *Análisis y comparación de tecnologías de remediación para suelos contaminados con metales* [Tesis para optar el título de ingeniero civil químico e ingeniero civil en biotecnología, Universidad de Chile].
- Al-Hamdan, A. Z., y Reddy, K. R. (2008). Transient behavior of heavy metals in soils during electrokinetic remediation. *Chemosphere*, 71(5), 860– 871. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.11.028>
- Alshawabkeh, A. N., Gale, R. J., Ozsü-Acar, E., Bricka, R. M. (2010). Optimization of 2-D Electrode Configuration for Electrokinetic Remediation. *Journal of Soil Contamination*, 8 (6), pp. 617-635. <https://doi.org/10.1080/10588339991339504>
- Aragón Tobar, C. F., (2013). *Diseño a escalas de laboratorio y piloto de un sistema de remediación electrocinética de suelos contaminados con metales pesados* [Título para optar el grado de Ingeniero Químico, Escuela Politécnica Nacional]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/7072>
- Bahemmat M., Farahbakhsh M., Kianirad M. (2016). Humic substances-enhanced electroremediation of heavy metals contaminated soil. *Journal*

of *Hazardous Materials*, 312, PP. 307-318.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.03.038>

Cameselle, C., y Gouveia, S. (2018). Electrokinetic remediation for the removal of organic contaminants in soils. *Current Opinion in Electrochemistry*, 11, 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2018.07.005>

CEPES. (2015). Edición especial Los suelos en el Perú, 16. Retrieved from http://www.larevistaagraria.org/sites/default/files//revista/LRA170/LRA170_textocompleto.pdf

Cheng, F., Guo, S., Li, G., Wang, S., Li, F., & Wu, B. (2017). The loss of mobile ions and the aggregation of soil colloid: Results of the electrokinetic effect and the cause of process termination. *Electrochimica Acta*, 258, 1016–1024. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.11.153>

Cheri, M., Boutemine, N., Laefer, D. F., & Hazourli, S. (2016). Comptes Rendus Chimie Effect of sludge pH and treatment time on the electrokinetic removal of aluminum from water potabilization treatment sludge Effets du pH de la boue et du temps de traitement sur l' elimination electrocin etique de l' aluminium d', 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2016.01.010>

Datta, R., Quispe, M. A., & Sarkar, D. (2011). Greenhouse study on the phytoremediation potential of vetiver grass, *Chrysopogon zizanioides* L., in arsenic-contaminated soils. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 86(1), 124-128.

De La Rosa-Pérez, D. A., Teutli-León, M. M. M., & Ramírez-Islas, M.E. (2007). Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para

su aplicación en campo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 23(3), 129–138.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992007000300003&lng=es&nrm=iso

Decreto Supremo N.º 011-2017 [Ministerio del Ambiente]. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. 2 de diciembre del 2017.

<https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-suelo-0>

Durães, N., Novo, L. A. B., Candeias, C., y da Silva, E. F. (2018). Chapter 2 - Distribution, Transport and Fate of Pollutants. En Armando C. Duarte, Anabela Cachada, Teresa Rocha-Santos (Ed.). *Soil Pollution* (pp 29 – 57). Academic Press.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128498736000029>

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, 105.

Escobar M, A. J., y Ocas I, S. M. (2016). *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 de licenciatura, Repositorio de la Universidad Privada del Norte]. Recuperado de <https://hdl.handle.net/11537/10682>

- FAO. (2007). Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. *Informes Sobre Recursos Mundiales de Suelos*, 103, 117. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Base+referencial+mundial+del+recurso+suelo#0>
- Ferrucci, A., Vocciante, M., Bagatin, R., & Ferro, S. (2017). Electrokinetic remediation of soils contaminated by potentially toxic metals: Dedicated analytical tools for assessing the contamination baseline in a complex scenario. *Journal of Environmental Management*, 203, 1163–1168. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.037>
- García et. al. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. *Ciencia y Medio Ambiente.*, 125–138. Retrieved from <http://digital.csic.es/handle/10261/111812>
- 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. *Superficies y vacío*, 24 (1), 24-29. ISSN 1665-3521
- Granda Lazo, J. F. (2012). *Evaluación de la técnica de electrorremediación de suelos contaminados por metales pesados* [Trabajo de licenciatura, Universidad Técnica Particular de Loja]. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/1562>
- Green Chemistry: An Inclusive Approach*, 339–357. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00014-5>
- Guamán Seis, J. A. (2015). Diseño a escalas laboratorio y piloto de un sistema

- de remediación electrocinética de suelos contaminados con metales pesados, 1–208. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.7.041008>
- Hillel, D. (2013). Introduction to Soil Physics. *Introduction to Soil Physics*, 1–364. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-03052-9>.
- Kalev, S. D., & Toor, G. S. (2018). Chapter 3.9 - The Composition of Soils and Sediments. En B. Török Y T. Dransfield (Ed.). *Green Chemistry* (pp. 339 – 357). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809270-5.00014-5>
- Kim, D. H., Jo, S. U., Choi, J. H., Yang, J. S., & Baek, K. (2012). Hexagonal two-dimensional electrokinetic systems for restoration of saline agricultural lands: A pilot study. *Chemical Engineering Journal*, 198–199, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.05.076>
- Krcmar, D., Varga, N., Prica, M., Cveticanin, L., Zukovic, M., Dalmacija, B., & Corba, Z. (2018). Application of hexagonal two-dimensional electrokinetic system on the nickel contaminated sediment and modelling the transport behavior of nickel during electrokinetic treatment. *Separation and Purification Technology*, 192, 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.10.008>
- Liu, L., Li, W., Song, W., y Guo, M. (2018). Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability. *Science of the Total Environment*, 633, 206–219. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.161>
- Llancari Quispe, B. E. (2018). *Recuperación del suelo contaminado con Zn mediante la electrorremediación de la ex - Mina Santa Rosa de Cata de*

Cañete [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur].
<http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/348>

Londoño-Franco, L. F., Londoño-Muñoz, P. T., Muñoz-García, F. B., (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 14 (2), 145-153.
DOI:10.18684/BSAA

López Vizcaíno, R., Yustres, A., Asensio, L., Saez, C., Cañizares, P., Rodrigo, M. A., & Navarro, V. (2018). Enhanced electrokinetic remediation of polluted soils by anolyte pH conditioning. *Chemosphere*, 199, 477–485.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.038>

MINAM, (2014). Guía para muestreo de suelos en el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo.

