

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



TESIS

**TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DE
ANTA MEDIANTE EL PROCESO DE ELECTROCOAGULACIÓN**

PRESENTADO POR:

Bach. AMANCA VILCA, Helen Melina
Bach. RAMÍREZ APARCO, Jhony Jonathan

**PARA OPTAR AL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO
QUÍMICO**

ASESOR:

Mgt. LECHUGA CANAL, Washington Julio

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, asesor del trabajo de investigación/tesis titulado:.....
TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS DEL RELLENO SANITARIO DE ANTA MEDIANTE EL PROCESO DE
ELECTROCOAGULACIÓN
presentado por:Helen.Melina.Amanca.Vilca.y.Jhony.Jonathan.Ramírez.Aparco.....
con Nro. de DNI:73032952.y.47991826....., para optar el título profesional/grado académico
de.....Ingeniero Químico.....

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por.....⁰¹ veces, mediante el
Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del *Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la
UNSAAC* y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de.....4%.....

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	x
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y
adjunto la primera hoja del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, ..01.. de.....julio..... de 2024.....



Firma

Post firma.....Washington Julio Lechuga Canal.....

Nro. de DNI.....23801349.....

ORCID del Asesor.....0000-0003-1967-1720.....

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid:27259:364014258

NOMBRE DEL TRABAJO

tesis TRATAMIENTO DE LIXIVIADOS por
ELECTROCOAGULACION - Amanca Vilca
a - Ramirez Aparco.pdf

AUTOR

Amanca Vilca - Ramirez Aparco

RECUENTO DE PALABRAS

20108 Words

RECUENTO DE CARACTERES

110953 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

106 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

2.9MB

FECHA DE ENTREGA

Jul 1, 2024 4:57 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Jul 1, 2024 4:59 PM GMT-5

● 4% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 4% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 2% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 20 palabras)
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente

DEDICATORIAS

A DIOS

Gracias por su infinita bondad y amor. Por permitirme llegar hasta aquí y darme salud para cumplir mis objetivos.

A MIS PADRES: AMBROCIO Y CARMEN

Gracias por haberme dado educación, por sus consejos, el amor que siempre me han brindado, la comprensión, el cariño, la paciencia y el apoyo que me brindaron durante toda esta etapa de mi carrera profesional y gracias por enseñarme el sabio valor de la responsabilidad. A quienes les debo todo en mi vida, las palabras se quedan cortas para agradecerles tanto, es una fortuna ser una de sus hijas.

A MIS HERMANAS: SANDRA Y ZEIDA

Dios no pudo darme mayor bendición que ser su hermana, gracias por estar siempre a mi lado y por apoyarme en los buenos y malos momentos.

PARA NUESTRO ASESOR: MGTR. WASHINGTON

JULIO LECHUGA CANAL

Quien, con su profundo conocimiento, sus sabias enseñanzas y su sabia experiencia nos brindó todas las pautas necesarias para completar con el desarrollo de nuestra investigación.

HELEN MELINA

DEDICADO

A mi padre, Alipio Ramírez Bayona quien, con su altísimo respeto por el valor de la educación, supo inspirarme desde muy niño mi pasión por el saber y el conocimiento. Por su amor y entrega por educarme y enviarme a la universidad sin importar aquellos momentos difíciles.

A mi madre, que en paz descansa, Rita Aparco Pariona, por su amor maternal, protección y cuidado en mi infancia. Por ser la figura materna que necesite en mis peores momentos.

A mis hermanos Lucio, José, Beto y Candy, por su confianza en mí como ser humano, en mi dedicación y compromiso. Por su apoyo emocional y económico en tiempos difíciles.

A las oportunidades y desavenencias de la vida, cuyas lecciones me ayudan a ser mejor que ayer, me mostraron caminos que elegí y aprendí de ellas en momentos de mucha penumbra, pero también de mucha luz.

A ti que nunca dejaste de animarme e insistir con la importancia de graduarme, y estar listo para las oportunidades. Al final, siempre tuviste razón.

JHONY JONATHAN

AGRADECIMIENTO

Con el afecto y amor merecido queremos agradecer las numerosas colaboraciones y sugerencias recibidas para avanzar en este trabajo de investigación.

En primer lugar, queremos agradecer a nuestro docente y asesor, el Mgtr. Washington Julio Lechuga Canal. Nos gustaría agradecerle por el apoyo incondicional que nos brindó y por su valioso tiempo para ayudarnos a superar algunas de las dificultades encontradas en el desarrollo de nuestra investigación. También agradecemos la predisposición y colaboración del Dr. Antonio Ramiro Jesús Bueno Lazo; además queremos agradecer a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Química que nos enseñaron durante todo el proceso de formación profesional y al Gerente de Gestión Ambiental y Servicios de Saneamiento de la Municipalidad Provincial de Anta el Ing. Juan Gabriel Vázquez Urbina por todo su apoyo y todas las facilidades ofrecidas para el desarrollo de nuestra investigación.

LOS BACHILLERES

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo por objetivo evaluar el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Anta mediante el proceso de electrocoagulación en un reactor monopolar por lotes (batch) con configuración en serie. Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en un periodo de 120 minutos, con muestreos de cada 15 minutos de donde se estimó la influencia de las variables de estudio: la distancia entre electrodos (0.5, 1, 1.5 cm), densidad de corriente eléctrica (2, 2.5, 3 mA/cm²) y el tipo de electrodo (Al, Fe) sobre la turbiedad (NTU) de los lixiviados.

El proceso de electrocoagulación se llevó a cabo en dos etapas. En la primera etapa se estimó las mejores condiciones de tratamiento en términos de eliminación de turbiedad que se registraron con una densidad de corriente de 3 mA/cm², una distancia de separación de 0.5 cm y aluminio como ánodo; obteniéndose una remoción de 96.6 %. En la segunda etapa, repite el proceso de electrocoagulación con los parámetros de operación definidos en la primera etapa para la evaluación de la DQO. En estas condiciones, se eliminó el 90.12 % de la DQO.

Así mismo, se determinó la cinética de la reacción de degradación de la DQO siendo esta, una reacción de primer orden con una ecuación de velocidad $-r_A = (0.0194 \text{ min}^{-1})C_A$, de igual modo para la velocidad de eliminación de la turbiedad donde se obtuvo un comportamiento de primer orden, con una ecuación de velocidad $-r_A = (0.0485 \text{ min}^{-1})C_A$

Palabras clave: Electrocoagulación, Lixiviados, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Turbiedad.

