

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**INFLUENCIA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA REMOCIÓN DE CARGA
ORGÁNICA DE LIXIVIADO DE UNA INFRAESTRUCTURA DE RESIDUOS
SÓLIDOS A ESCALA DE LABORATORIO**

Tesis

para optar el título de:

INGENIERA

AMBIENTAL

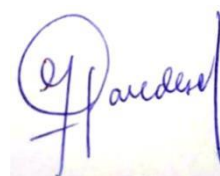
QUISPE HUAMANI KARINA ERICKA

Asesor

Ing. M.Sc. PAREDES SALAZAR JOSÉ LUIS

Tingo María – Perú

2024





ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N°106-2024-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 16 de agosto de 2024, a horas 12:00 p.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

“INFLUENCIA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DE LIXIVIADO DE UNA INFRAESTRUCTURA DE RESIDUOS SÓLIDOS A ESCALA DE LABORATORIO”

Presentado por el Bachiller: **QUISPE HUAMANI, KARINA ERICKA**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “**MUY BUENA**”.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 22 de octubre de 2024

Ing. MSc. FRANKLIN DIONISIO MONTALVO
PRESIDENTE

Blgo. MSc. CESAR AUGUSTO GOZME SULCA
MIEMBRO

Ing. MSc. ALBERTO F. CERNA CUEVA
MIEMBRO



Ing. MSc. JOSE LUIS PAREDES SALAZAR
ASESOR



"Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 003 - 2025 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis

X

Trabajo de Suficiencia Profesional

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
INFLUENCIA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA REMOCIÓN DE CARGA ORGÁNICA DE LIXIVIADO DE UNA INFRAESTRUCTURA DE RESIDUOS SÓLIDOS A ESCALA DE LABORATORIO	QUISPE HUAMANI KARINA ERICKA	22 % Veintidós

Tingo Maria, 13 de enero de 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Dr. Tomas Menacho Maniqui
JEFE
C.C. Archivo

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos, por ser mi motivo para seguir adelante, por impulsarme a culminar esta investigación, animándome cada día, bendiciendo mi vida con su amor y apoyo .

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme siempre fuerzas para continuar este camino, y en medio de todo ser mi guía, dándome sabiduría e inteligencia para crecer en mi vida profesional.

A mi asesor el Ing. Msc. José Luis Paredes Salazar, por su paciencia, motivación y ayuda incondicional, para poder culminar mi trabajo de investigación y por sus conocimientos compartidos para mi desarrollo profesional.

Al Ing. Msc Franklin Dionisio Montalvo, Bgo. Msc. Cesar Augusto Gozme Sulca y Ing. Msc. Alberto Franco Cerna Cueva, mis jurados de tesis, por brindarme su tiempo, paciencia y su apoyo constante en el desarrollo de mi trabajo de investigación.

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, la faculta de Recursos Naturales Renovables y La escuela de Posgrado, por ayudarme en mi desarrollo profesional y brindarme enseñanzas de calidad.

A mi familia, por su apoyo incondicional en mi desarrollo profesional, a lo largo de mis estudios.

INDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

I.	INTRODUCCION	1
1.1.	Objetivos.....	2
1.1.1.	Objetivo General:.....	2
1.1.2.	Objetivos específicos	2
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1.	Antecedentes.....	3
2.2.	Los lixiviados.....	4
2.3.	Características de los lixiviados.....	4
2.4.	La carga orgánica en los lixiviados.....	4
2.5.	Potencial de contaminación de los lixiviados	5
2.6.	El proceso de electrocoagulación.....	6
2.7.	Parámetros de control en la electrocoagulación.....	8
2.7.1.	Arreglo de electrodos.....	8
2.7.2.	Efecto del tiempo de electrólisis	9
2.7.3.	Distancia entre electrodos.....	9
2.7.4.	Efecto de la densidad de corriente	9
2.7.5.	Efecto del pH.....	10
2.7.6.	Efecto de la temperatura	10
2.7.7.	Efecto de la concentración inicial de contaminantes	10

III.	MATERIALES Y METODOS.....	12
3.1.	Lugar de ejecución.....	12
3.1.1.	Características climáticas.....	12
3.2.	Materiales y Equipos.	13
3.3.	Criterios de estudio.....	13
3.3.1.	Nivel de investigación.....	13
3.3.2.	Tipo de investigación.....	13
3.3.3.	Método de investigación.....	14
3.3.4.	Diseño de investigación.....	14
3.3.5.	VARIABLES DE INVESTIGACIÓN.....	14
3.3.6.	Análisis estadístico.....	16
3.4.	Metodología.....	16
3.4.1.	Caracterización del lixiviado de un relleno sanitario con los parámetros fisicoquímicos: DBO, DQO, pH, ST.	16
3.4.2.	Determinación del voltaje y el material electrodo en la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de carga orgánica como DQO, de un lixiviado, a escala de laboratorio.	18
3.4.3.	Determinación del voltaje y del uso alternado de material del electrodo en la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de carga orgánica como DQO, de un lixiviado a escala de laboratorio.....	19
IV.	RESULTADOS Y DISCUSION.....	20
4.1.	Caracterización del lixiviado de un relleno sanitario con los parámetros fisicoquímicos: DBO, DQO, pH, ST.....	20
4.2.	Determinación del voltaje y el material electrodo en la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de carga orgánica como DQO, de un lixiviado, a escala de laboratorio.	22
4.3.	Determinación el efecto del voltaje y del uso alternado de material del electrodo en la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de carga orgánica como DQO, de un lixiviado a escala de laboratorio.....	27
V.	CONCLUSIONES.....	32
VI.	PROPUESTAS A FUTURO.....	33
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	34

VIII. ANEXOS	38
8.1. Datos experimentales de la investigación	38
8.2. Análisis estadístico de los datos experimentales con el software Infostat-versión libre.	48
8.3. Imágenes del desarrollo de la investigación.....	51

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1. Niveles de las variables de la investigación.....	15
Tabla 2. Matriz de diseño tipo factorial completo 3^2	16
Tabla 3. Características fisicoquímicas del lixiviado utilizado en la investigación.....	20
Tabla 4. Valor de DQO final del lixiviado a diferentes voltajes y con electrodo de aluminio.....	23
Tabla 5. Remoción de DQO del lixiviado a diferentes voltajes y con electrodo de aluminio.....	23
Tabla 6. Remoción de DQO del lixiviado a diferentes voltajes y con electrodos de aluminio, hierro y cobre.....	28
Tabla 7. Resultados de los análisis realizados para la caracterización del lixiviado.....	38
Tabla 8. Resultados de la DQO final obtenida en cada tratamiento de la investigación.....	46
Tabla 9. Resultados de la DQO final del lixiviado de cada tratamiento realizado con ánodos de aluminio, hierro y cobre.....	46

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Diagrama de un reactor EC a escala de banco. Reacciones anódicas	7
Figura 2. Ubicación geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva	12
Figura 3. Prototipo de celda de electrocoagulación (Arango y Garcés, 2007)	18
Figura 4. Lixiviado colectado para el proceso de electrocoagulación de la investigación	23
Figura 5. Celda de electrocoagulación con proceso batch adaptada para los experimentos.....	23
Figura 6. Porcentaje de reducción de DQO del lixiviado con electrodo de aluminio a diferentes voltajes.....	27
Figura 7. Porcentaje de reducción de DQO del lixiviado con electrodos de aluminio, fierro y cobre a diferentes voltajes.....	28
Figura 8. Pruebas preliminares para la implementación del sistema de electrocoagulación de la investigación.	51
Figura 9. Pruebas de funcionamiento del sistema de electrocoagulación de la investigación	51
Figura 10. Tratamiento del lixiviado al inicio de la electrocoagulación con 16 V.....	51
Figura 11. Vista planta de la celda de electrocoagulación cargada con lixiviado	51
Figura 12. Formación de fases en la celda de electrocoagulación.....	52
Figura 13. Tratamiento de lixiviado con electrocoagulación a 20 voltios.....	52
Figura 14. Final de tratamiento de lixiviado con electrocoagulación a 24 voltios	53
Figura 15. Toma de muestras del lixiviado tratado para el análisis de DQO	53
Figura 16. Muestras de los tratamientos de lixiviado con diferentes voltajes para el análisis de DQO.....	54

RESUMEN

Esta investigación fue desarrollada para determinar la eficiencia en reducción de la DQO de un lixiviado, mediante un proceso de electrocoagulación, operado en forma simultánea con tres materiales como ánodos. El estudio fue realizado a una escala de laboratorio, con un lixiviado procedente de las celdas transitorias de la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado- Tingo María, Huánuco, Perú y en una celda de electrocoagulación construida de vidrio. El lixiviado fue colectado y caracterizado, con una DQO de 9972,33 mg/L y un pH de 8,17. Los electrodos utilizados en la electrocoagulación, fueron aluminio, fierro y cobre y se aplicó una energía eléctrica de 16 V, 20V y 24V por un tiempo de 45 minutos por cada tratamiento. La parte experimental evaluó el efecto en reducción de la DQO de lixiviado usando ánodos de aluminio, aluminio-fierro y aluminio-fierro y cobre. La mayor eficiencia de reducción de la DQO se obtuvo utilizando aluminio, fierro y cobre, que fue 98.97%, con 24 voltios de energía.

Palabras clave: Celda de electrocoagulación, aluminio, fierro, cobre, lixiviado, DQO, voltaje.

ABSTRACT

Influence of voltage and electrode material on electrocoagulation for the removal of organic charge from a leachate on a laboratory scale.

This research was developed to determine the efficiency in reducing the COD of a leachate, through an electrocoagulation process, operated simultaneously with three materials as anodes. The study was carried out on a laboratory scale, with a leachate from the transient cells of the Provincial Municipality of Leoncio Prado- Tingo María, Huánuco, Peru and in an electrocoagulation cell made of glass. The leachate was collected and characterized, with a COD of 9972.33 mg/L and a pH of 8.17. The electrodes used in electrocoagulation were aluminum, iron and copper and electrical energy of 16 V, 20V and 24V was applied for a period of 45 minutes for each treatment. The experimental part evaluated the effect on leachate COD reduction using aluminum, aluminum-iron and aluminum-iron and copper anodes. The highest COD reduction efficiency was obtained using aluminum, iron and copper, which was 98.97%, with 24 volts of energy. On the other hand, the application of higher voltage electrical energy allowed a greater reduction in the COD of the leachate.

Keywords: Electrocoagulation cell, aluminum, iron, copper, leachate, COD, voltage.

I. INTRODUCCION

En la mayoría de los países, el relleno sanitario es hoy en día la forma más común de eliminar los residuos sólidos urbanos. A pesar de las muchas ventajas, la generación de lixiviados muy contaminados, que presentan variaciones significativas tanto en el caudal volumétrico como en la composición química, constituye un gran inconveniente. Año tras año, el reconocimiento del impacto de los lixiviados de los vertederos en el medio ambiente ha obligado a las autoridades a fijar requisitos cada vez más estrictos para el control de la contaminación. Los lixiviados son líquidos oscuros que se producen por la descomposición de la materia orgánica y el agua que entra al relleno por la precipitación, los cuales, al fluir, disuelven sustancias y arrastran partículas contenidas en los residuos.

Los tratamientos convencionales de lixiviados de vertederos se pueden clasificar en tres grandes grupos, un primer grupo en el cual se realiza la transferencia de lixiviados: reciclado y tratamiento combinado con aguas residuales domésticas, un segundo grupo que abarca la biodegradación de lixiviados mediante procesos aeróbicos y anaeróbicos y un tercer grupo en el cual se aplican procesos químicos y físicos tales como oxidación química, adsorción, precipitación química, coagulación/floculación, sedimentación/flotación y extracción con aire.

Las descargas de un relleno sanitario consisten principalmente en lixiviados que se ha convertido en tema de interés reciente, ya que podría ser considerada como un agua residual fuertemente contaminada con emanación de biogás, que es un recurso que se puede utilizar para la producción de energía.