MINAM. (n.d.). Glosario de términos Sitios Contaminados.
<https://doi.org/10.1063/1.4756353>

Mohamed, A.-M. O., & Paleologos, E. K. (2018). *The Soil System. Fundamentals of Geoenvironmental Engineering*. Elsevier. ISBN: 978-0-12-804830-6

Morgado, R. G., Loureiro, S., y González-Alcaraz, M. N. (2018). Chapter 3 - Changes in Soil Ecosystem Structure and Functions Due to Soil Contamination en Armando C. Duarte, Anabela Cachada, Teresa Rocha-Santos (Ed.), *Soil Pollution* (pp. 59-87). Academic Press.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012849873600003>

- Pavao-Zuckerman, M. A. (2008). Soil ecology. *Entomopathogenic Nematodes in Biological ...*, 3, 3277–3283. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63768-0.00850-7>
- Pedersen, K. B., Jensen, P. E., Ottosen, L. M., & Barlundhaug, J. (2018a). The relative influence of electrokinetic remediation design on the removal of As, Cu, Pb and Sb from shooting range soils. *Engineering Geology*, 238, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.005>
- Pedersen, K. B., Jensen, P. E., Ottosen, L. M., & Barlundhaug, J. (2018b). The relative influence of electrokinetic remediation design on the removal of As, Cu, Pb and Sb from shooting range soils. *Engineering Geology*, 238, 52–61. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.03.005>
- Peppicelli, C., Cleall, P., Sapsford, D., & Harbottle, M. (2018). Changes in metal speciation and mobility during electrokinetic treatment of industrial wastes: Implications for remediation and resource recovery. *Science of the Total Environment*, 624, 1488–1503. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.132>
- Porazinska, D. L. (2013). *Soil Conservation*, 6(2003), 590–598. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00127-1>
- Prieto, J., González, C. A., Román A. D. y Prieto, F. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10 (1), 29-44. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93911243003>

- Rai, R. K., Singh, V. P., & Upadhyay, A. (2017). *Soil Analysis. Planning and Evaluation of Irrigation Projects, Methods and Implementation*. Elsevier. ISBN: 978-0-12-811748-4
- Ramadan, B. S., Sari, G. L., Rosmalina, R. T., Effendi, A. J., & Hadrah. (2018). An overview of electrokinetic soil flushing and its effect on bioremediation of hydrocarbon contaminated soil. *Journal of Environmental Management*, 218, 309–321. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.065>
- Resolución ministerial N.º 290-2006 [Ministerio de Energía y Minas]. Aprueban Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros. 15 de junio del 2006
- Reyes Cuellar, J. C., & Vazquez, M. V. (2009). Electrochemical remediation at laboratory scale of the coal dump in Paz de Rio (Colombia). *Remediación Electroquímica, a Escala Laboratorio, Del Estéril de Carbón En Paz de Río (Colombia)*, 27(3), 409–417. <https://doi.org/10.4152/pea.200903409>
- Risco, C., Rubí-Juárez, H., Rodrigo, S., López Vizcaíno, R., Saez, C., Cañizares, P., ... Rodrigo, M. A. (2016). Removal of oxyfluorfen from spiked soils using electrokinetic fences. *Separation and Purification Technology*, 167, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.04.050>
- Risco, C., Rubí-juárez, H., Rodrigo, S., López-vizcaíno, R., Saez, C., Cañizares, P., & Barrera-díaz, C. (2016). Removal of oxyfluorfen from spiked soils using electrokinetic soil flushing with the surrounding arrangements of electrodes, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.174>
- RoyChowdhury, A., Datta, R., & Sarkar, D. (2017). Chapter 3.10 - Heavy Metal Pollution and Remediation en B. Török Y T. Dransfield (Ed.). *Green*

Chemistry: An Inclusive Approach (pp 359-373). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/C2015-0-05674-X>

Rubio Hurtado, M. J. y Berlanga Silvente, V. (2011). Cómo aplicar las pruebas paramétricas bivariadas t de Student y ANOVA en SPSS. Caso práctico. *Revista d'Innovació i Recerca e Educació*, 5 (2), pp. 83-100.

<http://www.ub.edu/ice/reire.htm>

Saberi, N., Aghababaei, M., Ostovar, M., & Mehrnahad, H. (2018). Simultaneous removal of polycyclic aromatic hydrocarbon and heavy metals from an artificial clayey soil by enhanced electrokinetic method. *Journal of Environmental Management*, 217, 897–905.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.125>

Sampieri, H. Fernández y Baptista (2014) Metodología de la Investigación. México: Quinta edición. Mc Grawhill.

Tang, J., He, J., Liu, T., Xin, X., & Hu, H. (2017). Removal of heavy metal from sludge by the combined application of a biodegradable biosurfactant and complexing agent in enhanced electrokinetic treatment. *Chemosphere*, 189, 599–608. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.104>

Vázquez, M. V., Hernández-Luis, F., Lemus, M., Arbelo C.D. (2004). Integral analysis of the process of electro - remediation of andisols polluted by heavy metals. *Portugaliae Electrochimica Acta*.

Velásquez Piedrahíta, J. D. y Quiceno Castañeda, J. F. (2013). *Diseño de un sistema de generación de hidrógeno por electrólisis* [Trabajo de fin de grado, Universidad Tecnológica de Pereira].