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Descripción del problema de la investigación.....	1
1.2. Formulación del problema	2
1.2.1. Problema general.....	2
1.2.2. Problemas específicos	2
1.3. Objetivos de la investigación	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos.....	3
1.4. Hipótesis.....	3
1.5. Justificación de la investigación.....	4
CAPÍTULO II	6
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes:	6
2.2. Bases teóricas	11
2.2.1. Residuos sólidos.....	11
2.2.1.1. Composición de los residuos sólidos	12
2.2.2. Relleno sanitario.....	12
2.2.2.1. Clasificación de los rellenos sanitarios	13

2.2.3.	Relleno sanitario de Anta	13
2.2.4.	Lixiviados	15
2.2.4.1.	Clasificación de los lixiviados	15
2.2.4.2.	Características fisicoquímicas de los lixiviados	16
2.2.4.3.	Métodos de tratamiento de lixiviados	20
2.2.5.	Electrocoagulación	20
2.2.5.1.	Factores que influyen en la electrocoagulación	22
2.2.5.2.	Leyes de Faraday	23
2.2.5.3.	Ventajas de la electrocoagulación	26
2.2.5.4.	Desventajas de la electrocoagulación	26
2.2.6.	Cinética de degradación de la Demanda Química de Oxígeno	27
2.2.7.	Método integral y orden de reacción en la cinética química	27
CAPÍTULO III		29
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	29
3.1.	Ubicación geográfica	29
3.2.	Tipo de investigación	30
3.3.	Alcance de investigación	30
3.4.	Muestra	31
3.5.	Materiales	31
3.6.	Procedimiento	32

3.6.1.	Recolección de muestras	32
3.6.2.	Caracterización Físicoquímica de la muestra	33
3.6.3.	Proceso de electrocoagulación	33
a.	Armado del equipo de electrocoagulación	34
b.	Pasos para el proceso de electrocoagulación.....	35
3.7.	Diseño de la investigación	36
3.7.1.	Parámetros y variables de operación:.....	36
3.7.2.	Diseño experimental de las pruebas	37
3.7.3.	Definición de los parámetros del proceso	42
3.8.	Modelo Cinético de DQO y velocidad de remoción de la turbiedad	43
CAPÍTULO IV		45
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
4.1.	Caracterización del lixiviado crudo.....	45
4.2.	Proceso de electrocoagulación	47
4.2.1.	Efecto de la densidad de corriente y la distancia de separación de los electrodos en la turbidez final usando ánodo de aluminio con punto central.	49
4.2.2.	Efecto de la densidad de corriente y la distancia de separación de los electrodos sobre la turbidez final usando hierro de ánodo con punto central	53
4.3.	Parámetros del proceso de electrocoagulación.....	59
•	Cantidad de aluminio y hierro suministrado, en función de la corriente eléctrica.....	63

4.4. Cinética de degradación de la Demanda Química de Oxígeno	65
4.5. Velocidad de remoción de la turbiedad	69
CONCLUSIONES	74
RECOMENDACIONES	75
BIBLIOGRAFÍA.....	76
APENDICE	88
APENDICE A	88
A.1. PUNTO DE MUESTREO, CARACTERIZACIÓN Y ARMADO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN.....	88
.....	90
A.2. IMÁGENES DEL LIXIVIADO ANTES, DURANTE Y DESPUES DEL TRATAMIENTO POR ELECTROCOAGULACIÓN.	90
A.3. FOTOS DEL ARMADO DE LA CUBA, TOMA DE MUESTRAS, OPERACIÓN, ANÁLISIS DE DQO Y TURBIEDAD.....	92

Índice de tablas

Tabla 1: Caracterización físico-química de las muestras antes de la electrocoagulación.	33
Tabla 2: Valores máximos y mínimos de las variables independientes: niveles.	37
Tabla 3: Matriz de diseño a escala codificada.....	39
Tabla 4: Matriz de diseño a escala codificada y natural.	40
Tabla 5: Tabla de resumen con porcentaje de remoción de turbiedad.	42
Tabla 6: Cinética de reacción para la remoción de la turbiedad y la DQO.....	44
Tabla 7: Caracterización físico-química del lixiviado crudo.	45
Tabla 8: Eficiencia de remoción para cada condición de operación, utilizando electrodo de aluminio.....	52
Tabla 9: Eficiencia de remoción para cada condición de operación, utilizando electrodo de hierro.	56
Tabla 10: Porcentaje de remoción de la DQO, utilizando como ánodo el aluminio.	61
Tabla 11: Resumen de los parámetros para los cálculos de aluminio y hierro generados.	63
Tabla 12: Comparación del orden de reacción con diferentes autores.....	68

Indice de figuras

Figura 1: Relleno Sanitario de Anta.....	14
Figura 2: Ubicación geográfica del relleno sanitario de Anta.....	30
Figura 3: Diagrama de bloques del proceso de electrocoagulación.	33
Figura 4: Armado del equipo de electrocoagulación	34
Figura 5: Sistema de electrocoagulación.....	35
Figura 6: Efecto de la densidad de corriente y la distancia entre separación en la turbiedad final, con ánodo de aluminio y punto central.	50
Figura 7: Efecto de la densidad de corriente y la distancia de separación de electrodos en la turbiedad final, con ánodo de hierro con punto central.....	54
Figura 8: Comparación de la eficiencia de electrodos según el porcentaje de la remoción de turbiedad.....	57
Figura 9: Porcentaje de remoción de la turbiedad con 3 mA/cm ² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.....	60
Figura 10: Porcentaje de remoción de la Demanda Química de Oxígeno, con 3 mA/cm ² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.....	62
Figura 11: Reducción de la DQO (mg/L) en función del tiempo, con 3 mA/cm ² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.	66
Figura 12: Cinética de reacción de orden 1 para la remoción de la DQO, con 3 mA/cm ² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.....	67
Figura 13: Cinética de reacción de orden 2 para la remoción de la DQO, con 3 mA/cm ² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.....	69
Figura 14: Reducción de la turbiedad (NTU) en función del tiempo, con 3 mA/cm ² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.....	70

Figura 15: Comportamiento de primer orden para la velocidad de eliminación de la turbiedad, con 3 mA/cm² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.71

Figura 16: Comportamiento de segundo orden para la velocidad de eliminación de la turbiedad, con 3 mA/cm² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.73

Índice de acrónimos

DQO	: Demanda Química de Oxígeno.
DBO₅	: Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días
DBO₅/DQO	: Relación DBO ₅ /DQO
NTU	: Nephelometric Turbidity Unit (Unidad Nefelométrica de Turbidez).
MINAM	: Ministerio del Ambiente.
TSS	: Total Solid Suspend (Sólidos Totales en Suspensión)
H₂O₂	: Peróxido de Hidrogeno
EC	: Electrocoagulación
CC	: Coagulación
DIGESA	: Dirección General de Salud Ambiental
FEM	: Fuerza Electromotriz
PET	: Tereftalato de polietileno
ST	: Sólidos Totales
SVT	: Sólidos Volátiles Totales
SFT	: Sólidos fijos totales
SST	: Sólidos Suspendidos Totales
SSV	: Sólidos Suspendidos Volátiles
SSF	: Sólidos Suspendidos Fijos
SDT	: Sólidos Disueltos Totales

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Descripción del problema de la investigación

Uno de los mayores problemas que se vive en la actualidad, es la generación excesiva de residuos sólidos, más del 16.9% de los residuos generados a nivel mundial termina en un lugar de disposición final como vertederos o rellenos sanitarios para su adecuada eliminación (Bastidas & Castro, 2004).