En la actualidad las investigaciones para la tratabilidad de los lixiviados siguen desarrollándose con el fin de encontrar una tecnología o las tecnologías que permitan reducir la contaminación de estos residuos líquidos. Aunque la coagulación es una de las técnicas que se han ensayado para este fin, debemos mencionar también a la electrocoagulación con una alternativa de tratamiento que se realiza con la aplicación de energía eléctrica.

La electrocoagulación es un proceso que implica la formación in situ del coagulante que podría actuar como adsorbente para la eliminación de iones en solución. Este método está desarrollado para reemplazar la coagulación química, se afirma que la electrocoagulación es simple, por lo que la operación es fácil, aunque se consideró poco práctico debido al alto

costo de la electricidad, pero no se puede negar el aspecto ecológico de este método (Moussa et al., 2017).

Este proyecto se enfoca a evaluar la tratabilidad de un lixiviado, mediante la electrocoagulación. Por tal razón se plantea la siguiente interrogante: ¿Cuánto influye el voltaje y el material de electrodos en la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de carga orgánica de un lixiviado a escala de laboratorio?, planteándose la siguiente hipótesis: Que a mayor voltaje y más tipos de materiales de electrodo utilizados en la aplicación de la electrocoagulación, mayor es la reducción de la carga orgánica de un lixiviado a escala de laboratorio

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General:

Evaluar la influencia del voltaje y el material de electrodos en la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de carga orgánica de un lixiviado a escala de laboratorio de una infraestructura de disposición final de residuos sólidos a escala laboratorio.

1.1.2. Objetivos específicos

Caracterizar el lixiviado de un relleno sanitario con los parámetros fisicoquímicos: DBO, DQO, pH, ST.

Determinar el voltaje y el material de electrodo en la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de carga orgánica como DQO, de un lixiviado, a escala de laboratorio.

Determinar la remoción del efecto del voltaje y del uso alternado de material del electrodo en la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de carga orgánica como DQO, de un lixiviado a escala de laboratorio.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

Rookesh (2022), estudiaron, el empleo del proceso de electrocoagulación para eliminar demanda química de oxígeno (DQO), NH_4^+ , sólidos disueltos totales (TDS), sólidos suspendidos totales (TSS), turbidez y color de los lixiviados de los vertederos. Se utilizó cal como pretratamiento, luego el Fe/Gr y se utilizaron electrodos de Ti/PbO₂/acero, y se seleccionó el electrodo óptimo. Adicionalmente evaluaron el efecto del pH, la densidad de corriente, la temperatura, la distancia entre electrodos, y el tipo de electrolito. Los resultados mostraron que DQO alcanzó un valor de 22,371, mg/L), 13,8 (ms/cm³), representando un 32,4% de eficiencia. Esto se logró con el electrodo de Fe/Gr a un pH de 7,5, densidad de corriente de 64 mA/cm², la distancia entre electrodos era igual a 1,5 cm, temperatura a 20 °C y tiempo de retención de 2 a 4 h.

Rusdianasari (2017), realizó un estudio para conocer la eficacia de la electrocoagulación para reducir la DBO₅, DQO, NH₃-N y plomo (Pb) de lixiviados. Los electrodos utilizados fueron de aluminio, se trabajó con una densidad de corriente 30 A/m² y 60 minutos de tiempo de proceso. El resultado que se puede resaltar fue una reducción de 73,77% de DQO y el incremento de pH de 8.03 a 8.95.

Paitan y Sifuentes (2018), desarrollaron una investigación para evaluar la eficiencia de la electrocoagulación en la depuración de aguas residuales de matadero analizando su efecto sobre la DQO, DBO, turbidez y otros parámetros fisicoquímicos. En su investigación evaluaron intensidad de corriente y tiempo de exposición de. Los autores reportaron que con densidad de corriente de 33,88 amp/m² y a un tiempo de exposición de 30 minutos, se logra una mayor reducción de contaminantes.

Loayza y Ochoa (2020), investigaron la remoción de materia orgánica en un lixiviado de botadero en el Tambo, mediante coagulación, estos autores caracterizaron el lixiviado determinando valores de DQO 9962,6 mg/l, DBO₅ 6822,5 mg/l, conductividad eléctrica igual a 3620,0 μSm/cm y sólidos totales 4297,0 mg/l. Con una tensión de corriente de 20 voltios y un pH neutro de lixiviado que se elevó a un valor de 8, lograron remover 91 % de la DQO y un 94 % en la DBO₅.

2.2. Los lixiviados

Para definir lixiviado, debemos mencionar que es un tipo de contaminante líquido que se forma por la descomposición bioquímica de residuos orgánicos, al ser acumulados en un relleno sanitario y debido a esa degradación la materia orgánica va perdiendo agua, que realmente es una solución compuesta con gran variedad de compuestos químicos, que van percolando y arrastrando otros compuestos, ayudados por las condiciones del medio (Mercedes, 2021)

Los lixiviados se vuelven más críticos respecto a su potencial contaminante cuando entran en contacto con la lluvia y se infiltran en el suelo a mayores profundidades (Coloma y Alcivar., 2021).

2.3. Características de los lixiviados

Un lixiviado es muy variado en sus características, las cuales quedan determinadas, por la composición de los residuos, la humedad y la temperatura (Costa et al. 2019).

La forma más convencional de referirse a los lixiviados es por la edad, según este parámetro pueden ser jóvenes, intermedios y maduros. Los lixiviados jóvenes generalmente tienen un pH ácido y alto contenido de materia orgánica, pero cuando ya están intermedios o maduros, el pH se eleva e incrementa su contenido de compuestos amoniacales (Revista Ciencia en Desarrollo, 2021).

El estado de los vertederos es determinante en las características de los lixiviado, siendo relevante el tipo de residuo, las condiciones operativas, el clima, la hidrogeología y la edad (Dabaghian, 2018).

2.4. La carga orgánica en los lixiviados

La carga orgánica en los lixiviados, es la carga remanente que no ha podido ser biodegradada, generalmente es estable, ya que, en su fase inicial, se produce una fermentación ácida de los compuestos orgánicos, donde las moléculas de cadenas carbonadas grande sufren una hidrólisis, como resultado, se forman los ácidos grasos volátiles y disminuye el pH, posteriormente sigue la degradación llegando hacia la fase metanogénica, donde da como resultado el biogas. Luego de este proceso lo que queda remanente forma parte de la carga orgánica de los lixiviados (Renou et al.,2008).

2.5. Potencial de contaminación de los lixiviados

Los principales contaminantes en los lixiviados son la materia orgánica y el amoníaco, en donde si la edad del vertedero aumenta, la concentración de materia orgánica (DQO) en el lixiviado disminuyó de 1800 mg/L en el segundo año a 610 mg/L en el sexto año. Aumento de la concentración de nitrógeno amoniacal de 98 mg a 364 mg NNH_4/l también se producen a medida que aumenta la edad del vertedero. Las fluctuaciones del otro parámetro (fósforo, cloruro, calcio, magnesio, sulfato, sólidos disueltos, metales pesados, también depende de la estación del año (variación estacional) y la edad del vertedero. Los datos informados también mostraron que, a pesar de que el vertedero aún se encuentra en una edad temprana, algunos parámetros como el valor de pH alto (promedio 7,84, la concentración de DQO es baja (<2000 mg DQO/L), la relación DBO/DQO es baja ($<0,4$), y las concentraciones de metales pesados también es baja, por lo que se puede indicar que la caracterización es influenciado por las condiciones en el relleno metagónico al inicio del período de monitoreo. La caracterización de los lixiviados del vertedero generalmente está representada por el DQO, carbono orgánico total (TOC), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la proporción de DBO/DQO, pH, sólidos en suspensión (SS), nitrógeno amónico ($\text{NH}_3\text{-N}$), nitrógeno Kjeldahl total (TKN), el número de bacterias, turbidez y valores de metales pesados. Concentración de lixiviado los parámetros cambian según la edad del lixiviado (Yusmartini et al.,2008)

Los impactos generales de los rellenos sanitarios de residuos no peligrosos se producen en el suelo, fuentes de agua, aire y el entorno natural. Los componentes del lixiviado, generan problemas ambientales impactando al suelo y los recursos hídricos. Cuando los desechos se trasladan a un vertedero y se entierran, se producen varias series de reacciones biológicas y químicas lugar para la descomposición de los desechos. Estas reacciones se pueden clasificar en cuatro fases diferentes, que son fase aeróbica inicial, fase ácida anaeróbica, fase metanogénica inicial y fase estable. El estado general del vertedero influye en el proceso de descomposición además de reacciones, existe una relación directa entre la etapa de descomposición y las características del lixiviado. Debido a que los desechos se entierran en vertederos a lo largo de los años, por lo tanto, en cada período de tiempo, diferentes partes del vertedero están sujetas a diferentes reacciones de descomposición y generar lixiviados con diferentes características. La naturaleza de los residuos es heterogénea y las características de funcionamiento de los vertederos son variadas, por lo que el ecosistema de los vertederos es variado en diferentes partes. Aunque

el ecosistema se ve afectado por condiciones ambientales como la temperatura, el pH, la presencia de toxinas, el contenido de humedad y el potencial de oxidación-reducción, la diversidad del ecosistema del vertedero es estable. La estabilización de residuos ocurre en cinco fases separadas y distintas y la cantidad y los componentes del lixiviado producido durante cada una de estas fases son los mismos (Iravanian y Ravari.,2020).

2.6. El proceso de electrocoagulación

El proceso de electrocoagulación implica una reacción de oxidación y reducción en la que se produce la desestabilización de contaminantes (suspendidos, emulsionados o disueltos) ocurre debido a la aplicación de corriente eléctrica a la solución electrolítica. La unidad EC consta de una celda electrolítica y electrodos de metal (Al o Fe) que están conectados a una fuente de alimentación externa. Las placas de metal conductor son bien conocidas como "electrodos de sacrificio" que son hecho de materiales iguales o completamente diferentes como ánodo o cátodo. En el proceso EC, disolución anódica genera coagulantes in situ junto con iones de hidroxilo y gas hidrógeno en el cátodo. Estas coagulantes in situ provocar la formación de flóculos en forma de hidróxidos y/o polihidróxidos metálicos (Al o Fe). El gas de hidrógeno generado en el cátodo lleva flóculos a la superficie del agua proporcionando mayor flotabilidad (Bharath et al.,2018).

La configuración del reactor EC varía con el número de electrodos y la disposición de los electrodos (monopolar o bipolar). El mecanismo de reacción del método electroquímico utilizando electrodos de aluminio y hierro se muestra en la Figura 2. En una corriente eléctrica aplicada, la oxidación del material anódico y la reducción del material catódico toma lugar (Bharath et al.,2018).