<https://hdl.handle.net/11059/3655>

Volk, B. G., & Loeppert, R. H. (2018). Soil organic matter. En V. J. Kilmer (Ed.).

Handbook of Soils and Climate in Agriculture (1ª ed.). Taylor y Francis.

<https://doi.org/10.1201/9781351073073>

Volke, S. T., Velasco T. J. A. (2002). *Tecnologías de remediación para suelos*

contaminados. Instituto Nacional de Ecología. ISBN 9688175579,

9789688175576

Yuan, L., Xu, X., Li, H., Wang, Q., Wang, N., & Yu, H. (2017). The influence of

macroelements on energy consumption during periodic power electrokinetic remediation of heavy metals contaminated black soil.

Electrochimica Acta, 235, 604–612.

<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.03.142>

Zhou, M., Xu, J., Zhu, S., Wang, Y., & Gao, H. (2018). Exchange electrode-

electrokinetic remediation of Cr-contaminated soil using solar energy.

Separation and Purification Technology, 190, 297–306.

<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.09.006>

Zulfiqar, W., Iqbal, M.A., Butt, M.K. (2017). Pb²⁺ ions mobility perturbation by iron

particles during electrokinetic remediation of contaminated soil.

Chemosphere, 169, 257-261.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.083>

ANEXOS

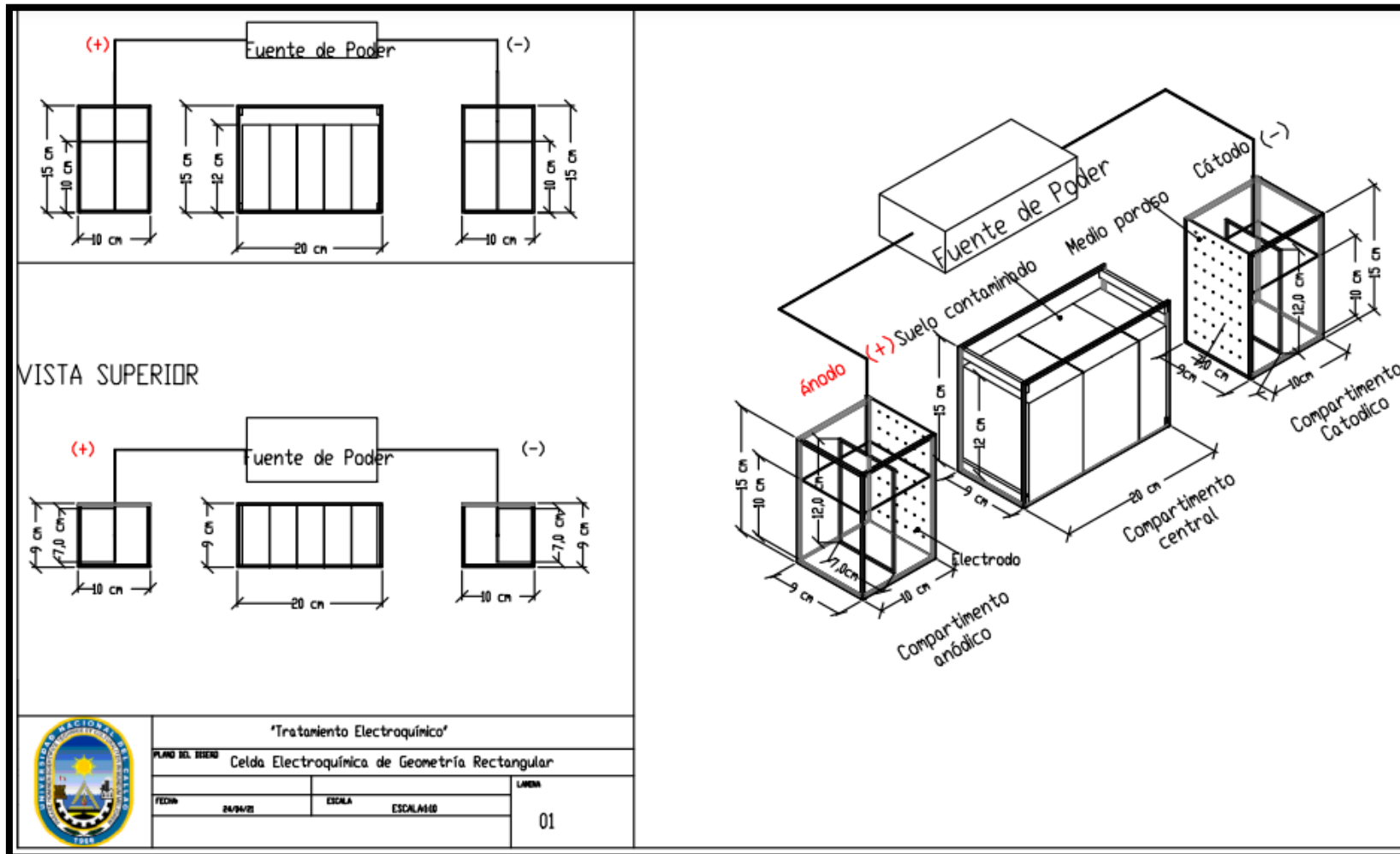
ANEXO 1: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variables	Dimensiones	Indicadores	Unidades
¿Cuál es la eficiencia del sistema de electroremediación con arreglo lineal para la remoción de metales pesados (Pb, Zn y Cu) de suelos contaminados caso San Miguel de Viso?	Evaluar la eficiencia del sistema de electroremediación con arreglo lineal en la remoción de los metales pesados de suelos contaminados caso San Miguel de Viso.	El Sistema de electroremediación con arreglo lineal tiene una alta eficiencia de remoción de los metales pesados presentes en el suelo contaminado caso San Miguel de Viso.	Variable 1 (Independiente): Aplicación del Sistema De Electroremediación con Arreglo Lineal	Solución Humectante	pH	Unidad de pH
				1-Ácido Nítrico (0.1M)	Conductividad	uS/ cm
				2-Ácido Fosfórico (0.1M)	Intensidad de Corriente	A
				Tiempo	5 días de Tratamiento	Días
10 días de Tratamiento						
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variables	Dimensiones	Indicadores	Unidades
1. ¿Cuál es la calidad del suelo contaminado por	1. Determinar la calidad del suelo contaminado por	1. El suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel	Variable 2 (Dependiente): Remoción de los	Concentración del Pb en suelo tratado	% de remoción de Pb	mg Pb / Kg Suelo

pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso, en lo que corresponde a la concentración de metales pesados?	pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso, en lo que corresponde a la concentración de metales pesados.	de Viso, tiene concentraciones de metales pesados mayores que los establecidos en el ECA peruano para suelos y la norma de referencia (Guías Canadienses de Calidad del Suelo).	Metales Pesados en los Suelos Contaminados			
2. ¿Cuál es la influencia de la solución humectante en el porcentaje de remoción de Pb, Zn y Cu?	2. Determinar la influencia de la solución humectante en el porcentaje de remoción de Pb, Zn y Cu.	2. El tipo de solución humectante influye significativamente en la remoción de Pb, Zn y Cu del suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso.		Concentración del Zn en suelo tratado	% de remoción de Zn	mg Zn / Kg Suelo
3.Cuál es la influencia del tiempo en el porcentaje de remoción de Pb, Zn y Cu?	3. Determinar la influencia del tiempo en el porcentaje de remoción de Pb, Zn y Cu.	3. El tiempo de tratamiento influye significativamente en la remoción de Pb, Zn y Cu del suelo contaminado por pasivos ambientales mineros de San Miguel de Viso.			% de remoción de Cu	mg Cu /Kg Suelo

<p>4. ¿En qué medida el sistema de electroremediación con arreglo lineal reduce la concentración de Pb, Zn y Cu en los suelos contaminados caso San Miguel de Viso?</p>	<p>4. Determinar el porcentaje de remoción de Pb, Zn y Cu, del suelo tratado por sistema de electroremediación con arreglo lineal de los suelos contaminados caso San Miguel de Viso.</p>	<p>4. El sistema de electroremediación con arreglo lineal permite un alto porcentaje de remoción de Pb, Zn y Cu, del suelo contaminados caso San Miguel de Viso.</p>		<p>Concentración del Cu en suelo tratado</p>		
---	---	--	--	--	--	--

ANEXO 2: PLANO DE DISEÑO DEL SISTEMA ELECTROQUIMICO



ANEXO 3: Resultados Laboratorio



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : JOEL CASAZOLA CASAZOLA
 Departamento : LIMA
 Distrito : SAN MIGUEL DE VISO
 Referencia : H.R. 74505-058C-21

Bolt.: 4612

Provincia : HUAROCHIRI
 Predio :
 Fecha : 30/06/2021

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺³ + H ⁺			
4874		5.55	0.18	0.00	2.91	29.5	58	63	24	13	Fr.A.	13.12	9.31	1.35	0.18	0.17	0.10	11.12	11.02	84

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso



B. La Torre
Ing. Braulio La Torre Martínez
 Jefe del Laboratorio

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 Celular: 946-505-254
 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-6216

IV. RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO:				M-21-21975
CÓDIGO DEL CLIENTE:				M-0
COORDENADAS:				NO APLICA
UTM WGS 84:				NO APLICA
PRODUCTO:				SUELOS
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:				NO APLICA
FECHA y HORA DE MUESTREO:				04-06-2021 11:30
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Metales Totales ²				
Aluminio	mg/Kg	0,10	0,30	10 554,95
Antimonio	mg/Kg	0,06	0,20	4,25
Arsénico	mg/Kg	0,02	0,10	44,90
Bario	mg/Kg	0,01	0,03	103,04
Berilio	mg/Kg	0,01	0,03	0,66
Bismuto	mg/Kg	0,06	0,20	<0,20
Boro	mg/Kg	0,03	0,10	4,06
Cadmio	mg/Kg	0,005	0,020	5,466
Calcio	mg/Kg	0,1	0,4	3 432,8
Cerio	mg/Kg	0,04	0,10	30,10
Cobalto	mg/Kg	0,05	0,20	6,71
Cobre	mg/Kg	0,005	0,020	177,481
Cromo	mg/Kg	0,01	0,03	9,98
Estaño	mg/Kg	0,03	0,10	0,94
Estroncio	mg/Kg	0,05	0,20	75,18
Fosforo	mg/Kg	0,04	0,10	1 341,54
Hierro	mg/Kg	0,06	0,20	35 058,91
Litio	mg/Kg	0,003	0,010	8,754

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Limite de cuantificación del método, *<*= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Limite de detección del método, *<*= Menor que el L.D.M.

*: No ensayado

NA: No Aplica

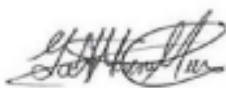
INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-6216

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL	: JOEL CASAZOLA CASAZOLA
2.-DIRECCIÓN	: NO INDICA
3.-PROYECTO	: ELECTORREMEDIAACION -TESIS
4.-PROCEDENCIA	: SAN MIGUEL DE VISO-HUAROCHIRI
5.-SOLICITANTE	: JOEL CASAZOLA CASAZOLA
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: 000002890-2021-0000
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	: NO APLICA
8.-MUESTREADO POR	: EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2021-08-26

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO	: Suelos
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 1
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA	: 2021-06-11
4.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2021-06-11 al 2021-08-26



Gabby Moreno Muñoz
Jefe de Laboratorio
CIP N° 191207

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados.
No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R.L.
Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-8175