En el Perú, un problema ambiental grande es la disposición final de los residuos sólidos, que en muchas ocasiones estos son dispuestos en diversas zonas de manera arbitraria en contacto directo con los suelos y corrientes acuíferas, debido a las carentes propuestas de proyectos de gestión de residuos sólidos por parte de nuestras autoridades. Además, del crecimiento demográfico descontrolado que va en aumento año a año que, en consecuencia, genera un incremento en la producción de residuos sólidos y esto a su vez, en la presencia de grandes volúmenes de lixiviados producto de la propia descomposición de los residuos y la infiltración de lluvias en los mismos. La poca tecnificación en los tratamientos de residuos sólidos y la necesidad de 256 nuevos rellenos sanitarios, según Fabiola Muñoz, ex ministra del MINAM en el año de 2018, da una impresión abismal, y que lamentablemente va ocasionando serios problemas en la salud pública y preservación del ambiente (Martínez Montoya et al., 2018). Debido a los requerimientos de calidad de las aguas superficiales y subterráneas, el tratamiento de los lixiviados se ha convertido en la mayor preocupación ambiental relacionada a los rellenos sanitarios (Luján Diaz & Sánchez Soto, 2020).

Los lixiviados producidos a partir de la descomposición de la materia orgánica en el relleno sanitario de Chacán, ubicado en la provincia de Anta y la región del Cusco, es

recirculado mediante una bomba, y en épocas de lluvia incrementa su volumen haciendo que este sea vertido directamente a los suelos.

Los lixiviados generados en los rellenos sanitarios, es considerado como uno de los líquidos más peligrosos que existe, debido a su alto contenido de patógenos, materia orgánica, sustancias tóxicas y metales pesados (DIGESA, 2009). Una mala disposición y tratamiento pueden contaminar las aguas superficiales, subterráneas y el suelo, teniendo un efecto catastrófico en la flora, fauna e incluso en las poblaciones aledañas al relleno sanitario (Díaz et al., 2017).

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ¿Cuál será el porcentaje de eliminación de la turbiedad de los lixiviados del relleno sanitario de Anta, mediante el proceso de electrocoagulación?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las características físico químicas de los lixiviados del Relleno Sanitario de Anta?
- ¿Cuál es el efecto de la distancia entre electrodos, la densidad de corriente y el tipo de electrodo, en la remoción de la turbiedad en los lixiviados del Relleno Sanitario de Anta?
- ¿Cuáles son los parámetros de distancia entre electrodos, la densidad de corriente y el tipo de electrodo, para la mejor remoción de la turbiedad y la DQO en los lixiviados del Relleno Sanitario de Anta?
- ¿Cuál es el modelo cinético para la remoción de la turbiedad y la DQO, en los lixiviados del Relleno Sanitario de Anta?

1.3.Objetivos de la investigación

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la remoción de la turbiedad de los lixiviados del relleno sanitario de Anta, mediante el proceso de electrocoagulación.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar la caracterización fisicoquímica de los lixiviados del relleno sanitario de Anta.
- Evaluar el efecto de las variables distancia entre electrodos, la densidad de corriente y el tipo de electrodo, en la remoción de la turbiedad en los lixiviados del Relleno Sanitario de Anta.
- Determinar los parámetros de distancia entre electrodos, la densidad de corriente y el tipo de electrodo, para la mejor remoción de la turbiedad y la DQO, en los lixiviados del Relleno Sanitario de Anta.
- Determinar el modelo cinético para la remoción de la turbiedad y la DQO, en los lixiviados del Relleno Sanitario de Anta.

1.4. Hipótesis

El tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario de Anta por electrocoagulación en un reactor monopolar batch con arreglo en serie, es eficaz y depende en gran medida de la distancia entre electrodos, la densidad de corriente y el tipo de electrodo.

1.5. Justificación de la investigación

El presente trabajo de investigación se justifica en evaluar la eficiencia del tratamiento de los lixiviados provenientes del relleno sanitario de Anta mediante el proceso de electrocoagulación como una alternativa de tratamiento, que permita la mejora de la calidad del lixiviado.

Los resultados que se obtengan de la investigación serán un alcance importante para la implementación de un sistema de tratamiento de los lixiviados por parte de las autoridades gubernamentales de la municipalidad de Anta y, de este modo evitar la contaminación del suelo y las aguas subterráneas del lugar en mención. Debido a que en temporadas de precipitaciones existe rebalse en el lugar de almacenamiento de los lixiviados (Suero Sánchez, 2022) y gran parte de la población habitante en los alrededores del relleno sanitario de Anta que se ocupa del cultivo de vegetales y la ganadería. Por lo tanto, es sustancial resguardar la calidad de los suelos y el agua subterránea.

Tecnológicamente, la aplicación de este mecanismo es propicia gracias a su corto tiempo de residencia en el sistema. Asimismo, la electrocoagulación permite la remoción de materia orgánica y está exenta de la adición de sustancias químicas. Por consiguiente, se genera una menor porción de lodos siendo así considerada una tecnología verde que permitirá el resguardo y preservación del ambiente; así como, la mejora de la calidad de vida de la población en la provincia de Anta.

La aplicación de la electrocoagulación para el tratamiento de lixiviados representa bajos costos de construcción y operacional, alta eficiencia en la remoción de contaminantes en comparación a otras metodologías de tratamiento convencionalmente empleados (procesos aeróbicos (20 USD/m³), biológicos (45 USD/m³), osmosis inversa (10 USD/m³),

los cuales representan altos montos en inversión y mantenimiento, además, de ostentar un porcentaje de remoción deficiente (Giraldo, 2014)).

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes:

En lo concerniente a la revisión bibliográfica del tema en estudio se tienen los siguientes trabajos de investigación:

- Ninan Valer & Zambrano Jarandilla, (2019), en su tesis titulada “*Tratamiento de los lixiviados del Relleno Sanitario de Jaquira por Electrocoagulación*”, estudiaron la electrocoagulación como alternativa para el tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario de Jaquira, en un reactor tipo batch con configuración monopolar, con electrodos de aluminio (ánodo) y acero inoxidable (cátodo) para lixiviados antiguos y nuevos, donde se tuvo como variables la distancia entre electrodos, densidad de corriente y tiempo de remoción, y vio la influencia en la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), sólidos suspendidos totales (TSS) y demanda química de oxígeno (DQO). Se obtuvo las mejores remociones de DBO₅ y TSS en un tiempo de 30 minutos, sin embargo, para la DQO se observó que la remoción continúa en función al tiempo, por esta razón se tomó 120 minutos. Para estos tiempos el lixiviado antiguo alcanzó una remoción de DBO₅ mayor a 70%, remoción de TSS mayor a 45% y remoción de DQO mayor a 20%. En el caso del lixiviado nuevo se alcanzó una remoción mayor a 50% de DBO₅, remoción mayor a 28% de TSS y remoción mayor a 8% de DQO. Se determinó que el tratamiento es mejor para el lixiviado antiguo con mayor remoción de parámetros (DBO₅, DQO y TSS), obteniéndose los mejores resultados a una densidad de corriente de $10 \frac{mA}{cm^2}$, con una distancia entre electrodos de 2 cm, para remociones de 69.12% de DBO₅, remoción

de 70.54 % de TSS en 30 minutos, y una remoción del 34.78% para la DQO en un tiempo de 120 minutos.