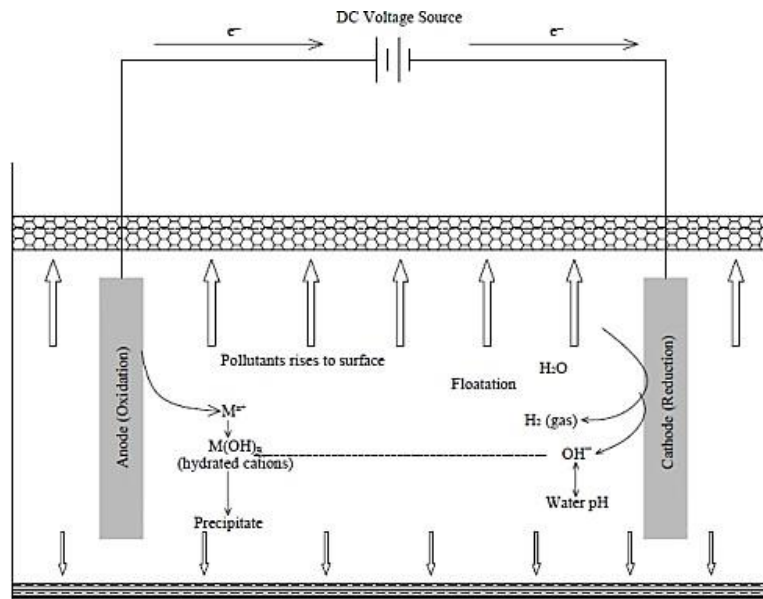
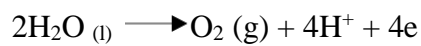
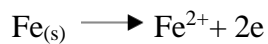
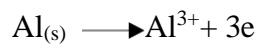
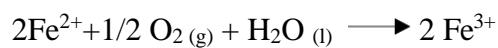


Figura 1. Diagrama de un reactor EC a escala de banco. Reacciones anódicas



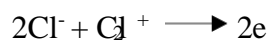
La oxidación del ánodo o el oxígeno atmosférico oxida el ion ferroso a Fe³⁺



Reacciones catódicas:



Además, en presencia de cloruro y alto potencial de ánodo, las reacciones posteriores pueden ocurrir en la celda de CE siguientes:



Los cationes metálicos producidos electroquímicamente (Fe^{3+} o Al^{3+}) reaccionarán espontáneamente y producirán hidróxido y/o polihidróxidos correspondientes según cinéticas de precipitación complejas. Muchos monoméricos especies de Al^{3+} tales como $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ y $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ y especies poliméricas como $\text{Al}_6(\text{OH})^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})^{4+}$ y $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{4+}$ se transforman en $\text{Al}(\text{OH})_3$. Similarmente iones férricos especies como FeOH^{2+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5\text{OH}^{2+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2^{4+}$ y $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_4^{2+}$ se transforma en $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Estos $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$ insolubles permanecen en el medio acuoso y desestabilizan los contaminantes por terminación o atracción electrostática seguida de coagulación. La formación de estos complejos es altamente dependiente del pH. La desestabilización de los contaminantes ocurre principalmente a través de dos mecanismos, es decir: (i) Los productos de hidrólisis catiónica neutralizan los coloides cargados negativamente. (ii) Floculación de barrido: atrapamiento y eliminación de contaminantes en forma de precipitado de hidróxido amorfo. Las burbujas de gas H_2 y O_2 se adhieren a los aglomerados que se liberan en las superficies de los electrodos durante electrólisis y llevarlos a la superficie del agua (Kuokkanen, 2013).

2.7. Parámetros de control en la electrocoagulación.

Para lograr la máxima eficiencia de eliminación utilizando el proceso de electrocoagulación en electrólisis mínima tiempo con un costo operativo mínimo, es esencial comprender el efecto de varios parámetros operativos en proceso CE.

2.7.1. Arreglo de electrodos

En el proceso EC, el material del electrodo y el tipo de conexión del electrodo juegan un papel importante en el análisis de costo. En el proceso EC, los materiales de los electrodos definen el tipo de reacción electroquímica que ocurrirá en el proceso de la CE. La placa de Al o Fe se puede utilizar como ánodo y material inerte como acero, acero inoxidable, platino el titanio revestido, etc. se puede utilizar como cátodo. En algunos casos, se utiliza un material similar para el ánodo y cátodo. Un sistema EC puede incluir uno o múltiples pares de ánodo-cátodo y puede estar conectado en un modo monopolar o bipolar (Khandegar y Saroha, 2013).

2.7.2. Efecto del tiempo de electrólisis

El tiempo de electrólisis también tiene un efecto significativo en la eficiencia de eliminación de contaminantes de los electroquímicos. El método de coagulación define la cantidad de coagulante formado y el costo del proceso. Un aumento en el tiempo de electrólisis hasta el nivel óptimo aumenta la eficiencia de eliminación de contaminantes, pero no aumenta más allá del nivel óptimo. El hecho real es que, a una densidad de corriente constante, la formación de coagulante aumenta con un aumento en el tiempo de electrólisis que conduce a una mayor eficiencia de eliminación (Khandegar y Saroha, 2013).

2.7.3. Distancia entre electrodos

En el proceso de EC, la distancia entre electrodos juega un papel importante en la potencia de EC porque el campo electrostático depende de la distancia entre el ánodo y el cátodo. Una distancia óptima entre electrodos proporciona la máxima eficiencia de eliminación de contaminantes. La distancia mínima entre electrodos proporciona baja eficiencia de eliminación de contaminantes. Cuanto mayor sea la distancia entre electrodos, más lento será el movimiento de los iones generados debido al movimiento más lento, los iones obtienen más tiempo para formar flóculos necesarios para la coagulación de contaminantes. Mientras que un aumento adicional en la distancia entre electrodos por encima del valor óptimo disminuye la disolución y aumentará la distancia que los iones esenciales para viajar para la formación de flóculos, lo que resulta en la disminución de la eficiencia de la electrocoagulación (Khandegar y Saroha, 2012).

2.7.4. Efecto de la densidad de corriente

Uno de los parámetros operativos más significativos en el proceso de electrocoagulación es la densidad de corriente, es decir, corriente por área del electrodo. De acuerdo con la literatura, se aplica una amplia gama de densidades de corriente entre 1-100mA/cm² dependiendo del caso de estudio. A alta densidad de corriente, se desperdicia energía eléctrica al calentar el agua, lo que resulta en disminución de la eficiencia actual. Para garantizar una alta eficiencia de corriente, la densidad de corriente debe seleccionarse en de acuerdo con los demás parámetros de funcionamiento, como el pH, la temperatura y el caudal. En el proceso de la CE, la densidad de corriente y los tipos de aniones definen la eficiencia de corriente (Zozouli y Thagabi, 2012).

2.7.5. Efecto del pH

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación; esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar (Arango,2012).

El pH, durante el proceso, puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo; en contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer; a su vez, y dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso. Algunas aguas residuales presentan mejor eficiencia en la remoción de sus contaminantes al aplicar la electrocoagulación a pH básicos, y otras, a pH ácidos (Arango,2012).

Se ha determinado, en algunos casos, que la mayor eficiencia en la remoción de un contaminante se da dentro de un rango específico de pH; incluso este rango puede ser amplio. En términos generales, las mejores remociones se han obtenido para valores de pH cercanos a 7 (Arango,2012).

2.7.6. Efecto de la temperatura

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, para electrodos de aluminio, punto donde se hace máxima, para luego decrecer (Arango,2012).

Cuando se usan electrodos de aluminio, el incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo. Similar a lo que sucede con la eficiencia de corriente, el consumo de energía también lleva a un máximo de 35° C (Arango,2012).

2.7.7. Efecto de la concentración inicial de contaminantes

La concentración inicial de contaminantes también se considera como uno de los parámetros efectivos en el control de eliminación de contaminantes por coagulación electroquímica. De acuerdo con la literatura, un aumento en la concentración inicial de contaminantes (manteniendo otros parámetros constantes) reduce la eficiencia de eliminación de contaminantes del proceso EC. Esto se debe a la circunstancia de que a un

parámetro operativo fijo se fijará la cantidad de coagulante generado, que es insuficiente para formar flóculos con alta concentración de contaminantes. Por lo tanto, se requiere un tiempo de electrólisis más largo para reducir la concentración de contaminantes residuales hasta el rendimiento de eliminación deseado. La concentración de contaminantes no sólo disminuye la eficiencia EC también aumenta el consumo de energía al aumentar la resistencia y conductividad de la solución (Bharath et al.,2018).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Lugar de ejecución

La presente investigación fue ejecutada en los ambientes del Laboratorio de Calidad del Agua de la especialidad de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), que se ubica en las coordenadas UTM: 390256 Este y 8970849 Norte a una altitud de 662 m.s.n.m en la ciudad de Tingo María- Huánuco-Perú.

La ciudad de Tingo María se encuentra geográficamente en la hoja 19-k de la Carta Nacional del Instituto Geográfico Nacional, esto es la región Selva.

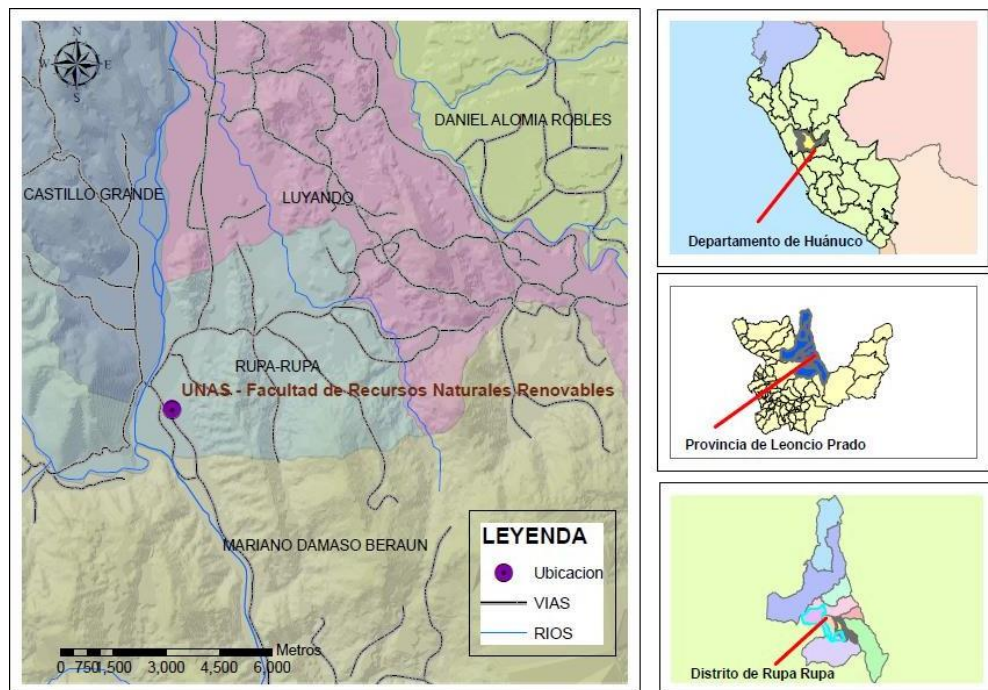


Figura 2. Ubicación geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

3.1.1. Características climáticas

La temperatura máxima del área donde se realizó la investigación es de 32 °C y una mínima de 19,0 °C, así se puede afirmar que la temperatura media anual de 25,4 °C. Por otro lado, el alto índice de precipitaciones proporciona una humedad relativa media

anual de aproximadamente 85%. En cuanto a la precipitación media anual esta tiene un valor de 3,755 milímetros (SENAMHI, 2018).

La velocidad promedio del viento por hora en Tingo María no varía considerablemente durante el año y permanece en un margen de más o menos 0,6 kilómetros por hora de 5,1 kilómetros por hora. La dirección del viento promedio por hora predominante en Tingo María es del norte durante el año.

3.2. Materiales y Equipos.

Material de vidrio de laboratorio: vasos de precipitación y fioles, Estufa Marca Memmert, Cámara de incubación, Balanza Analítica marca Ohaus con 0.001 g de precisión, Equipo multiparamétrico marca Hanna, Mortero de porcelana, cuba de vidrio de 8mm de 10,5x15x20 cm, Láminas de Aluminio de 15 x 20 cm, Láminas de fierro de 15 x 20 cm, Cables de conexión, fuente de alimentación de corriente eléctrica de 50v, agua destilada.

3.3. Criterios de estudio

3.3.1. Nivel de investigación

Esta investigación es de nivel explicativo, porque pretende dar una explicación y determinación de los fenómenos que se presentan producto de los experimentos. Los estudios que se realizaron fueron de tipo experimental, en los cuales, la manipulación intencionada de la variable independiente permitió comprobar la hipótesis que permitió explicar el comportamiento de los fenómenos que se presentaron (Ramos 2020).

3.3.2. Tipo de investigación

La presente fue una investigación aplicada, según Ramos (2020), porque al ser cuantitativo se pudo aplicar estudios predictivos que establecieron la relación entre variables de la investigación.