IV. RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO:				M-21-28045
CÓDIGO DEL CLIENTE:				M01
COORDENADAS:				NO APLICA
UTM WGS 84:				NO APLICA
PRODUCTO:				SUELOS
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:				NO APLICA
FECHA y HORA DE MUESTREO :				13-07-2021 20:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Metales Totales en suelos				
ICP MS ²				
Aluminio	mg/Kg	0,10	0,30	10 456,86
Antimonio	mg/Kg	0,06	0,20	<0,20
Arsénico	mg/Kg	0,02	0,10	<0,10
Bario	mg/Kg	0,01	0,03	87,95
Berilio	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03
Bismuto	mg/Kg	0,06	0,20	<0,20
Boro	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10
Cadmio	mg/Kg	0,005	0,020	4,567
Calcio	mg/Kg	0,1	0,4	3 705,7
Cerio	mg/Kg	0,04	0,10	0,20
Cobalto	mg/Kg	0,05	0,20	4,44
Cobre	mg/Kg	0,005	0,020	146,295
Cromo	mg/Kg	0,01	0,03	11,04
Estaño	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10
Estroncio	mg/Kg	0,05	0,20	53,04
Fosforo	mg/Kg	0,04	0,10	1 226,72
Hierro	mg/Kg	0,06	0,20	34 626,14
Litio	mg/Kg	0,003	0,010	<0,010

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *<= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *<= Menor que el L.D.M.

*: No ensayado

NA: No Aplica

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-8175

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO:				M-21-28045
CÓDIGO DEL CLIENTE:				M01
COORDENADAS:				NO APLICA
UTM WGS 84:				NO APLICA
PRODUCTO:				SUELOS
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:				NO APLICA
FECHA y HORA DE MUESTREO:				13-07-2021 20:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Magnesio	mg/Kg	0,06	0,20	4 944,99
Manganeso	mg/Kg	0,01	0,03	408,56
Mercurio	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04
Molibdeno	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10
Niquel	mg/Kg	0,01	0,04	0,59
Plata	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10
Plomo	mg/Kg	0,05	0,20	101,71
Potasio	mg/Kg	0,30	1,00	1 686,36
Selenio	mg/Kg	0,05	0,20	<0,20
Silicio	mg/Kg	0,02	0,07	1 316,52
Sodio	mg/Kg	0,03	0,10	240,81
Taño	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04
Titanio	mg/Kg	0,03	0,10	324,28
Torio	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03
Uranio	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03
Vanadio	mg/Kg	0,01	0,04	28,63
Zinc	mg/Kg	0,01	0,02	301,87

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *c*=< Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *c*=< Menor que el L.D.M.

*-: No ensayado

NA: No Aplica

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-8175

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZÓN SOCIAL	: JOEL CASAZOLA CASAZOLA
2.-DIRECCIÓN	: NO INDICA
3.-PROYECTO	: ELECTROREMEDIACION - TESIS
4.-PROCEDENCIA	: SAN MIGUEL DE VISO
5.-SOLICITANTE	: JOEL CASAZOLA CASAZOLA
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: 0000002690-2021-0000
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	: NO APLICA
8.-MUESTREADO POR	: EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2021-07-30

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO	: Suelos
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 1
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA	: 2021-07-14
4.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2021-07-14 al 2021-07-30



Gabby Moreno Muñoz
Jefe de Laboratorio
CIP N° 191207

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados.
No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R.L.
Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-9749
IV. RESULTADOS

ITEM	1	2
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-21-34422	M-21-34423
CÓDIGO DEL CLIENTE:	M-02	M-03
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA
PRODUCTO:	SUELOS	
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA	
FECHA y HORA DE MUESTREO :	12-08-2021 18:00	12-08-2021 18:00

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Metales Totales en suelos ICP MS ³					
Aluminio	mg/Kg	0,10	0,30	15 434,70	12 103,40
Antimonio	mg/Kg	0,06	0,20	<0,20	<0,20
Arsénico	mg/Kg	0,02	0,10	<0,10	<0,10
Bario	mg/Kg	0,01	0,03	131,57	86,77
Berilio	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Bismuto	mg/Kg	0,06	0,20	17,54	15,65
Boro	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Cadmio	mg/Kg	0,005	0,020	<0,020	<0,020
Calcio	mg/Kg	0,1	0,4	5 888,9	2 642,3
Cerio	mg/Kg	0,04	0,10	30,33	25,33
Cobalto	mg/Kg	0,05	0,20	<0,20	<0,20
Cobre	mg/Kg	0,005	0,020	200,758	172,073
Cromo	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Estaño	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Estroncio	mg/Kg	0,05	0,20	76,47	47,61
Fosforo	mg/Kg	0,04	0,10	1 375,94	1 217,44
Hierro	mg/Kg	0,06	0,20	36 408,68	30 116,44
Litio	mg/Kg	0,003	0,010	<0,010	<0,010

³ Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *<=" Menor que el L.D.M.

*": No ensayado

NA: No Aplica

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-9749

ITEM				1	2
CÓDIGO DE LABORATORIO:				M-21-34422	M-21-34423
CÓDIGO DEL CLIENTE:				M-02	M-03
COORDENADAS:				NO APLICA	NO APLICA
UTM WGS 84:				NO APLICA	NO APLICA
PRODUCTO:				SUELOS	
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:				NO APLICA	
FECHA y HORA DE MUESTREO:				12-08-2021 18:00	12-08-2021 18:00
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Magnesio	mg/Kg	0,06	0,20	5 029,20	4 317,27
Manganeso	mg/Kg	0,01	0,03	542,38	330,70
Mercurio	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04	<0,04
Molibdeno	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Niquel	mg/Kg	0,01	0,04	9,83	6,00
Plata	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Plomo	mg/Kg	0,05	0,20	134,12	127,21
Potasio	mg/Kg	0,30	1,00	2 363,33	1 809,37
Selenio	mg/Kg	0,05	0,20	<0,20	<0,20
Silicio	mg/Kg	0,02	0,07	231,11	243,49
Sodio	mg/Kg	0,03	0,10	298,44	241,74
Talio	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04	<0,04
Titanio	mg/Kg	0,03	0,10	330,62	285,89
Torio	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Uranio	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Vanadio	mg/Kg	0,01	0,04	43,38	37,89
Zinc	mg/Kg	0,01	0,02	740,07	285,82

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *<*= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *<*= Menor que el L.D.M.