- Tito Huallpa & Rojas Rodriguez, (2022), en su investigación titulada ***“Remoción de materia orgánica de los lixiviados del relleno sanitario de Urubamba mediante el proceso electroquímico”***, tuvo por objetivo remover la materia orgánica de los lixiviados generados en el relleno sanitario de Urubamba, mediante el proceso electroquímico de Electroflux, combinando las etapas de electrodisolución con electrodos de aluminio y acero al carbón, seguida por una oxidación con peróxido de hidrógeno (H₂O₂) y finalmente una etapa de floculación con poliacrilamina, en un reactor batch con una configuración monopolar. Se encontró una remoción del 98.05% de DQO, correspondiente a $1 \frac{mA}{cm^2}$, una carga eléctrica de $1000 \frac{C}{L}$, con una concentración de H₂O₂ de 500 ppm y pH inicial de floculación de 10.
- Ricordel & Djelal, (2014), en su investigación titulada ***“Tratamiento de lixiviados de vertederos con alta proporción de materiales refractarios por electrocoagulación: rendimiento del sistema y características de decantación de lodos”***, se plantearon realizar la remoción de contaminantes presentes en un lixiviado de vertedero francés especialmente de la demanda química de oxígeno (DQO) por el proceso de electrocoagulación, que debe ser inferior a 120 mgO₂/L, teniendo como objetivo examinar la viabilidad de la electrocoagulación en el tratamiento de lixiviados de vertederos que tienen baja biodegradabilidad y un alto nivel de compuestos inorgánicos. Para tal fin se hace el análisis del efecto que tiene la densidad de corriente (23-95 A/m²), la distancia entre electrodos (2-4 cm) y la naturaleza del cátodo para hallar las óptimas condiciones de operación, haciendo uso de placas

aluminio como ánodo y dos tipos de cátodo (aluminio y grafito). Estos parámetros se evaluaron mediante DQO, turbidez, absorbancia, color y el consumo de energía eléctrica. Se concluyó que para alcanzar la concentración de 120 mgO₂/L de DQO transcurre un tiempo de 135 minutos de electrocoagulación con las siguientes condiciones óptimas: densidad de corriente de 95 A/m² y 2 cm de separación entre electrodos de aluminio, siendo la electrocoagulación un mecanismo potencial para el tratamiento de lixiviados de vertederos cumpliendo la normativa de descarga de DQO.

- Hassan Pahlavanzadeh, (2010), en su artículo ***“Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment of paper mill wastewater”***, investigó el rendimiento efectivo de la electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de fábricas de papel, utilizando diferentes combinaciones de electrodos de aluminio y hierro, considerando variables como el pH, temperatura y densidad de corriente en la remoción de color y DQO, así mismo se encontró que la combinación de aluminio-aluminio fue eficiente en la remoción de color y la combinación hierro-hierro fue efectivo en la remoción de DQO, cuando la DQO, el color son importantes, es mejor utilizar la combinación de aluminio-hierro o hierro-aluminio.
- Murat, Mehmet, & Mahmut,(2006), en su artículo ***“Tratamiento de aguas residuales textiles por electrocoagulación: evaluación técnica y económica”***, realizaron un estudio de electrocoagulación tomando en cuenta electrodos de hierro y aluminio con configuraciones monopolares en paralelo, monopolares en serie y bipolares en serie. Se consideró el tiempo y pH como variables para la remoción de la turbiedad y la

DQO en un lixiviado de una industria textil en Turquía. Se observó que un ambiente ácido es más adecuado para la eliminación de DQO para los materiales (hierro y aluminio). Para electrodos de hierro se tiene un efecto significativo para la eliminación de la DQO y la turbidez; así mismo la configuración bipolar en serie fue efectiva con una remoción del 70% en DQO a pH 5; por otro lado, la configuración monopolar en serie removi6 hasta un 90% de turbiedad a un pH de 6 a 7 mientras que, para los electrodos de aluminio, se obtuvieron valores cercanos entre las tres configuraciones, en el caso de la turbidez fue efectiva en medio neutro. Por otro lado, el avance de la electrocoagulación con electrodos de aluminio es más rápido (5 minutos) para los tres tipos de configuración. La configuración bipolar en serie elimin6 al menos 90% de turbiedad a un pH 5. Para la configuración monopolar en serie la remoci6n de DQO fue del 67% a una densidad de corriente de $50 \frac{A}{m^2}$

- Sedeqi et al. (2021), en su investigaci6n titulada “*Consumir la menor cantidad de energía y recursos en la electrocoagulación de lixiviados de vertederos*”, tiene como objetivo de estudio el tratamiento de lixiviados por electrocoagulación optimizando el consumo de energía y recursos. Los impactos del pH inicial (4-8), intensidad de corriente eléctrica (1-5 A), temperatura inicial (25-45 °C), y tiempo de retenci6n (15-75 min) fueron investigados en la eliminaci6n de DQO, haciendo uso de placas de aluminio como ánodo y cátodos de hierro. El mejor desempeño se obtuvo a pH 5.4, corriente de 4 A, tiempo de reacci6n de 60 min y temperatura inicial de 40 °C alcanzando un 71.78 % de remoci6n de DQO., en el segundo escenario de optimizaci6n se tuvo en cuenta los costos operativos y capital. Se minimiza el uso de productos químicos, electricidad y calefacci6n, además se reducen los tamaños de

equipos y tanques. Con estas restricciones se logró una remoción de DQO del 51% a pH 6, intensidad de corriente de 3.4 A, temperatura inicial de 30 °C y 47 minutos de duración del proceso.

- Akyol (2011), en su investigación ***“Tratamiento de aguas residuales de fabricación de pinturas por electrocoagulación”***, determinó los efectos operativos para el proceso de electrocoagulación de aguas residuales de fabricación de pintura, para los parámetros siguientes: tipo de electrodo (Al o Fe), pH inicial (2–10), densidad de corriente (5–80 A/m²) y el tiempo de operación (0–50 min). Las más altas eficiencias de remoción de DQO y TOC (carbono orgánico total) fueron de 93% y 88% para Fe, 94% y 89% para Al, electrodos en las condiciones óptimas (35 A/m², 15 min y pH 6,95). Los costos operativos para la remoción en las condiciones óptimas se calcularon para electrodos de Fe y Al como 0,187 €/m³ y 0,129 €/m³ respectivamente, por otro lado, se hizo la prueba de toxicidad para obtener información sobre el efecto tóxico de las aguas residuales crudas y tratadas en condiciones óptimas de operación. Las muestras medidas por el método respirométrico apenas contenían toxicidades.
- Ilhan et al. (2008), en su trabajo de investigación titulada ***“Tratamiento de lixiviados por electrocoagulación con electrodos de aluminio y hierro”***, estudiaron el uso de la electrocoagulación (EC) en el tratamiento de lixiviados del vertedero de Odaeri en Estambul en un proceso discontinuo. Primero, se compara la EC con los procesos convencionales de coagulación química (CC) para la eliminación de DQO. Los resultados preliminares de la comparación, indican que el proceso EC tiene un rendimiento mayor que el proceso CC.