3.3.3. Método de investigación

Tomando en cuenta la comprensión de los fenómenos, así como el hecho de explicar las causas que lo produjeron, esta investigación fue del tipo inductivo. La predicción y el control, es una de las aplicaciones, asimismo, su uso en las leyes y teorías científicas (Sánchez, 2019)

3.3.4. Diseño de investigación

Esta investigación tuvo un diseño experimental para la determinación de las variables relacionadas, así como para determinar sus niveles críticos. Se escogió un diseño factorial 3^k ya que el objetivo principal de este trabajo fue la aplicación de la electrocoagulación a un lixiviado manipulando las variables voltaje de operación y material del electrodo, con el fin de determinar la influencia o no sobre la variable respuesta de los factores evaluados (Álvarez et al., 2018).

3.3.5. Variables de investigación

a) Variables independientes:

La aplicación de la electrocoagulación a un lixiviado.

Dimensiones e indicadores:

- El voltaje de operación
- El material del electrodo.

b) Variable dependiente:

La remoción de carga orgánica
del lixiviado

- La DQO del lixiviado.

Tabla 1. Niveles de las variables de la investigación

Variable de investigación	Factor A	Factor B
	Voltaje de operación	Material de electrodo
	Niveles	Niveles
La aplicación de la electrocoagulación a un lixiviado.	16 voltios. 20 voltios 24 voltios	Aluminio Aluminio y fierro Aluminio, fierro y cobre

Tabla 2. Matriz de diseño tipo factorial completo 3^2

N° experimental	Orden Aleatorio	Factor A Voltaje de operación	Factor B Material de electrodo
1	1	-1	-1
2	4	0	+1
3	2	-1	+1
4	6	1	0
5	5	1	-1
6	3	0	0
7	9	-1	0
8	7	0	-1
9	8	1	+1

Donde:

Para el voltaje de operación (VO): 16(-1), 20 (0), 24(+1) y Material de electrodo: Un solo material en los electrodos (-1), Dos materiales en los electrodos (0). Tres materiales en los electrodos (+1)

3.3.6. Análisis estadístico

Como se mencionó en el ítem anterior el diseño experimental que se aplicó fue diseño factorial 3^2 con tres repeticiones. Posteriormente se utilizó el programa InfoStat para realizar un ANVA a fin de evaluar la dispersión de los resultados y una prueba de Duncan para comparación de la significancia de los resultados de tratamientos para remoción de carga orgánica, por efecto de la electrólisis.

3.4. Metodología

3.4.1. Caracterización del lixiviado de un relleno sanitario con los parámetros fisicoquímicos: DBO, DQO, pH, ST.

Obtención y caracterización del lixiviado

El lixiviado se colectó en la celda transitoria de la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado, seguidamente, se procedió a tamizar el fluido, con una tela y se realizó la medición de los parámetros fisicoquímicos necesarios para llevar a cabo esta investigación estos parámetros fueron: DBO₅, DQO, pH y Sólidos Totales, aplicando la metodología utilizada por López et al. (2022).

Determinación del pH

El valor que se registró se obtuvo mediante un pH-metro equipado con electrodo de vidrio.

Determinación de la DBO_5

La muestra fue incubada por cinco días con 20 °C, la medición del oxígeno disuelto fue realizada por el método electrométrico, al inicio y culminada la incubación. En la determinación de la DBO_5 en zonas con elevada carga de contaminante se ha tenido que usar diluciones, por tal razón se empleó la fórmula siguiente

La ecuación

$$DBO_5 \left(\frac{mg}{L} \right) = OD_s^i - OD_b^f + \left(\frac{V_b}{V_s} \right) (OD_b^f - OD_s^f) \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

OD_s^i = Concentración inicial de oxígeno disuelto de la muestra en mg/L

OD_s^f = concentración final oxígeno disuelto (mg/L)

OD_b^f = Volumen de la muestra de la botella de dilución

V_s = Cantidad volumétrica de la muestra

V_f = Capacidad volumétrica de la botella de incubación

Determinación de la medición de ST

Se preparó un matraz de Buchner con una bomba de vacío y embudo, se secaron y pesaron papeles filtro, se filtraron 50 mL de lixiviado, y el filtrado se secó y pesó en una placa Petri.

Los sólidos totales se calculan utilizando la diferencia de pesos:

$$SST (mg / L) = \frac{(P_2 - P_1) \times 1000}{Volumen \ de \ la \ muestra (mL)} \dots \dots \dots (2)$$

P_1 = peso inicial de las placas de evaporación

P_2 = peso final después de la evaporación y secado

V = volumen de la muestra

3.4.2. Determinación del voltaje y el material electrodo en la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de carga orgánica como DQO, de un lixiviado, a escala de laboratorio.

Construcción de la celda de electrocoagulación

Para construir la celda de electrocoagulación se utilizó vidrio de 8 mm, en dimensiones de 10,5x 15 x 20 cm, donde se colocaron los electrodos de dimensiones 8cmx 5cm en posición vertical, que fueron conectados a la fuente de alimentación, donde se manipuló el voltaje aplicado con un selector. La construcción de la celda de electrocoagulación, tuvo como referencia el prototipo planteado por Arango y Garcés (2007). La celda para electrocoagulación se diseñó considerando una distribución volumétrica con tres regiones: una región superior para el depósito de los lodos de flotación o lodos menos densos y las espumas, llamada zona de flotación, una región media de reacciones electroquímicas, llamada zona de reacción en donde se encuentran los electrodos y una región inferior, llamada zona de sedimentación donde se depositaron los lodos de precipitación, como se muestra en la Figura 4. Con fines de manejo de la evaluación la celda construida, se dividió, en tres partes iguales.

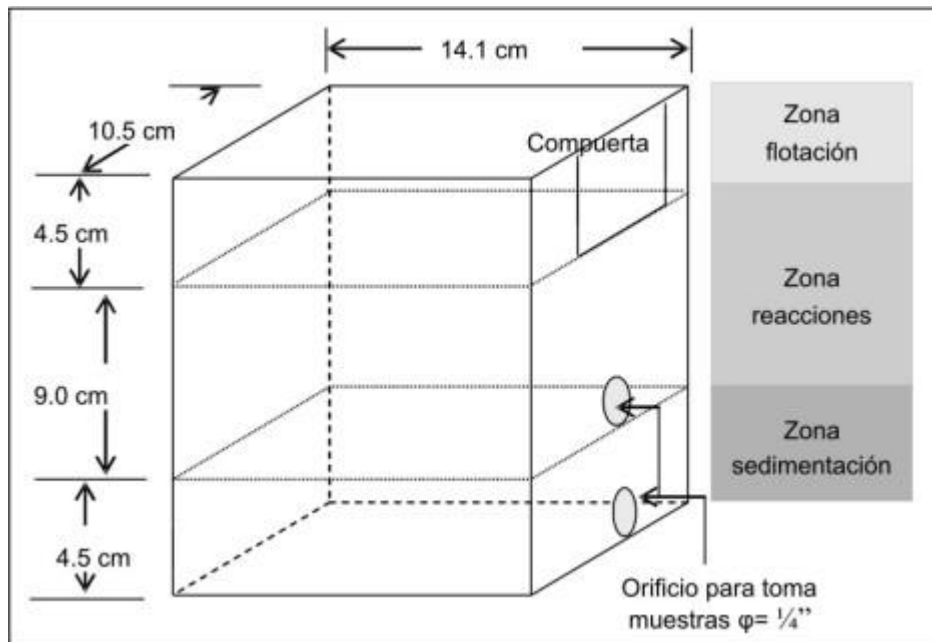


Figura 3. Prototipo de celda de electrocoagulación (Arango y Garcés, 2007)

Para este objetivo se aplicaron los tratamientos con 16V, 20V y 24V por un tiempo de 45 minutos y utilizando electrodos de aluminio (Mercado et al., 2007). Seguidamente, terminado el proceso de electrocoagulación se tomaron las muestras de los lixiviados tratados de la región media de la celda de electrocoagulación, los cuales fueron extraídos con una jeringa de 100mL y se realizaron los análisis de DQO a cada tratamiento.

3.4.3. Determinación del voltaje y del uso alternado de material del electrodo en la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de carga orgánica como DQO, de un lixiviado a escala de laboratorio.

Para determinar el efecto de la interacción de las dos variables evaluadas, que son voltaje de operación y materiales de electrodos, se aplicaron tratamientos de electrocoagulación del lixiviado con 16V, 20V y 24V con electrodos de aluminio (un solo material en la celda de electrocoagulación), aluminio y hierro (dos materiales en la celda de electrocoagulación), aluminio, hierro y cobre (tres materiales en la celda de electrocoagulación), por un período de 45 minutos. Las dimensiones de los electrodos serán de 8cm x 5cm

Determinación de la DQO

El análisis de DQO se realizó con el método de oxidación al dicromato, denominado reflujado abierto, donde un volumen de muestra fue sometido a reflujado total adicionando dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) en un exceso conocido y en presencia de ácido sulfúrico (H_2SO_4), durante dos horas. De esta manera se produce la oxidación de la materia orgánica en la muestra. Esto genera el consumo de dicromato, que se caracteriza por el cambio de color de amarillo a verdoso, debido al reemplazo por el ión crómico. El catalizador utilizado fue sulfato de plata (Ag_2SO_4) y luego se realiza una valoración titulométrica del dicromato restante con una solución valorada de sulfato ferroso amoniacal $[Fe (NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O]$ (Ramalho,2003).

Finalmente se determinó la variación de la carga orgánica del lixiviado con la ecuación (3), la cual será en función a la diferencia de valores de DQO, determinada en cada tratamiento a las diferentes condiciones mencionadas anteriormente.

$$\frac{DQO \text{ del lixiviado antes de EC} - DQO \text{ del lixiviado después de EC}}{DQO \text{ inicial del lixiviado}} \times 100 \dots\dots\dots (3)$$

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

4.1. Caracterización del lixiviado de un relleno sanitario con los parámetros fisicoquímicos: DBO, DQO, pH, ST.

Tabla 3. Características fisicoquímicas del lixiviado utilizado en la investigación

Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura	28.83	°C
pH	8.17	
DQO	9972.33	mg/L
DBO ₅	2960.67	mg/L
Sólidos Totales	14480.3	mg/L

En la Tabla 3, se pueden observar las características fisicoquímicas del lixiviado básicas utilizadas en la investigación, de las cuales podemos observar que el pH es básico y los valores de DQO, DBO₅ y Sólidos Totales son relativamente elevados, esto se debe a la edad y condiciones de manejo del lixiviado colectado en la investigación, donde por el grado de descomposición alcanzado y según algunas características organolépticas observadas, tal como el olor, puede contener una alta concentración de compuestos nitrogenados, en sus diferentes formas. Estos compuestos tienden a elevar el pH del lixiviado y se podría clasificar como un lixiviado en transición .

Generalmente el pH varía según la edad de los vertederos. En un estudio realizado en Marruecos, el pH del lixiviado del vertedero de Tamelast oscila entre 5,9 a 8,65 con un promedio de 7,9. El pH del lixiviado joven es inferior a 6, mientras que el pH del el lixiviado del antiguo vertedero es superior a 8,5. Durante las diferentes etapas del desarrollo de un vertedero, los valores de pH obtenidos en el lixiviado podrían estar relacionados con la baja concentración de compuestos orgánicos volátiles. El pH sigue siendo un buen indicador de las diferentes fases de degradación y alteración de residuos Asouam,S. *et al.* (2021)

Las características de los lixiviados de vertedero presentan diferencias considerables debido a variaciones en la composición de los residuos y el contenido de humedad, así como factores estacionales como temperatura y precipitación. Las temperaturas más altas en verano resultan en menores DQO, mientras que el pH, el nitrógeno total y la conductividad eléctrica suelen ser mayores en invierno que en

verano.

A diferencia de, potencial de oxidación-reducción, las concentraciones de metales, los sólidos suspendidos totales y los sólidos suspendidos volátiles no presentan diferencias significativas con la variación estacional (Teng *et al.*, 2021)

Por otro lado, la concentración de DQO, se debe al gran contenido de compuestos orgánicos e inorgánicos diluidos como parte del proceso de descomposición de la materia orgánica y el contacto con otras sustancias que liberan contaminantes de diversa naturaleza. Es importante mencionar que el grado de contaminación y el tipo de contaminantes que puedan existir en los lixiviados tiene relación con el estilo de vida de la población, que desecha los residuos, ya que, en función a eso, habrá mayor o menor presencia de contaminantes emergentes.