*: No ensayado

NA: No Aplica

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

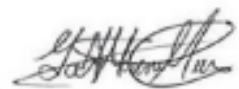
INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-9749

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL	: JOEL CASAZOLA CASAZOLA
2.-DIRECCIÓN	: NO INDICA
3.-PROYECTO	: ELECTORREMEDIACION-TESIS
4.-PROCEDENCIA	: SAN MIGUEL DE VISO
5.-SOLICITANTE	: JOEL CASAZOLA CASAZOLA
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: 0000002690-2021-0000
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	: NO APLICA
8.-MUESTREADO POR	: EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2021-08-24

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO	: Suelos
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 2
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA	: 2021-08-13
4.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2021-08-13 al 2021-08-24



Gabby Moreno Muñoz
Jefe de Laboratorio
CIP N° 151207

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados.
No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R.L.
Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-13462

IV. RESULTADOS

ITEM	1	2			
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-21-47130	M-21-47131			
CÓDIGO DEL CLIENTE:	M-7	M-8			
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA			
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA			
PRODUCTO:	SUELOS				
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA				
FECHA y HORA DE MUESTREO :	19-10-2021 18:00	19-10-2021 18:00			
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Metales Totales en suelos					
ICP MS ²					
Aluminio	mg/Kg	0,10	0,30	11 319,08	10 616,46
Antimonio	mg/Kg	0,06	0,20	<0,20	<0,20
Arsénico	mg/Kg	0,02	0,10	<0,10	<0,10
Bario	mg/Kg	0,01	0,03	134,29	80,72
Berilio	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Bismuto	mg/Kg	0,06	0,20	<0,20	<0,20
Boro	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Cadmio	mg/Kg	0,005	0,020	6,635	5,520
Calcio	mg/Kg	0,1	0,4	2 088,3	1 224,9
Cerio	mg/Kg	0,04	0,10	22,42	20,23
Cobalto	mg/Kg	0,05	0,20	6,16	4,27
Cobre	mg/Kg	0,005	0,020	165,277	170,219
Cromo	mg/Kg	0,01	0,03	7,50	8,09
Estaño	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Estroncio	mg/Kg	0,05	0,20	59,59	42,55
Fosforo	mg/Kg	0,04	0,10	1 334,32	2 102,76
Hierro	mg/Kg	0,06	0,20	34 988,56	34 306,82
Litio	mg/Kg	0,003	0,010	5,238	4,825

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

"-": No ensayado

NA: No Aplica

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-13462

ITEM	1	2
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-21-47130	M-21-47131
CÓDIGO DEL CLIENTE:	M-7	M-8
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA
PRODUCTO:	SUELOS	
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA	
FECHA y HORA DE MUESTREO:	19-10-2021 18:00	19-10-2021 18:00

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Magnesio	mg/Kg	0,06	0,20	4 992,18	4 473,77
Manganeso	mg/Kg	0,01	0,03	703,63	324,83
Mercurio	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04	<0,04
Molibdeno	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Niquel	mg/Kg	0,01	0,04	5,15	4,43
Plata	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Plomo	mg/Kg	0,05	0,20	129,58	129,68
Potasio	mg/Kg	0,30	1,00	2 329,35	1 532,67
Selenio	mg/Kg	0,05	0,20	<0,20	<0,20
Silicio	mg/Kg	0,02	0,07	432,41	485,86
Sodio	mg/Kg	0,03	0,10	178,69	157,56
Talio	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04	<0,04
Titanio	mg/Kg	0,03	0,10	286,48	308,54
Torio	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Uranio	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Vanadio	mg/Kg	0,01	0,04	32,58	33,63
Zinc	mg/Kg	0,01	0,02	549,15	242,83

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *<*= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *<*= Menor que el L.D.M.

*.: No ensayado

NA: No Aplica

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-13462

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZÓN SOCIAL	: JOEL CASAZOLA CASAZOLA
2.-DIRECCIÓN	: NO INDICA
3.-PROYECTO	: ELECTROREMEDIACIÓN TESIS
4.-PROCEDENCIA	: SAN MIGUEL-HUAROCHIRI
5.-SOLICITANTE	: JOEL CASAZOLA CASAZOLA
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: 000002690-2021-0000
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	: NO APLICA
8.-MUESTREO POR	: EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2021-10-26

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO	: Suelos
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 2
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA	: 2021-10-20
4.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2021-10-20 al 2021-10-26



Gaby Moreno Muñoz
Jefe de Laboratorio
CIP N° 191207

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados.
No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R.L.
Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-13864

IV. RESULTADOS

ITEM	1	2
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-21-48832	M-21-48833
CÓDIGO DEL CLIENTE:	M-9	M-10
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA
PRODUCTO:	SUELOS	
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA	
FECHA y HORA DE MUESTREO:	26-10-2021 18:00	26-10-2021 18:00

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Metales Totales en suelos					
ICP MS					
Aluminio ²	mg/Kg	0,10	0,30	9 730,08	10 223,73
Antimonio ²	mg/Kg	0,06	0,20	<0,20	<0,20
Arsénico ²	mg/Kg	0,02	0,10	<0,10	<0,10
Bario ²	mg/Kg	0,01	0,03	75,16	91,78
Berilio ²	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Bismuto ²	mg/Kg	0,06	0,20	12,13	12,82
Boro ²	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Cadmio ²	mg/Kg	0,005	0,020	<0,020	<0,020
Calcio ²	mg/Kg	0,1	0,4	1 349,4	2 229,7
Cerio ²	mg/Kg	0,04	0,10	18,35	20,13
Cobalto ²	mg/Kg	0,05	0,20	3,26	4,67
Cobre ²	mg/Kg	0,005	0,020	152,106	150,467
Cromo ²	mg/Kg	0,01	0,03	5,79	5,61
Estaño ²	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Estroncio ²	mg/Kg	0,05	0,20	38,96	58,01
Fosforo ²	mg/Kg	0,04	0,10	1 194,21	1 907,04
Hierro ²	mg/Kg	0,06	0,20	30 876,95	31 603,33
Litio ²	mg/Kg	0,003	0,010	<0,010	<0,010

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "²"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "²"= Menor que el L.D.M.