Investigaron el impacto de las variables del proceso, como el material del electrodo, la densidad de corriente (348–631 A/m²), el pH, el costo de procesamiento y el tiempo de ejecución del proceso EC respecto a la eficiencia de eliminación de DQO. Así reportaron que el electrodo de aluminio proporciona una tasa de eliminación de DQO más alta (56%) que el electrodo de hierro (35%) durante un período de tratamiento de 30 minutos, aplicando una densidad de corriente de 348 A/m².

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Residuos sólidos

Los residuos sólidos se consideran material o sustancia inservible que no tiene "valor directo" para el que lo genera y necesita ser desechado. Son sustancias, productos o subproductos en estado sólido o semisólido, que pueden presentar peligros para la salud y el medio ambiente de no ser manejado adecuadamente. Estas emisiones se generan principalmente no solo por la producción de bienes y servicios, sino también por actividades de consumo (INEI, 2020).

Los residuos sólidos son materiales que se desechan al final de su vida útil y generalmente no tienen valor económico. Consisten principalmente en desechos en la producción, procesamiento o uso de bienes de consumo. La mayor parte de estos desechos sólidos se pueden reutilizar o transformar a través de un reciclaje adecuado. Los principales "productores" de los residuos sólidos municipales son los habitantes de las grandes ciudades, en un porcentaje muy alto, debido principalmente a la poca conciencia del reciclaje moderno (Rivas Arias, s.f).

2.2.1.1. Composición de los residuos sólidos

La composición se refiere al contenido que posee un residuo sólido. Según Hernández Campanella (2013), la composición promedio de los residuos sólidos a nivel nacional expresa una preponderancia de la materia orgánica con un 50.43%, materia follaje con un 2.97%, papel con un 3.96%, cartón con un 3.48%, vidrio con un 3.05%, plástico Tereftalato de Polietileno (PET) con un 3.63%, plástico duro con un 2.48%, bolsas con un 4.41%, tecnopor y similares con un 0.78%, metales con un 2.64%, telas y textiles con un 1.61%, caucho, cuero y jebe con un 1.25%, pilas con un 0.47%, restos de medicina y focos con un 0.55%, residuos sanitarios con un 6.89%, material inerte con un 8.07% otros con un 3.33%.

2.2.2. Relleno sanitario

Son instalaciones asignadas para la disposición sanitaria y ambientalmente segura de los residuos sólidos en superficie o bajo tierra, de acuerdo con los principios y métodos de saneamiento e ingeniería ambiental (MINAM, 2011).

Los rellenos sanitarios son una técnica de la ingeniería que tiene la finalidad de realizar la disposición final de los residuos sólidos, esta alternativa es relativamente económica y cumple con los criterios técnicos. Se basa en la separación de desechos por medio de celdas o diferentes tipos de capas confinadas y compactadas, finalmente son recubiertas con suelo arcilloso (Tito, 2021).

El relleno sanitario constituye el procedimiento más usualmente empleado para la disposición de los residuos sólidos.

Para la instauración de un relleno sanitario se requiere de un suelo impermeable que garantice la preservación aguas superficiales, subterráneas y del mismo suelo, evitando así su contaminación por la infiltración de lixiviados (Prando, 1996).

2.2.2.1. Clasificación de los rellenos sanitarios

Los rellenos sanitarios se clasifican de acuerdo al tipo de operación, estos son:

- **Relleno sanitario manual**

El esparcido, compactación y cobertura de los residuos se efectúa mediante el uso de herramientas simples como rastrillos, pisones manuales, entre otros y la capacidad de operación diaria no es excedente a las 20 toneladas de residuos. Se restringe su operación en horario nocturno.

- **Relleno sanitario semi-mecanizado**

La capacidad máxima de operación diaria no debe exceder las 50 toneladas de residuos y los trabajos de esparcido, compactación y cobertura de los residuos se realizan con el apoyo de equipo mecánico, siendo posible el empleo de herramientas manuales para complementar los trabajos del confinamiento de residuos.

- **Relleno sanitario mecanizado**

La operación hace uso de un compactador de residuos sólidos y se realiza íntegramente con equipos mecánicos especializados para el movimiento de tierra, así como: tractor de oruga, cargadores frontales, retroexcavadora, volquetes, etc. y, su capacidad de operación diaria es mayor a las 50 toneladas (DIGESA, 2009).

2.2.3. Relleno sanitario de Anta

Es una instalación controlada, destinada a la disposición segura de los residuos sólidos bajo tierra, está ubicado en los terrenos de la comunidad campesina de Chacán, su

construcción se inició en el año 2015 y su funcionamiento en abril del 2016. El relleno sanitario de Anta clasifica como un relleno sanitario manual, ocupa un área de cuatro hectáreas y está compuesto por:

- Área administrativa.
- Almacén.
- Vestidores y comedor
- Área de segregación
- Área de compostaje
- 2 trincheras.
- Tanque de almacenamiento de lixiviados de trincheras.
- Cerco perimétrico (Suero Sánchez, 2022).

La figura 1 muestra una vista panorámica del relleno sanitario de Anta,

Figura 1

Relleno Sanitario de Anta



2.2.4. Lixiviados

Los lixiviados se definen como los líquidos que se han percolado a través de los residuos sólidos y han extraído materiales suspendidos y disueltos de estos. En la mayoría de los vertederos, los lixiviados son el resultado de la descomposición de los desechos y líquidos provenientes de fuentes externas, como las aguas superficiales, la infiltración de aguas pluviales y las aguas subterráneas que ingresan a relleno (Arellano Díaz & Guzmán Pantoja, 2011).

Un lixiviado es especialmente producido por la precipitación pluvial que penetra el material de la cubierta, atravesando las capas de desechos y transportan concentraciones significativas de materia orgánica en descomposición y otros contaminantes. Otros factores que intervienen en la formación de lixiviados son el contenido de humedad de los propios residuos, el agua de descomposición y la infiltración de las aguas subterráneas (MINAM, 2011).

2.2.4.1. Clasificación de los lixiviados

Lixiviados nuevos. – Los lixiviados nuevos presentan un cociente de biodegradabilidad $DBO_5/DQO > 0.5$, lo cual indica una alta biodegradabilidad (Dany y otros, 2018), una relación de $COT/DQO > 0.3$, pH alrededor de 6.5, concentración de metales de 2 g/l, preponderancia de ácidos grasos volátiles y compuestos de alto peso molecular (Ávila Armas & Silva Vásquez, 2010).

Lixiviados intermedios. - Los lixiviados intermedios muestran una carga entre 3 a 15 mgO_2/L , concentración de ácidos carboxílicos que representan del 20 al 30 % de la carga orgánica, la relación $DBO_5/DQO = 0.2$, un pH casi neutro, compuestos de peso molecular superior 500 g/mol (Ávila Armas & Silva Vásquez, 2010).