Otro parámetro importante que se encuentra en la Tabla 3, es la DBO, como sabemos es un parámetro que cuantifica de manera indirecta la carga orgánica biodegradable, y su elevado, se relaciona a la edad del lixiviado, dado que los lixiviados, tienden a estabilizarse a lo largo del tiempo, para lo cual, todo aquel material presente en él, que se puede degradar, sufrirá un proceso de degradación biológica, que culminará ante cualquier limitación que puede ser falta de sustrato, cambio de pH, carga microbiana, etc.

Mayor *et al.*(2018), realizaron un estudio para caracterizar lixiviados procedentes de residuos orgánicos domésticos, colectados en una zona urbana de una ciudad colombiana, estos investigadores, colectaron y seleccionaron los residuos sólidos domiciliarios, luego los molieron y prensaron para obtener los lixiviados, los resultados obtenidos fueron valores de DBO₅ y DQO de 4538,50 y 84634,54 mg/L O₂ y un contenido ST de 34,31 g/L, presencia de minerales como Na, K, Ca, Mn, Fe y Zn, y compuestos aniónicos como nitratos y fosfatos, de 72,92 y 241,19 ppm, respectivamente. El pH de lixiviado fue 4.38. Estas características determinadas, están acorde al grado de descomposición del lixiviado o a la edad del mismo, ya que la acidez del rango de pH, denota que está, en la fase inicial de la degradación de materia orgánica donde los compuestos más complejos van reaccionando o solubilizando y volviéndose más simples, este valor es diferente al lixiviado utilizado para la presente investigación, e indica una diferencia de edad de lixiviados. Por otro lado, resalta el elevado valor de

DQO, donde si tomamos como referencia la DBO, se puede deducir que el lixiviado tiene un gran contenido de material inorgánico, el cual deberá ir reduciendo conforme se ejecute la degradación microbiana, hasta estabilizarse las condiciones fisicoquímicas del lixiviado.

López *et al.* (2022), muestrearon y analizaron los lixiviados de un sitio de disposición final no controlado en México, estos autores solo describen la situación del botadero y la profundidad de toma de muestras que fue a 2 m, más no mencionan la edad del lixiviado y reportan valores de DBO₅ y DQO de 24.9 y 1425.6 mg/L. Si comparamos estos valores con los de la investigación, estos son bajos, pero es necesario mencionar que estos valores provienen de lixiviados que han sido extraídos del suelo humedecido por el drenaje de estos. Analizando los reportes de estos autores se puede decir que el suelo ejerce un tratamiento de depuración del lixiviado, por degradación microbiana o adsorción de contaminantes. Para nuestro caso, se trabajó con un lixiviado colectado de las celdas transitorias de la Municipalidad Provincial de Leoncio Prado, donde se produce una acumulación progresiva de lixiviados expuestos a variaciones de las condiciones ambientales, y no se cuenta con un medio o sistema depurador, más que el microbiológico de manera natural, donde la depuración no es muy considerable, por las condiciones fisicoquímicas que adquiere el lixiviado.

4.2. Determinación del voltaje y el material electrodo en la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de carga orgánica como DQO, de un lixiviado, a escala de laboratorio.



Figura 4. Lixiviado colectado para el proceso de electrocoagulación de la investigación

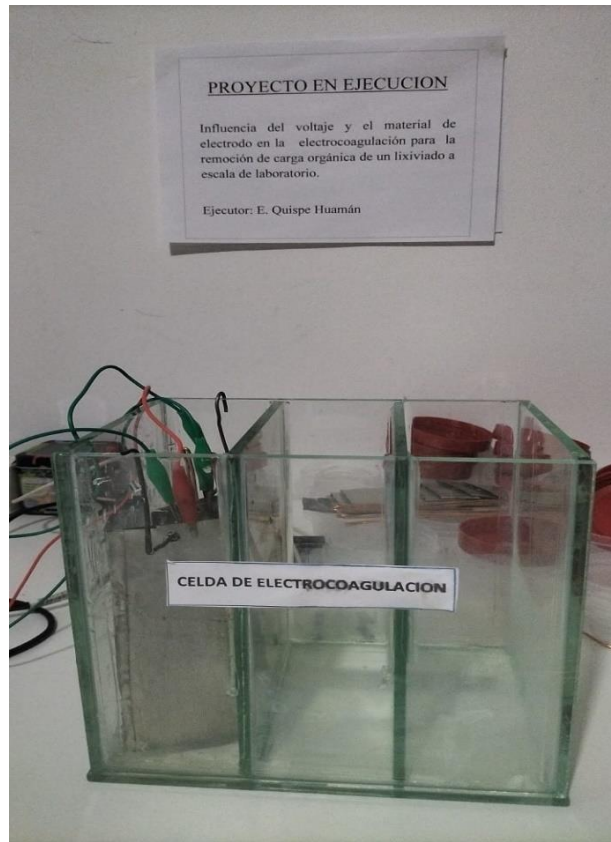


Figura 5. Celda de electrocoagulación con proceso batch adaptada para los experimentos

Tabla 4. Valor de DQO final del lixiviado a diferentes voltajes y con electrodo de aluminio

Tratamiento	Electrodo	Voltaje	DQO inicial del lixiviado (mg/L)	DQO final del lixiviado (mg/L)
To1	Aluminio	16V	9972.33	2774.33
To2	Aluminio	20V	9972.33	1946.33
To3	Aluminio	24V	9972.33	968.33

Tabla 5. Remoción de DQO del lixiviado a diferentes voltajes y con electrodo de aluminio

Tratamiento	Electrodo	Voltaje	Remoción de DQO del lixiviado (%)
To1	Aluminio	16V	72.18
To2	Aluminio	20V	80.48
To3	Aluminio	24V	90.29

En las Tablas 4 y 5, se resumen los resultados de la electrocoagulación del lixiviado aplicada a escala de laboratorio, en esta parte experimental, se utilizaron electrodos de aluminio, la celda construida para la investigación fue dividida en tres compartimentos, para favorecer una evaluación por triplicado. Los tratamientos fueron realizados tipo batch, cargando la celda con 1L de lixiviado y aplicando la energía eléctrica con electrodos de aluminio. Los resultados evidencian que el voltaje de un proceso de electrocoagulación es directamente proporcional a la reducción de carga orgánica oxidable presente en el lixiviado, lo cual significa reducción de DQO. En esta etapa se desarrolla una electrocoagulación que podríamos considerar convencional, ya que los iones de aluminio que se liberan del electrodo, en forma masiva van reaccionando con otros subproductos de la electrolisis y producen la coagulación-floculación, que terminan sedimentación de los flóculos.

Bharath *et al.* (2019), experimentaron la variación de la DQO y el color de un lixiviado utilizando la electrocoagulación con electrodos de aluminio, estos investigadores evaluaron la influencia de diversos parámetros entre ellos, voltaje y distancia entre electrodos. Parte de sus resultados son la remoción del 78,48% de DQO, con 10 voltios y por un tiempo de 90 minutos, así también hacen mención que la distancia más corta facilita la mayor eficiencia de eliminación. Como parte de la discusión de sus resultados agregan al respecto que algunos de los investigadores han informado que la colocación adecuada de distancia del electrodo afecta la densidad de corriente, lo que significa que, si la distancia entre electrodos es demasiado corta, el flujo de fluido y sólidos están obstruidos lo que provoca una mayor resistencia eléctrica. Es importante mencionar que la presente investigación, no consideró la distancia de electrodos como una variable, estandarizando una distancia de 5 cm, sin embargo, la eficiencia mostrada en la remoción de DQO, si varió, en función al voltaje y al material de electrodo.

Oktiawan *et al.* (2020) realizaron un estudio electroquímico utilizando procesos de electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro para eliminar compuestos no biodegradables en lixiviados. Las variables que evaluaron fueron el caudal y voltaje. Los resultados mostraron que la electrocoagulación con aluminio fue efectiva para reducir la DQO, alcanzando un 54,08% usando 10 voltios y caudal 20 ml/minuto y pH constante en el rango de 5,7-6,6. Aquí también se hace referencia a la utilización de un electrodo

de Fe, el cual dio como resultado el aumento del pH de 6,0 a 9,1. Como parte de su análisis en este estudio los investigadores reportan que a un voltaje más alto y caudal mínimo para los electrodos de aluminio y hierro probablemente afectaría una mayor eliminación de DQO. Si comparamos los resultados de esta etapa de la investigación, podemos decir que la eficiencia es mucho menor, lo cual podría ser por el voltaje aplicado el cual fue en un rango mayor y un proceso batch.

Mohajeri *et al.*, (2018), desarrollaron una investigación en electrocoagulación de lixiviados utilizando electrodos de aluminio y llegaron a obtener 57.1% de reducción de la DQO y un mayor porcentaje de reducción de color. El lixiviado tratado mantuvo un pH de 8 y la intensidad de corriente aplicada fue de 60 mA/cm² por un tiempo de 4 horas y en un medio agitado. Estos investigadores se propusieron determinar la influencia de la conductividad del lixiviado en la eficiencia de reducción de la DQO, para eso trabajaron con soluciones de NaCl entre 500 ppm y 3000 ppm. Si comparamos el resultado, con la eficiencia de la presente investigación, vemos que la reducción de DQO es mayor, a pesar de haber trabajado con un lixiviado con una mayor DQO y un menor tiempo de reacción. Como parte del análisis de resultados los investigadores mencionan que el rango de pH favorable para la reducción de DQO es de neutro a alcalino medio, así mismo resaltan la importancia de la

intensidad de corriente aplicada, que, si bien es cierto en estudios preliminares, corroboraron una correlación positiva con la reducción de DQO, sin embargo, ellos también mencionan que la aplicación de un mayor valor de intensidad de corriente, oscurece el lixiviado y por otro lado debilita el ánodo e implica mayor costo de tratamiento. Finalmente, otro aporte que genera la investigación de Mohajeri *et al.* (2018) es respecto a la influencia de la conductividad, la cual, si bien es cierto en la presente investigación, no fue evaluada, sin embargo, estos autores mencionan que el incremento de iones cloruro, mejoró, la eficiencia de reducción de DQO y al mismo tiempo mencionan que un incremento de estos iones implicaría un mayor potencial de consumo. Posiblemente sea necesario determinar la influencia no solo de la cantidad sino también de la calidad de iones en la reducción de DQO de lixiviado.

Zailani *et al.* (2018), aplicaron una electrocoagulación a un lixiviado de 2150 mg/L de DQO, utilizando un electrodo de aluminio, estos investigadores mencionan que consiguieron un máximo de reducción de DQO de 60% y entre las condiciones óptimas mencionan un pH 4, un tiempo de reacción de 20 minutos y la mayor intensidad de corriente favorece la reducción de DQO, hasta cierto punto ya que el incremento de este parámetro también podría redissolver los flóculos formados y reducir la eficiencia. Vemos que estos resultados tienen alguna coincidencia con los de esta investigación, como el caso del tiempo de reacción, sin embargo, difiere en el pH y la concentración inicial de la DQO del lixiviado. Así mismo también es importante mencionar que el electrolito o lixiviado en el caso de la investigación mencionada fue con agitación, lo cual muchas veces puede afectar negativamente la formación de flóculos y por ende la depuración del lixiviado.