"²": No ensayado

NA: No Aplica

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-13864

ITEM	1		2		
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-21-48832		M-21-48833		
CÓDIGO DEL CLIENTE:	M-9		M-10		
COORDENADAS:	NO APLICA		NO APLICA		
UTM WGS 84:	NO APLICA		NO APLICA		
PRODUCTO:	SUELOS				
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA				
FECHA y HORA DE MUESTREO:	26-10-2021 18:00		26-10-2021 18:00		
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Magnesio ²	mg/Kg	0,06	0,20	4 316,59	4 443,67
Manganeso ²	mg/Kg	0,01	0,03	333,09	432,54
Mercurio ²	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04	<0,04
Molibdeno ²	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Niquel ²	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04	<0,04
Plata ²	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Plomo ²	mg/Kg	0,05	0,20	113,86	119,72
Potasio ²	mg/Kg	0,30	1,00	1 478,41	1 597,98
Selenio ²	mg/Kg	0,05	0,20	<0,20	<0,20
Silicio ²	mg/Kg	0,02	0,07	313,17	343,99
Sodio ²	mg/Kg	0,03	0,10	133,71	152,04
Talio ²	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04	<0,04
Titanio ²	mg/Kg	0,03	0,10	266,14	280,33
Torio ²	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Uranio ²	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Vanadio ²	mg/Kg	0,01	0,04	29,28	29,67
Zinc ²	mg/Kg	0,01	0,02	242,12	377,82

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

"-": No ensayado

NA: No Aplica

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-13864

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL : JOEL CASAZOLA CASAZOLA
2.-DIRECCIÓN : NO INDICA
3.-PROYECTO : ELECTROREMEDIACION TESIS
4.-PROCEDENCIA : SAN MIGUEL DE VISO - HUAROCHIRI
5.-SOLICITANTE : JOEL CASAZOLA CASAZOLA
6.-ORDEN DE SERVICIO N° : 0000002690-2021-0000
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : NO APLICA
8.-MUESTREADO POR : EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME : 2021-11-05

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO : Suelos
2.-NÚMERO DE MUESTRAS : 2
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA : 2021-10-27
4.-PERÍODO DE ENSAYO : 2021-10-27 al 2021-11-05



Gaby Moreno Muñoz
Jefe de Laboratorio
CIP N° 191207

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados.
No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R. L.
Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-14155

IV. RESULTADOS

ITEM	1	2
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-21-50538	M-21-50539
CÓDIGO DEL CLIENTE:	M-11	M-12
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA
PRODUCTO:	SUELOS	
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA	
FECHA y HORA DE MUESTREO :	02-11-2021 16:00	02-11-2021 16:00

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Metales Totales en suelos					
ICP MS					
Aluminio ²	mg/Kg	0,10	0,30	7 738,77	8 581,75
Antimonio ²	mg/Kg	0,06	0,20	<0,20	<0,20
Arsénico ²	mg/Kg	0,02	0,10	30,15	29,27
Bario ²	mg/Kg	0,01	0,03	80,66	94,64
Berilio ²	mg/Kg	0,01	0,03	0,14	0,16
Bismuto ²	mg/Kg	0,06	0,20	<0,20	<0,20
Boro ²	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Cadmio ²	mg/Kg	0,005	0,020	4,161	3,981
Calcio ²	mg/Kg	0,1	0,4	1 986,3	2 290,4
Cerio ²	mg/Kg	0,04	0,10	15,90	16,17
Cobalto ²	mg/Kg	0,05	0,20	4,24	5,70
Cobre ²	mg/Kg	0,005	0,020	149,985	149,128
Cromo ²	mg/Kg	0,01	0,03	3,80	4,15
Estaño ²	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Estroncio ²	mg/Kg	0,05	0,20	42,44	55,89
Fosforo ²	mg/Kg	0,04	0,10	1 119,80	1 800,47
Hierro ²	mg/Kg	0,06	0,20	28 729,50	28 645,27
Litio ²	mg/Kg	0,003	0,010	2,401	2,874

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, " $<$ "= Menor que el L.C.M.
L.D.M.: Límite de detección del método, " $<$ "= Menor que el L.D.M.

"*": No ensayado
NA: No Aplica

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-14155

ITEM	1	2
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-21-50538	M-21-50539
CÓDIGO DEL CLIENTE:	M-11	M-12
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA
PRODUCTO:	SUELOS	
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA	
FECHA y HORA DE MUESTREO:	02-11-2021 16:00	02-11-2021 16:00

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Magnesio ²	mg/Kg	0,06	0,20	3 878,30	4 265,38
Manganeso ²	mg/Kg	0,01	0,03	424,29	546,39
Mercurio ²	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04	<0,04
Molibdeno ²	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Niquel ²	mg/Kg	0,01	0,04	3,06	3,35
Plata ²	mg/Kg	0,03	0,10	0,15	0,19
Plomo ²	mg/Kg	0,05	0,20	100,62	106,90
Potasio ²	mg/Kg	0,30	1,00	1 293,57	1 505,39
Selenio ²	mg/Kg	0,05	0,20	<0,20	<0,20
Silicio ²	mg/Kg	0,02	0,07	383,88	441,60
Sodio ²	mg/Kg	0,03	0,10	65,78	57,97
Talio ²	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04	<0,04
Titanio ²	mg/Kg	0,03	0,10	273,86	265,40
Torio ²	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Uranio ²	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Vanadio ²	mg/Kg	0,01	0,04	25,07	25,16
Zinc ²	mg/Kg	0,01	0,02	312,32	284,90

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "²<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "²<"= Menor que el L.D.M.