Lixiviados antiguos. – Los lixiviados antiguos presentan un cociente de biodegradabilidad $DBO_5/DQO < 0.1$ (Dany y otros, 2018). $COT/DQO > 0.4$, indicando la presencia de compuestos difícilmente oxidables, presencia de compuestos de elevado peso molecular superior a 5000 g/mol, pH superior a 8 y concentración de metales menor de 50 mg/l (Ávila Armas & Silva Vásquez, 2010).

2.2.4.2. Características fisicoquímicas de los lixiviados

La cantidad de lixiviado producido es pequeña en comparación con la cantidad producida por otros tipos de aguas residuales, como las aguas residuales domésticas. Sin embargo, los contaminantes que contiene son enormemente peligrosos. Existen varias características de lixiviados donde se hace énfasis a su poder contaminante; así mismo, se concluye usualmente que los lixiviados contienen toda característica contaminante principal, es decir, alto contenido de materia orgánica, alto contenido de nitrógeno y fósforo, presencia abundante de patógenos e igualmente de sustancias tóxicas como metales pesados y constituyentes orgánicos (Giraldo, 2014).

Las características básicas de los lixiviados son:

- **DQO (Demanda Química de Oxígeno).**- Es considerado el parametro más crítico para el tratamiento de lixiviados, se mide a partir de la cantidad de oxígeno disuelto necesario para la degradación química de los contaminantes orgánicos que contiene. Se conoce poco acerca de la contribución exacta de cada componente al total del valor de la DQO debido a la complejidad de los lixiviados de un relleno sanitario; sin embargo, es necesario investigar la composición de la DQO en los lixiviados ya que puede ayudar a mejorar la comprensión de la distribución (Toala Perez, 2019). Las diferencias en los valores de DQO pueden deberse a: el diseño del relleno sanitario, la

composición de los residuos sólidos urbanos, las características del sitio y la edad del relleno sanitario (Qarani Aziz y otros, 2010).

Este parámetro mide el carbón orgánico total, excepto algunos compuestos aromaticos como el benceno.

- **DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno).**- Es considerado el parámetro más utilizado en analisis para la calidad de aguas residuales y superficiales. La medicion de este parámetro involucra la medicion del oxigeno disuelto usado por los microorganismos durante la oxidación bioquímica de la materia orgánica (Qarani Aziz y otros, 2010)
- **Relación DBO₅/DQO.**- Este parametro indica la edad del lixiviado, para un lixiviado joven este cociente es mas alta en comparación a un lixiviado maduro. Una baja relación BDO₅/DQO indica que el lixiviado es mas estable y es muy dificil su degradación por medios biológicos (Qarani Aziz y otros, 2010). El tratamiento por electrocoagulación odebece a valores minimos de BDO₅/DQO.
- **Turbiedad.**- Esta característica del agua viene definida por la cantidad de material en suspensión que se encuentra en el agua. Cuanto más turbia está el agua, mayor es el material suspendido.
- **Conductividad.**- El aumento de la conductividad aumenta la densidad de corriente y mantiene un voltaje constante aplicado a la unidad de electrocoagulación. Además, a medida que aumenta la conductividad, el voltaje aplicado disminuye, manteniendo constante la densidad de corriente.

La adición de electrolitos como NaCl o CaCl₂ aumenta la conductividad de las aguas residuales.

- **pH.-** El pH afecta la eficiencia actual de la formación de hidróxido durante la disolución del metal. Varios estudios han demostrado que el pH cambia durante la electrocoagulación. Este cambio depende del material del electrodo y del pH inicial del agua que se está purificando.

Las reacciones que ocurren durante la electrocoagulación proporcionan la capacidad amortiguadora del ambiente acuoso, especialmente en aguas residuales alcalinas. Esta propiedad previene grandes cambios en el pH y requiere dosis más bajas de químicos para regular el pH.

- **Coloides.-** Es una medida del material en suspensión en el agua que, por su tamaño de alrededor de los 10^{-4} a 10^{-5} mm, se comporta como una solución verdadera y atraviesa el papel del filtro. Los coloides pueden ser de origen orgánico (macromoléculas de origen vegetal) o inorgánico (óxidos de hierro y manganeso). Los coloides se eliminan por floculación, por precipitación y por eliminación de arcillas (Barrera Díaz, 2014).
- **Sólidos totales (ST).** - El agua se evapora y se seca a una temperatura (103-105 °C), y es la suma de sólidos suspendidos totales, de las sales disueltas y de la materia orgánica.
- **Sólidos volátiles totales (SVT).** - La cantidad de materia orgánica capaz de volatilizarse por efecto de calcinación (550 °C \pm 50 °C, tiempo de 15 a 20 min), corresponden el 20 % de los sólidos totales.
- **Sólidos fijos totales (SFT).** - Residuos de la calcinación, forman parte de la materia inorgánica, representan el 80% de los sólidos totales.

- **Sólidos suspendidos totales (SST).** - Material constituido por los sólidos sedimentables, los sólidos suspendidos y coloidales que son retenidos por un filtro y secados a una temperatura de 103 a 105 °C.
- **Sólidos suspendidos volátiles (SSV).** - Representan la materia orgánica y son los que se volatilizan en la calcinación (550 °C), resultan de la diferencia en peso de los sólidos suspendidos totales (SST) y los sólidos suspendidos fijos (SSF).
- **Sólidos suspendidos fijos (SSF).** - Representan la materia inorgánica y son los sólidos suspendidos que permanecen como residuo de la calcinación (550 °C).
- **Sólidos disueltos totales (SDT).** - Material soluble constituido por materia orgánica e inorgánica que permanece como residuo después de evaporar y secar una muestra filtrada a través de un filtro a una temperatura de 103 °C.
- **Color.**- El color esta realcionado con la edad del agua residual que puede ser determinado cualitativamente en función al color y olor (Metcalf & Eddy , 1995).
Varios productos de desecho, alteran considerablemente las cualidades de color de las aguas. El color está clasificado como color aparente y color verdadero. **Color aparente** se considera al producido por el material suspendido mientras que **color verdadero** es el que permanece en el agua después de remover la turbiedad. (Barrera Díaz, 2014).
- **Olor.** – Estos son causados por la liberación de gases por la descomposicion de la materia orgánica, es desagradable pero es más tolerable que el del agua residual séptica. Por otro lado, la problemática de los olores está considerada como la principal causa de rechazo a la implantación de instalaciones de tratamiento de aguas residuales (Metcalf & Eddy , 1995).

2.2.4.3. Métodos de tratamiento de lixiviados

Las alternativas de tratamiento de lixiviados se pueden clasificar en función de diferentes características, como el nivel de tratamiento que logra cada tratamiento y los tipos de contaminantes que puede eliminar. Vale la pena recordar que los lixiviados contienen todas las principales clases de contaminantes conocidos, incluidos contaminantes orgánicos, nutrientes, patógenos y contaminantes tóxicos. Entre las principales metodologías de tratamiento de lixiviados se tiene: tratamiento de lixiviados por recirculación, evaporación, electrodisolución-floculación (ELECTROFLOX), electrocoagulación, osmosis inversa (Giraldo, 2014).