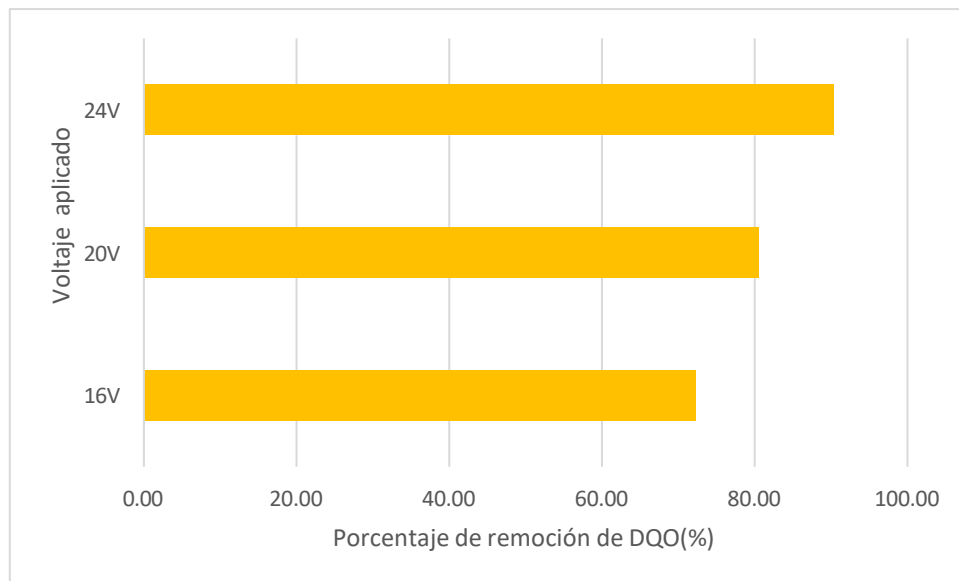


Figura 6. Porcentaje de reducción de DQO del lixiviado con electrodo de aluminio a diferentes voltajes.

En la Figura 6, podemos observar claramente la diferencia en el porcentaje de reducción de la DQO, cuando se aplica un voltaje en forma progresiva, evidenciando una relación directamente proporcional entre voltaje y reducción de DQO.

4.3. Determinación el efecto del voltaje y del uso alternado de material del electrodo en la aplicación de la electrocoagulación para la remoción de carga orgánica como DQO, de un lixiviado a escala de laboratorio.

Tabla 6. Remoción de DQO del lixiviado a diferentes voltajes y con electrodos de aluminio, hierro y cobre.

Tratamiento	Electrodo	Voltaje	Remoción de DQO del lixiviado (%)
T1	Aluminio	16V	71.40
T2	Aluminio+Fierro	16V	77.03
T3	Aluminio+Fierro+Cobre	16V	79.55
T4	Aluminio	20V	80.59
T5	Aluminio+Fierro	20V	87.31
T6	Aluminio+Fierro+Cobre	20V	90.65
T7	Aluminio	24V	90.28
T8	Aluminio+Fierro	24V	96.41
T9	Aluminio+Fierro+Cobre	24V	98.97

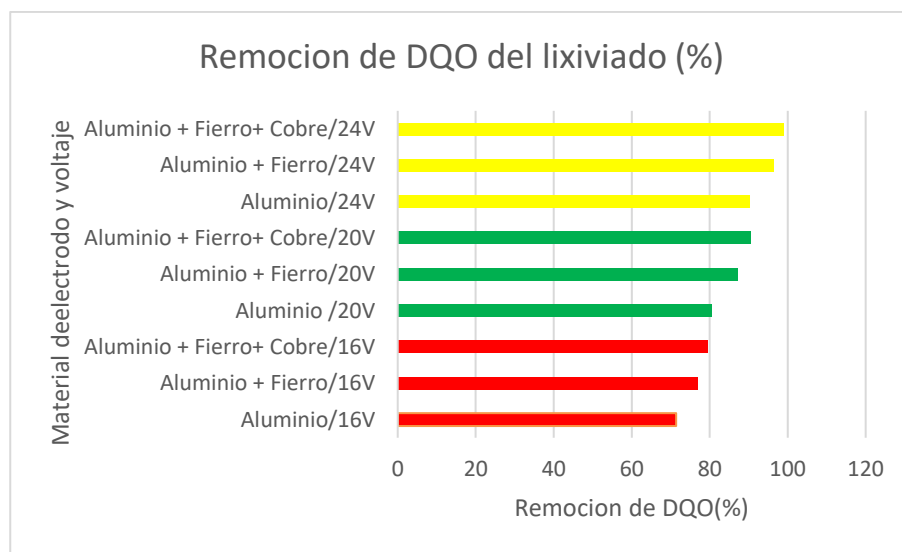


Figura 7. Porcentaje de reducción de DQO del lixiviado con electrodos de aluminio, hierro y cobre a diferentes voltajes.

En las Tabla 6 , podemos observar la influencia que tiene el material de electrodo en la depuración del lixiviado mediante electrocoagulación, a una escala de laboratorio, los resultados indican que la mayor eficiencia se logra cuando se trabaja con electrodos de aluminio, hierro y cobre, de manera conjunta, aplicando una energía de 24 voltios, se logró una reducción de 98,97% de DQO del lixiviado, mientras que, con la utilización de un electrodo de aluminio, se obtuvo un máximo de reducción de DQO de 90.65% aplicando 24 voltios y un mínimo de 71.4% de reducción de DQO con 16 voltios de energía. La alta eficiencia producida podría ser por la cantidad de iones divalentes aportados por el cobre y el fierro, así mismo por la liberación de hidrógeno y oxígeno, que va modificando el pH del lixiviado, así como también produce la formación de hidróxidos, tanto de cobre como de hierro, que coagulan y flocculan con los compuestos que van modificando su solubilidad e integrando los flóculos que posteriormente sedimentan.

El electrodo en la electrocoagulación es un factor clave de los procesos. Los materiales comúnmente utilizados en electrodos son de hierro y aluminio, que se utilizan como material anódico y los iones metálicos se liberan del ánodo y se produce la formación de muchas especies de hidrólisis monomérica iónica en la solución, lo cual depende del pH del agua residual inicial. La tendencia de variación de DQO mediante lixiviados en electrocoagulación es la mayor reducción de DQO, cuanto mayor es el tiempo. En la operación de electrocoagulación, el pH es uno de los factores importantes que influyen en la eliminación de DQO, ya que, dependiendo del pH inicial del lixiviado, con un valor neutro, el electrodo de aluminio proporciona el mejor resultado que el electrodo de hierro. Con el electrodo de aluminio no se producen cambios en el valor del pH, pero se proporciona la mejor eliminación de DQO. Al respecto estos investigadores mencionan que a un pH superior a 6 en el proceso de electrocoagulación, más del 84% de DQO se eliminó, el 90% de SST se eliminó y el 91% del color se cambió utilizando un electrodo de aluminio (Oktiawan *et al.*,2020).

Ghanbari *et al.*, (2014), investigaron el tratamiento de aguas residuales de la industria textil, mediante coagulación, utilizando ánodos de aluminio y hierro en forma simultánea y como cátodo el cobre, que era el material del cual estaba hecha la celda de electrocoagulación. La eficiencia en la reducción de DQO, fue de 87%, trabajando con un con una intensidad de corriente de 300 mA y un pH de 7, con un tiempo de reacción de 40 minutos., cabe mencionar que la reducción, también fue evaluada y esta fue mayor que la conseguida para la DQO. Como parte de su análisis de los resultados, estos investigadores, mencionan que el uso simultaneo de dos materiales como ánodos como el caso de aluminio y hierro, funcionan con éxito, sin embargo resaltan que el aluminio favorece la remoción de color y el hierro favorece la remoción de DQO, así mismo que el pH es un factor clave para el desarrollo de la depuración del electrolito, ya que este determina la consecutiva formación de óxidos e hidróxidos, que terminan como flóculos que se separan por gravedad, arrastrando otros compuestos contaminantes. Respecto al funcionamiento de cobre como cátodo, hacen referencia que esto favoreció el incremento de la formación de burbujas, debido a la magnitud del área superficial, ayuda la eliminación de contaminantes por electroflotación. Ante lo reportado por Ghanbari et al. (2014), podemos decir que queda respaldado el uso simultaneo de material como aluminio, fierro y cobre, en procesos de electrocoagulación, ya que cada material tiene un aporte específico en la depuración del electrolito.

Nediljka *et al.*, (2023), realizaron una investigación para evaluar la eficiencia de diferentes materiales como ánodos en la electrocoagulación de lixiviados de compost que tenía un pH de 5.8 y una DQO de 576.92 mg O₂/L. Los materiales utilizados fueron acero al carbono, aluminio y zinc, en la parte introductoria esta publicación se hace referencia a los mecanismos de depuración que suceden cuando se aplica una electrocoagulación, donde mencionan la importancia del pH en este proceso, ya que la formación de nuevos compuestos tales como hidróxidos y una sucesión de otros compuestos que se van formando por la modificación continua del pH durante el proceso por la formación de iones provenientes de los electrodos de sacrificio, así mismo menciona que el pH y la dosis de coagulante formado son responsable de mecanismos como neutralización de carga y coagulación de barrido. Este estudio resalta la importancia del efecto que tiene el material del ánodo ya que la formación de poros en la superficie por oxidación del material va debilitando al ánodo y bajando la eficiencia del proceso, así también la aplicación inadecuada de energía eléctrica puede formar

recubrimientos en los electrodos que perjudica el paso de la energía eléctrica. Los resultados que de manera general fueron obtenidos, es que el zinc fue el mejor material por tener alta eficiencia en remoción de DQO y turbidez, con valores de 93% y 97%. Estos aportes mencionados por estos investigadores conllevan a analizar un aspecto más en los resultados en la presente investigación la cual muestra alta eficiencia en la reducción de DQO, que podría deberse a que no hubo formación de recubrimiento sobre los ánodos y el no tener un medio agitado permitió, un gran desarrollo de coagulación de barrido. Por otro lado, es necesario mencionar la gran diferencia en los valores de pH y de DQO de los lixiviados tratados.

Afsharnia *et al.*, (2018), llevaron a cabo experimentos sobre la eliminación de DQO y SST de lixiviados frescos de vertederos municipales mediante sono-electrocoagulación utilizando electrodos de cobre. La influencia del tiempo de reacción y el voltaje fueron estudiados para determinar su influencia en la eliminación de DQO y TSS, con un proceso integrado de sonicación y electrocoagulación, el cual resultó ser un sistema eficaz para el tratamiento de lixiviados frescos. El proceso de sono-electrocoagulación eliminó el 98% de la DQO y aproximadamente el 68% de los SST del lixiviado fresco, trabajando con 30 V, y un tiempo de 60 minutos. Los resultados demostraron que la eficiencia en la reducción de DQO y eliminación de SST con la sono-electrocoagulación se debió al aumento en el tiempo de reacción y el voltaje, ya que se produce el aumento en la tasa de coagulantes liberados y un aumento del pH de la solución, generándose el rango de pH efectivo sobre el coagulante de hierro y el pH de sedimentación de Cu^{2+} . Con estos resultados se puede decir que la utilización de aluminio, hierro y cobre utilizados en la presente investigación, han formado iones en un voltaje adecuado y un pH efectivo para producirse una alta eficiencia de reducción de la DQO.

Los resultados estadísticos realizados con el software Infostat, demuestran que los tratamientos aplicados presentan diferencia significativa, al ser evaluados con un intervalo de confianza del 95% y mediante una prueba de Duncan. Por tanto, la eficiencia de reducción de la DQO, es diferente cuando se trabaja solo con aluminio, con aluminio-ferro y con aluminio-ferro y cobre, así mismo existe una elevada correlación entre el material del electrodo y el voltaje (Ver anexo 8.2).

V. CONCLUSIONES

La electrocoagulación se presentó como una técnica efectiva para la reducción de carga orgánica en lixiviados y la optimización de los parámetros operativos, como el voltaje y la elección del material de electrodos es clave para maximizar la eficiencia del proceso.

El lixiviado de la investigación, presenta una relación DBO/DQO de 0.3, lo que indica que es un lixiviado con un índice de biodegradabilidad medio, en pleno proceso de degradación biológica, situándose en un estado intermedio de degradación biológica.

El aluminio, utilizado como cátodo y ánodo en la electrocoagulación de un lixiviado, es un material que logra una alta eficiencia en la reducción de la DQO, la cual es directamente proporcional al voltaje aplicado. El uso simultáneo de aluminio, hierro y cobre como ánodos en un proceso de electrocoagulación de un lixiviado con pH básico, permite incrementar la eficiencia de reducción de la DQO, en comparación con la obtenida con el uso único de un ánodo de aluminio.