"²": No ensayado

NA: No Aplica

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-14155

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZÓN SOCIAL	: JOEL CASAZOLA CASAZOLA
2.-DIRECCIÓN	: NO INDICA
3.-PROYECTO	: ELECTROREMEDIACION TESIS
4.-PROCEDENCIA	: SAN MIGUEL DE VISO - HUARICHIRI
5.-SOLICITANTE	: JOEL CASAZOLA CASAZOLA
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: 0000002690-2021-0000
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	: NO APLICA
8.-MUESTREO POR	: EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2021-11-15

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO	: Suelto
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 2
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA	: 2021-11-03
4.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2021-11-03 al 2021-11-15



Gaby Moreno Muñoz
Jefe de Laboratorio
CIP N° 191207

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados.
No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R.L.
Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-16392
IV. RESULTADOS

ITEM	1	2
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-21-62911	M-21-62912
CÓDIGO DEL CLIENTE:	M-13	M-14
COORDENADAS:	NO APLICA	NO APLICA
UTM WGS 84:	NO APLICA	NO APLICA
PRODUCTO:	SUELOS	
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA	
FECHA y HORA DE MUESTREO :	05-12-2021 11:00	05-12-2021 11:00

ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Metales Totales en suelos					
ICP MS					
Aluminio ²	mg/Kg	0,10	0,30	20 404,00	20 519,73
Antimonio ²	mg/Kg	0,06	0,20	<0,20	<0,20
Arsénico ²	mg/Kg	0,02	0,10	38,33	45,19
Bario ²	mg/Kg	0,01	0,03	165,02	172,19
Berilio ²	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Bismuto ²	mg/Kg	0,06	0,20	24,94	25,20
Boro ²	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Cadmio ²	mg/Kg	0,005	0,020	<0,020	<0,020
Calcio ²	mg/Kg	0,1	0,4	5 430,5	6 566,6
Cerio ²	mg/Kg	0,04	0,10	31,51	32,36
Cobalto ²	mg/Kg	0,05	0,20	4,51	5,36
Cobre ²	mg/Kg	0,005	0,020	270,682	288,623
Cromo ²	mg/Kg	0,01	0,03	0,65	2,97
Estaño ²	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Estroncio ²	mg/Kg	0,05	0,20	106,59	119,21
Fosforo ²	mg/Kg	0,04	0,10	3 138,43	3 160,61
Hierro ²	mg/Kg	0,06	0,20	55 002,27	60 342,00
Litio ²	mg/Kg	0,003	0,010	<0,010	<0,010

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *<=" Menor que el L.D.M.

*: No ensayado

NA: No Aplica

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-16392

ITEM	1		2		
CÓDIGO DE LABORATORIO:	M-21-62911		M-21-62912		
CÓDIGO DEL CLIENTE:	M-13		M-14		
COORDENADAS:	NO APLICA		NO APLICA		
UTM WGS 84:	NO APLICA		NO APLICA		
PRODUCTO:	SUELOS				
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:	NO APLICA				
FECHA y HORA DE MUESTREO:	05-12-2021 11:00		05-12-2021 11:00		
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS	
Magnesio ²	mg/Kg	0,06	0,20	7 760,94	7 956,37
Manganeso ²	mg/Kg	0,01	0,03	824,55	841,78
Mercurio ²	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04	<0,04
Molibdeno ²	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Niquel ²	mg/Kg	0,01	0,04	4,51	5,38
Plata ²	mg/Kg	0,03	0,10	<0,10	<0,10
Plomo ²	mg/Kg	0,05	0,20	193,49	192,35
Potasio ²	mg/Kg	0,30	1,00	3 075,65	3 193,74
Selenio ²	mg/Kg	0,05	0,20	<0,20	<0,20
Silicio ²	mg/Kg	0,02	0,07	883,89	865,82
Sodio ²	mg/Kg	0,03	0,10	370,92	395,88
Talio ²	mg/Kg	0,01	0,04	<0,04	<0,04
Titanio ²	mg/Kg	0,03	0,10	618,28	607,45
Torio ²	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Uranio ²	mg/Kg	0,01	0,03	<0,03	<0,03
Vanadio ²	mg/Kg	0,01	0,04	45,03	50,93
Zinc ²	mg/Kg	0,01	0,02	677,31	708,01

² Ensayo acreditado por el IAS

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, *<=" Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, *<=" Menor que el L.D.M.

*": No ensayado

NA: No Aplica

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-16392

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL : JOEL CASAZOLA CASAZOLA
2.-DIRECCIÓN : NO INDICA
3.-PROYECTO : ANALISIS DE SUELO
4.-PROCEDENCIA : SAN MIGUEL DE VUO
5.-SOLICITANTE : JOEL CASAZOLA CASAZOLA
6.-ORDEN DE SERVICIO N° : 000006153-2021-0000
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO : NO APLICA
8.-MUESTREADO POR : EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME : 2021-12-21

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO : Suelos
2.-NÚMERO DE MUESTRAS : 2
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA : 2021-12-06
4.-PERÍODO DE ENSAYO : 2021-12-06 al 2021-12-21



Gabby Moreno Muñoz
Jefe de Laboratorio
CIP N° 191207

Los resultados contenidos en el presente documento sólo están relacionados con los ítems ensayados.
No se debe reproducir el informe de ensayo, excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita de Analytical Laboratory E.I.R.L.
Los resultados de los ensayos, no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.