2.2.5. Electrocoagulación

Como alternativa a la coagulación química, se ha usado la coagulación generada por la aplicación de corriente eléctrica al agua residual. El paso de corriente eléctrica a través del medio acuoso causa la desestabilización de las partículas que se encuentran, bien sea emulsionadas, suspendidas o disueltas. A este proceso se le denomina electrocoagulación (Arango Ruiz, 2012).

Según Bermeo Garay & Ticono Gomez, (2016). “La electrocoagulación es una técnica que implica la adición electrolítica de coagulantes iones metálicos al electrodo; estos iones positivos, se absorberán sobre los coloides negativos, como ciertas sustancias químicas que ayudan a la coagulación en el método químico”. También; la electrocoagulación es un proceso que implica varios fenómenos químicos y físicos, usa electrodos para proveer iones al agua residual que se desea tratar.

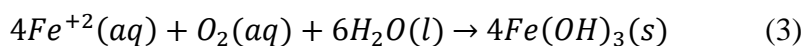
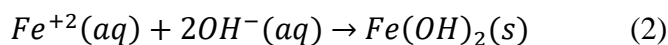
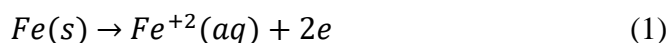
En esta técnica el coagulante es generado ‘in situ’ debido a una reacción de oxidación del ánodo y las especies cargadas o metales pesados pueden ser removidos del efluente

debido a la reacción entre iones con carga opuesta o debido a la formación de flóculos de hidróxidos metálicos (Mollah et al., 2001). En segundo lugar, la inestabilidad de los contaminantes, la suspensión de partículas y la destrucción de las emulsiones. Finalmente, las fases inestables se agregan o coleasen para formar aglomerados separables más grandes (Asaithambi et al., 2018).

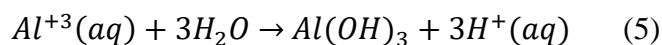
Como consecuencia de la disolución de los electrodos (de sacrificio) en el agua residual durante el tratamiento electroquímico, éstos van desgastándose a medida que transcurre el tiempo de operación (tiempo de vida útil), ya que éste se relaciona directamente con la corriente aplicada al sistema (amperaje) y el tiempo de residencia hidráulico del líquido a tratar, llegando un momento en el que es necesaria su reposición (Vassos & Ewing, 1987).

- **Oxidación en el ánodo.** – En el ánodo se produce la oxidación (pérdida de electrones) por transferencia de electrones en la superficie del ánodo, disolviéndose el material de sacrificio (Al o Fe) mediante las ecuaciones 1, 2, 3, 4 y 5.

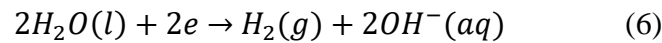
Ánodo: Fe



Ánodo: Al



- **Reducción en el cátodo.** – En el cátodo se produce la reducción (ganancia de electrones), así mismo se produce la electrolisis del agua mediante la ecuación 6.



2.2.5.1. Factores que influyen en la electrocoagulación

- **Densidad de corriente**

Este es el parámetro que tiene más influencia tanto a la remoción de contaminantes de las aguas residuales como al consumo de energía. Con el aumento de la densidad de corriente, aumentan los costos operativos y la tasa de remoción. Sin embargo, para altos consumos de energía se generan pérdidas, ya que la energía eléctrica se convierte en energía térmica y, en consecuencia, aumenta la temperatura de las aguas residuales tratadas (Guanoluisa Acero, 2012).

La calidad del agua tratada está determinada por la cantidad de iones producidos, la corriente de entrada y el tiempo de residencia en el sistema. Se sugiere mantener la densidad de corriente en el rango de 20-25 A/m² para una operación a largo plazo sin mantenimiento del sistema de electrocoagulación (Barrera Díaz, 2014).

- **Conductividad**

La densidad de corriente está relacionada con la conductividad, un aumento en la conductividad conlleva a un aumento en la densidad de corriente. La adición de cloruro de sodio o cloruro de calcio aumenta la conductividad de las aguas residuales y reduce los efectos adversos de los iones de carbonato o sulfato. Estos iones provocan la precipitación de Ca²⁺ y Mg²⁺ sobre el electrodo, formando una capa insoluble que incrementa el potencial y reduce la eficiencia de la corriente (Guanoluisa Acero, 2012).

- **Tipo de material del electrodo**

Los materiales más utilizados como electrodos de sacrificio son el aluminio y el hierro. El tipo de material del electrodo es un factor importante que interviene en la efectividad del tratamiento por electrocoagulación. Los estudios realizados con diferentes pares de ánodo-cátodo de hierro (Fe-Fe), aluminio (Al-Al) o una combinación (Fe-Al) (Al-Fe) demostraron que los pares de Al-Fe lograron una remoción efectiva para eliminar la DQO, turbidez y cobre. Sin embargo, se ha observado que el par (Fe/Fe) produce hasta nueve veces menos lodos por volumen de agua tratada en comparación con el par Al-Fe (Chen G. , 2004).

Otro tipo de electrodo usado es el acero inoxidable, se usa comúnmente como conductor eléctrico simple en combinación con un ánodo de desgaste para facilitar las reacciones de óxido-reducción. El aluminio y el hierro, por otro lado, se utilizan como conductores y electrodos de desgaste (Arango Romero, 2013).

- **Distancia de separación entre electrodos**

Típicamente en aplicaciones electroquímicas la distancia entre los electrodos está en el rango de 0.2 cm a 3 cm, dependiendo principalmente del tipo de proceso que se esté realizando (intermitente o continuo). Además, si la distancia entre electrodos aumenta el consumo de electricidad también aumenta (Huamán Boza, 2016). La remoción de los contaminantes es superior a distancias cortas de separación entre electrodos (Chen G. , 2004).

2.2.5.2. Leyes de Faraday

- **Primera ley de Faraday**

La masa de un elemento depositada o liberada en la celda electrolítica es independiente de la composición química del electrolito cuando se mantiene su valencia (Ninan Valer & Zambrano Jarandilla, 2019). En cuanto al proceso de electrocoagulación, la cantidad de sustancias formadas en un electrodo es proporcional a la cantidad de carga que pasa por el sistema. Esta ley no depende de la temperatura, la presión o las propiedades del solvente, siempre que la ionización sea favorable (Guanoluisa Acero, 2012).

- **Segunda ley de Faraday**

La cantidad de masa disuelta en la solución electrolítica o depositada en uno de los electrodos es directamente proporcional a la cantidad de electricidad (Q) que pasa a través del electrolito (Ninan Valer & Zambrano Jarandilla, 2019). Aplicado a la electrocoagulación, el número total de moles de sustancia formada en un electrodo está relacionado estequiométricamente con la proporción de electricidad suministrada en el sistema mediante la ecuación 7.

$$m = k * Q \quad (7)$$

Dónde:

m: Masa disuelta o depositada (g).

k: Constante de proporcionalidad (g/C)

Q: Producto de la intensidad de corriente (I) por el tiempo (t), mediante la ecuación 8.

$$Q(C) = I(A) * t(s) \quad (8)$$

La segunda ley de Faraday desarrollada puede ser aplicada para calcular la cantidad de sustancia disuelta o depositada en los electrodos para el proceso de electrólisis mediante la siguiente ecuación 9 (Ojeda Armaignac & Hing Cortón).

$$\Delta m_{teórico} = \frac{M \cdot I \cdot t_{EC}}{n \cdot F} \quad (9)$$

Donde:

Δm teórico : Cantidad de Aluminio o hierro disuelta o depositada (g).