El incremento del voltaje y del número de materiales utilizados como ánodo en el proceso de electrocoagulación del lixiviado, tienen una relación directa con la eficiencia de reducción de DQO. Este alto porcentaje de remoción destaca la eficacia de la electrocoagulación como método de tratamiento para lixiviados con altos niveles de DQO.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

Realizar la optimización de la electrocoagulación, mediante la evaluación de los parámetros aplicación de energía eléctrica, y conductividad del lixiviado, ya que son factores determinantes en la eficiencia de este proceso.

Investigar el efecto que tiene la utilización de una electrocoagulación continua en celdas separadas y operadas con distintos materiales como ánodos.

Realizar una investigación para determinar la eficiencia del proceso de electrocoagulación utilizando como cátodos otros materiales diferentes al aluminio.

Desarrollar un sistema de monitoreo y gestión de lixiviados en los rellenos sanitarios

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alvarez, L., Guerra, J., Rojas-Reyes, N. (2018). “Factorial design 2k applied to the reological characterization of kaolin suspensions”, *Prospectiva*, 16,(1), 18-25. <https://doi.org/10.15665/rp.v16i1.1115>.
- Afsharnia, M., Biglari H., Rasouli S., Karimi A., Kianmehr M. (2018). Sono-Electrocoagulation of Fresh Leachate from Municipal Solid Waste; Simultaneous Applying of Iron and Copper Electrodes, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 13 (2018) 472 – 484, doi: 10.20964/2018.01.22.
- Asouam S., Arabi M., Faik F., El Abidine El Morjani Z., Abioui M., Diaz L., Kostyuchenko Y.(2021). Physicochemical Characterization of the Leachate of the Tamelast Landfill Site, Grand Agadir (Morocco). *Ecological Engineering & Environmental Technology* 22(5), 65–72 <https://doi.org/10.12912/27197050/139338>.
- Bharath, M., Krishna, B.M., Manoj Kumar B.8(2019). A Review of Electrocoagulation Process for Wastewater Treatment, *International Journal of ChemTech Research*, 11(03):289-302. DOI : <http://dx.doi.org/10.20902/IJCTR.2018.110333>.
- Ghanbari, F., Moradi, M., Eslami, A. *et al.* (2014). Electrocoagulación/Flotación de aguas residuales textiles con aplicación simultánea de aluminio y hierro como ánodo. *Reinar. Proceso*. 1, 447–457. <https://doi.org/10.1007/s40710-014-0029-3>
- Iravanian, A., and Ravari Sh.O.(2020). Types of Contamination in Landfills and Effects on The Environment: A Review Study, IOP Conf. Ser.: *Earth Environ. Sci.* 614, 012083. doi:10.1088/1755-1315/614/1/012083.
- Khandegar V., and Saroha,A.K. (2012) Electrochemical treatment of distillery spent wash using aluminum and iron electrodes, *Chinese J. Chem. Eng.*, 20,(3): 439–443.
- Khandegar, V.,and Saroha,A.K.(2013).Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - A review, *J. Environ. Manage.*, 128, 949–963.
- Kuokkanen,V., Kuokkanen,T., Rämö,J., Lassi, U.(2013),Recent Applications of

Electrocoagulation in Treatment of Water and Wastewater A Review, *Green Sustain. Chem.*, 3, (2): 89–121.

Loayza Morales, C. A. & Henry Ochoa León, H. (2020). Evaluación de la remoción de materia orgánica del lixiviado mediante el proceso de electrocoagulación del botadero La Mejorada El Tambo. *Revista de la UNCP*. 17(1), 109-114.

López M., Aburto Y., Ocaña K., Olaya C., Lango F., López M. (2022). Caracterización fisicoquímica y biológica de los lixiviados procedentes del sitio de disposición final no controlado en Tlapacoyan, Veracruz, México, *Enfoque UTE*, 13(3): 1-13, DOI: <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.836>

Mayor V., Agudelo A., García L., Padilla L. (2018). Caracterización de lixiviados como alternativa que contribuya a la mitigación de contaminantes. *Rev.ion*. 31(1):59-63. doi: 10.18273/revion.v31n1-2018010.

Mercado, I., Reyes, D., Morante, G. (2007). Electrocoagulación de lixiviados generados en un relleno sanitario. *Ingeniería Química*. 39. 128-133.

Mohajeri, S., Abdul Aziz, H., Isa, M.H., Zahed, M.A. (2018). Treatment of landfill leachate by electrochemicals using aluminum electrodes, *Journal of Applied Research in Water and Wastewater*, 5 (2), 435-440.

Moussa, D.T., El-Naas, M.H., Nasser, M. & Al-Marri, M.J. (2017). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: potentials and challenges, *J. Environ. Manage*; 186, 24-41. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.032>

Nediljka Vukojević Medvidović, Ladislav Vrsalović, Sandra Svilović, Ante Bilušić, Dražan Jozić, (2023). Electrocoagulation treatment of compost leachate using aluminium alloy, carbon steel and zinc anode, *Applied Surface Science Advances*, Volume 15, 100404, <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2023.100404>.

Oktiawan W., Priyambada I., Ardhianto R. (2020) Treatment of Leachate using Electrocoagulation Technology; Study case in Jatibarang Landfill-Semarang City. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 448 012056, doi:10.1088/1755-1315/448/1/012056.

- Paitan, M. y Sifuentes, G. (2018). Remoción de contaminantes de aguas residuales de un matadero de equinos por el método de electrocoagulación a nivel laboratorio. Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias. Universidad Nacional del Centro del Perú.
- Ramalho, R. (2003). Tratamiento de Aguas Residuales. Barcelona: España, Editorial Reverté, S.A.
- Ramos C. (2020). Los alcances de una investigación, *CienciAmérica*,. 9 (3). <http://dx.doi.org/10.33210/ca.v9i3.336>.
- Renou,S., Givaudan J.G., Poulain S., Dirassouyan F., Moulin P.(2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity, *Journal of Hazardous Materials* 150 468–493, doi:10.1016/j.jhazmat.2007.09.077.
- Rusdianasari, Taqwa A., Jaksen, and Syakdani A.(2017). Treatment of landfill leachate by electrocoagulation using aluminum electrodes. MATEC Web of Conferences , 02010 DOI: 10.1051/mateconf/201710102010.
- Safaa M. Raghav, Ahmed M. Abd El Meguid & Hala A. Hegazi (2013) Treatment of leachate from municipal solid waste landfill, *HBRC Journal*, 9:2, 187- 192, DOI: 10.1016/j.hbrcj.2013.05.007.
- Sánchez Flores, F. A. (2019). Fundamentos epistémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: consensos y disensos. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, 13(1), 102-122. doi: <https://doi.org/10.19083/ridu.2019.644>
- Sandri, L. M. (2021) Diseño de una planta de tratamiento de efluentes lixiviados provenientes del relleno sanitario del partido de Necochea, provincia de Buenos Aires. Universidad Nacional de San Martín. Instituto de Investigaciones e Ingeniería Ambiental
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). (2018). *Guía básica de meteorología general*. Lima, Perú: SENAMHI.
- Teng Ch., Zhou K., Peng Ch., Chen Wei (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water Research* 203 ,117525. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525>.

- Vasudevan,S., Sheela, S.M., Lakshmi, J., Sozhan,G.(2010).Optimization of the process parameters for the removal of boron from drinking water by electrocoagulation :A clean technology, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 85(7): 926–933.
- Xiangdong Li, Junke Song, Jiandong Guo, Zhichao Wang, Qiyan Feng (2011), Landfill leachate treatment using electrocoagulation, *Procedia Environmental Sciences*, Volume 10, 1159-1164,<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.185>.
- Yusmartini E., Setiabudidaya D., Ridwan , Marsi and Faizal (2013). *J. Phys.: Conf. Ser.* 423 012048, doi:10.1088/1742-6596/423/1/012048.
- Zailani M., Amdan N., Zin, N. (2018) Removal Efficiency of Electrocoagulation Treatment Using Aluminium Electrode for Stabilized Leachate. *IOP Conf. Ser.: Medio Ambiente Tierra. Ciencia.* 140 012049, doi:10.1088/1755-1315/140/1/012049.
- Zazouli, M. A., Taghavi, M. (2012) —Phenol Removal from Aqueous Solutions by Electrocoagulation Technology Using Iron Electrodes: Effect of Some Variables, *J. Water Resour. Prot.*, 4, (11): 980–983.

VIII. ANEXOS

8.1. Datos experimentales de la investigación

Tabla 7. Resultados de los análisis realizados para la caracterización del lixiviado

Parámetro	Valor	Unidades
Temperatura	28.83	°C
1R	28.5	°C
2R	28.9	°C
3R	29.1	°C
pH	8.17	
1R	8.4	
2R	7.9	
3R	8.2	
DQO	9972.33	mg/L
1R	9984	mg/L
2R	10253	mg/L
3R	9680	mg/L
DBO5	2960.67	mg/L
1R	2960	mg/L
2R	3027	mg/L
3R	2895	mg/L
Sólidos Totales	14480.3	mg/L
1R	15920	mg/L
2R	14536	mg/L
3R	12985	mg/L
Conductividad	29.4	mS/cm
1R	27.5	mS/cm
2R	29.3	mS/cm
3R	31.4	mS/cm

Tabla 8. Resultados de la DQO final obtenida en cada tratamiento de la investigación

Tratamiento	Electrodo	Voltaje	DQO inicial (mg/L)	DQO final (mg/L)
To1	Aluminio	16V	9972.33	2865
To1	Aluminio	16V	9972.33	2796
To1	Aluminio	16V	9972.33	2662
To2	Aluminio	20V	9972.33	1950
To2	Aluminio	20V	9972.33	1893
To2	Aluminio	20V	9972.33	1996
To3	Aluminio	24V	9972.33	965
To3	Aluminio	24V	9972.33	948
To3	Aluminio	24V	9972.33	992

Tabla 9. Resultados de la DQO final del lixiviado de cada tratamiento realizado con ánodos de aluminio, hierro y cobre

Tratamiento	Electrodo	Voltaje	DQO inicial (mg/L)	DQO final (mg/L)
T1	Aluminio	16V	9972.33	2941
T1	Aluminio	16V	9972.33	2869
T1	Aluminio	16V	9972.33	2746
T2	Aluminio+Fierro	16V	9972.33	2258
T2	Aluminio+Fierro	16V	9972.33	2264
T2	Aluminio+Fierro	16V	9972.33	2350
T3	Aluminio+Fierro+Cobre	16V	9972.33	2052
T3	Aluminio+Fierro+Cobre	16V	9972.33	1998
T3	Aluminio+Fierro+Cobre	16V	9972.33	2068
T4	Aluminio	20V	9972.33	1984
T4	Aluminio	20V	9972.33	1926
T4	Aluminio	20V	9972.33	1898
T5	Aluminio+Fierro	20V	9972.33	1258
T5	Aluminio+Fierro	20V	9972.33	1310
T5	Aluminio+Fierro	20V	9972.33	1227

T6	Aluminio+Fierro+Cobre	20V	9972.33	945
T6	Aluminio+Fierro+Cobre	20V	9972.33	916
T6	Aluminio+Fierro+Cobre	20V	9972.33	936
T7	Aluminio	24V	9972.33	986
T7	Aluminio	24V	9972.33	964
T7	Aluminio	24V	9972.33	959
T8	Aluminio+Fierro	24V	9972.33	358
T8	Aluminio+Fierro	24V	9972.33	386
T8	Aluminio+Fierro	24V	9972.33	329
T9	Aluminio+Fierro+Cobre	24V	9972.33	108
T9	Aluminio+Fierro+Cobre	24V	9972.33	98
T9	Aluminio+Fierro+Cobre	24V	9972.33	102

8.2. Análisis estadístico de los datos experimentales con el software Infostat- versión libre.

Análisis de la

varianza DQO final

(mg/L)

Variable	N	R ²	R ² Aj
CV DQO final (mg/L)	27	1.00	1.00
3.90			

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-
valor Modelo.	20331215.93	4	5082803.98	1670.34	<0.0001
Material de electrodo	3768588.07	2	1884294.04	619.23	<0.0001
Voltaje	16562627.85	2	8281313.93	2721.45	<0.0001
Error	66945.48	22	3042.98		
Total	20398161.41	26			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 3042.9764 gl: 22

Material de electrodo Medias n E.E.

Aluminio+Fierro+Cobre 1024.78 9 18.39 A

Aluminio+Fierro 1304.44 9 18.39 B

Aluminio 1919.22 9 18.39 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 3042.9764 gl: 22

Voltaje Medias n E.E.

24V 476.67 9 18.39

A

20V 1377.78 9 18.39 B

16V 2394.00 9 18.39 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)

Remoción de DQO(%)

Variable	N	R ²	R ² Aj
CV Remoción de DQO(%)	27	1.00	1.00
0.64			

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	2044.65	4	511.16	1671.61	<0.0001
Material de electrodo	378.96	2	189.48	619.65	<0.0001
Voltaje	1665.68	2	832.84	2723.58	<0.0001
Error	6.73	22	0.31		
Total	2051.37	26			

Test:Duncan Alfa=0.05

Error: 0.3058 gl: 22

Material de electrodo Medias n E.E.

Aluminio 80.75 9 0.18

A

Aluminio+Fierro 86.92 9 0.18 B

Aluminio+Fierro+Cobre 89.72 9 0.18 C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$)

Test:Duncan Alfa=0.05*Error: 0.3058 gl: 22*Voltaje Medias n E.E.

16V 75.99 9 0.18

A

20V 86.18 9 0.18 B

24V 95.22 9 0.18 C

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0.05)***Coefficientes de correlación***Correlación de Pearson: Coeficientes\probabilidades*

	Remoción de	
<u>DQO (%)</u>	<u>Remoción de DQO (%)</u>	
	1.00	
<u>Voltaje (voltios)</u>		<u>0.90</u>

8.3. Imágenes del desarrollo de la investigación



Figura 8. Pruebas preliminares para la implementación del sistema de electrocoagulación de la investigación.

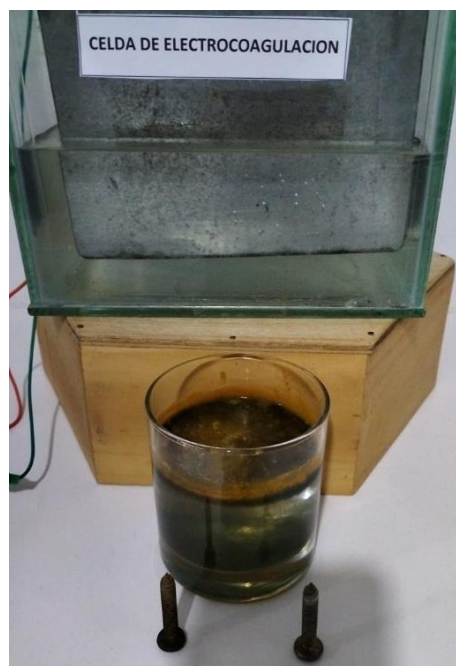


Figura 9. Pruebas de funcionamiento del sistema de electrocoagulación de la investigación

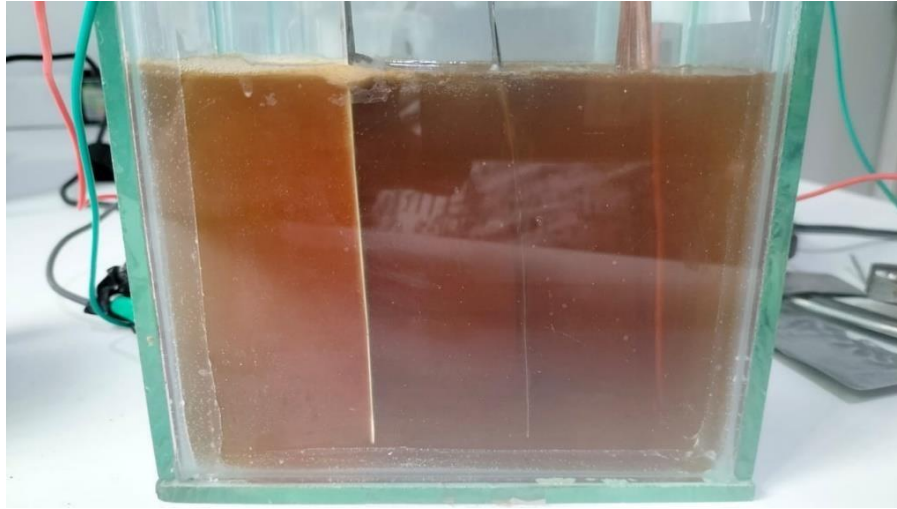


Figura 10. Tratamiento del lixiviado al inicio de la electrocoagulación con 16 V

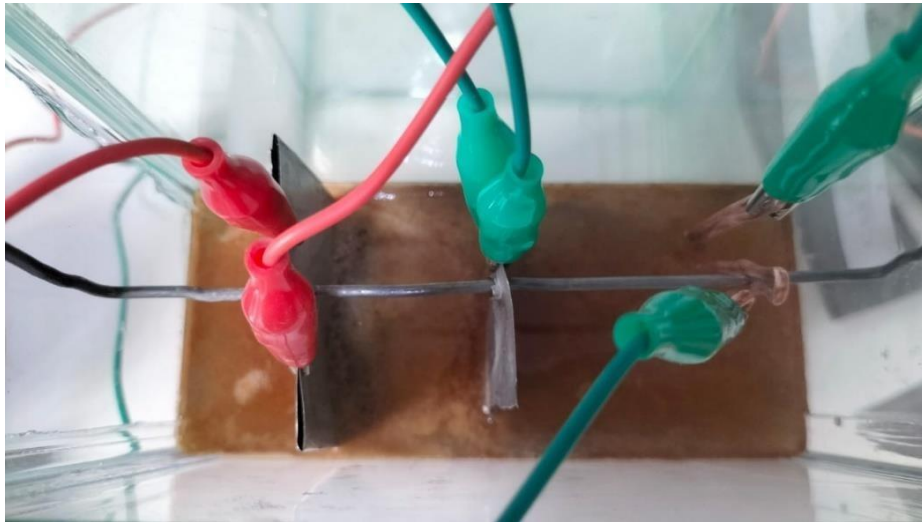


Figura 11. Vista planta de la celda de electrocoagulación cargada con lixiviado

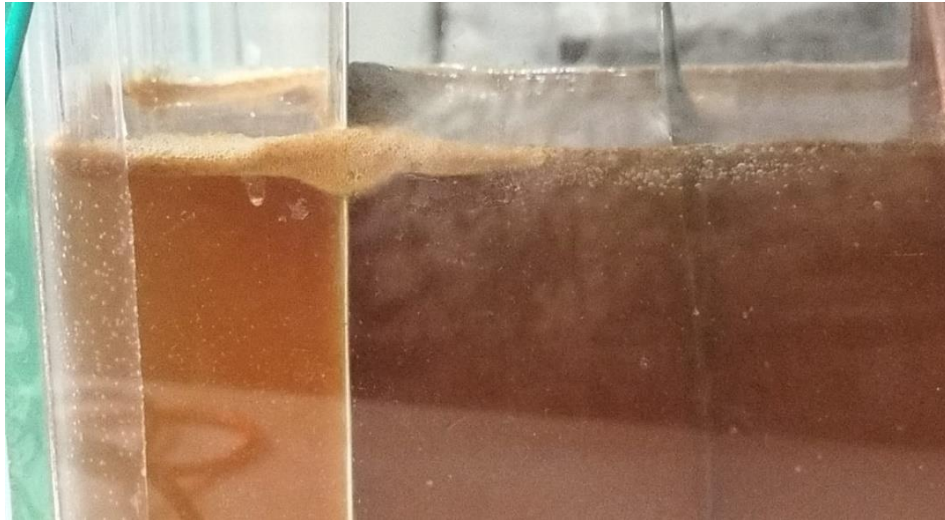


Figura 12. Formación de fases en la celda de electrocoagulación



Figura 13. Tratamiento de lixiviado con electrocoagulación a 20 voltios

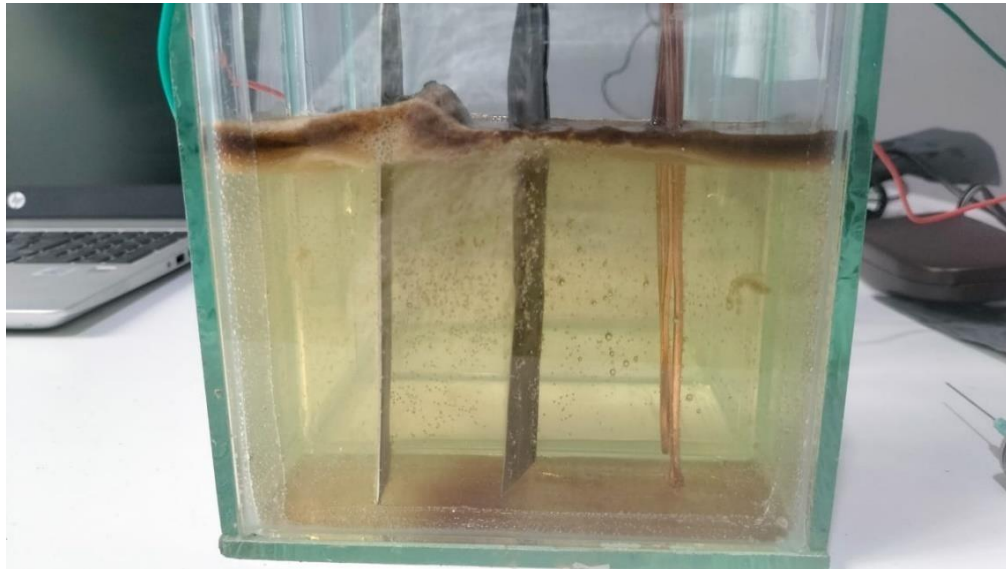


Figura 14. Final de tratamiento de lixiviado con electrocoagulación a 24 voltios



Figura 15. Toma de muestras del lixiviado tratado para el análisis de DQO

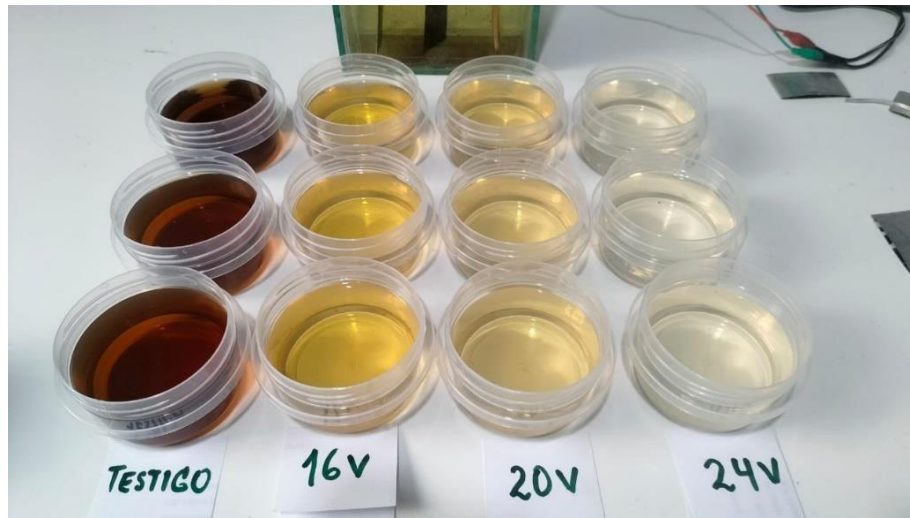


Figura 16. Muestras de los tratamientos de lixiviado con diferentes voltajes para el análisis de DQO.