M : Peso molecular de la sustancia (g/mol)

I : Intensidad de corriente (A)

t Ec : Tiempo de electrocoagulación (s)

n : Número de electrones

F : Constante de Faraday (96487 C/mol)

- **Tercera ley de Faraday**

La cantidad de sustancia disuelta o depositada en un electrodo por el paso de carga eléctrica (Q) está relacionada entre si con su equivalente químico, como se muestra en la ecuación 10.

$$\frac{m_1}{Eq_1} = \frac{m_2}{Eq_2} \quad (10)$$

Dónde:

m_1 : Masa del elemento que se deposita en el electrodo 1 (g).

m_2 : Masa del elemento que se deposita en el electrodo 2 (g).

Eq_1 : Equivalente químico de la sustancia que se deposita en el electrodo 1 (eq-g).

Eq_2 : Equivalente químico de la sustancia que se deposita en el electrodo 2 (eq-g).

2.2.5.3. Ventajas de la electrocoagulación

Son muchas las ventajas de utilizar este método, a continuación, se nombra algunos:

- Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros.
- Requiere de equipos simples y de fácil operación.
- Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos.
- Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de estos lodos.
- Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada.
- Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes.
- Reduce la contaminación en los cuerpos de agua.
- El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados.
- Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras.
- Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad (Mollah y otros, 2001).

2.2.5.4. Desventajas de la electrocoagulación

- Es necesario reponer los electrodos de sacrificio.

- Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado.
- No es efectivo en la remoción de DBO_5 soluble, proveniente de solventes y anticongelantes.
- El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso (Mollah y otros, 2001).

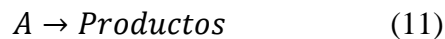
2.2.6. Cinética de degradación de la Demanda Química de Oxígeno

Se entiende como el estudio de la velocidad de reacción y los mecanismos mediante los que tienen lugar, por unidad de tiempo (Fogler, 2008).

2.2.7. Método integral y orden de reacción en la cinética química.

Para hallar los parámetros de la cinética de reacción, se utiliza el método de la integral.

Consideremos la siguiente ecuación:



Aplicando balance de moles.

$$\frac{dC_A}{dt} = -r_A \quad (12)$$

- Para una reacción de **orden 0**, $r_A = -k$, entonces:

$$\frac{dC_A}{dt} = -k \quad (13)$$

Integrando con límites $\int_{C_{A0}}^{C_A} dC_A = -k \int_{t_0}^t dt$ (14)

$$C_A - C_{A0} = -kt \quad (15)$$

$$C_A = C_{A0} - kt \quad (16)$$

- Para una reacción de **orden 1**, $r_A = -kC_A$, entonces:

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A \quad (17)$$

Integrando con límites $\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A} = -k \int_{t_0}^t dt$ (18)

$$\ln C_{A0} - \ln C_A = kt \quad (19)$$

$$\ln \frac{C_{A0}}{C_A} = kt \quad (20)$$

Si la comparamos la ecuación 20 con una ecuación de una recta lineal 21.

$$y = ax + b \quad (21)$$

Se obtiene que:

$$y = \ln \frac{C_{A0}}{C_A} \quad (22)$$

$$kt = ax \quad (23)$$

Al graficar $\ln \frac{C_{A0}}{C_A}$ y el tiempo se ajusta a una ecuación de línea recta como la ecuación 21,

de donde la pendiente será $a = k$

- Para una reacción de **orden 2**, $r_A = -kC_A^2$, entonces:

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A^2 \quad (24)$$

Integrando con límites $\int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A^2} = -k \int_0^t dt$ (25)

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kt \quad (26)$$

(Fogler, 2008)

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Las pruebas experimentales para el tratamiento de los lixiviados del relleno sanitario de la Provincia de Anta mediante electrocoagulación, se realizó en el laboratorio de Control de la Contaminación Ambiental PIQ214, de la Escuela Profesional de Ingeniería Química, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

La experimentación se llevó a cabo con una muestra de lixiviado, así mismo, se realizó la caracterización de este antes y después del tratamiento. Seguidamente, se evaluó la eficiencia del proceso electrocoagulación en la remoción de contaminantes, así mismo, se determinó la influencia de la distancia entre electrodos, densidad de corriente eléctrica y el tipo de electrodo en el proceso de tratamiento.

3.1. Ubicación geográfica

El muestreo se realizó en el relleno sanitario de Anta, que se encuentra ubicado en el distrito de Anta, provincia de Anta, departamento de Cusco. A continuación, se presenta la ubicación en coordenadas UTM del relleno sanitario.

Sistema de coordenadas	: UTM WGS84
Coordenada Este	: 808612.29 m E
Coordenada Norte	: 8512944.82 m S
Zona	: 18 S

A continuación, en la figura 2 se observa la ubicación geográfica del relleno sanitario de Anta.

Figura 2

Ubicación geográfica del relleno sanitario de Anta



3.2. Tipo de investigación

De acuerdo al objetivo de la presente investigación, es de tipo aplicado; ya que se aplican los conocimientos científicos para la solución de un problema. Este tipo de investigación busca encontrar e implementar estrategias para lograr objetivos específicos.

Al respecto, Esteban Nieto (2018) menciona que este tipo de investigaciones tiene como objetivo mejorar, perfeccionar u optimizar la funcionalidad de los sistemas, procedimientos, normas y regulaciones técnicas existentes, teniendo en cuenta el progreso científico y tecnológico. Por lo tanto, este tipo de investigaciones no son adecuadas para clasificar como verdadero, falso o posible, sino más bien a la de eficiente, deficiente, ineficiente, eficaz o ineficaz.

3.3. Alcance de investigación

La actual investigación es de nivel explicativo. En palabras de Hernández Sampieri et al. (2018), una investigación de nivel explicativo se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (supuestas causas-

antecedentes) para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos-consecuentes), dentro de una situación de control para el investigador. En este caso, se realizó la manipulación de las variables de la densidad de corriente eléctrica y la distancia entre electrodos y tipo de electrodo para determinar su efecto sobre el porcentaje de remoción de turbiedad.

3.4. Muestra

La muestra estuvo conformada por lixiviados antiguos del pozo N° 01 del relleno sanitario de Anta, información proporcionada por la administración de las instalaciones y comprobada también por Suero Sánchez (2022) en su análisis del índice biodegradabilidad DBO₅/DQO.

3.5. Materiales

3.5.1. Materiales de vidrio y otros

Para el proceso de electrocoagulación

- Electrodo de aluminio de 7 x 10 cm
- Electrodo de hierro de 7 x 10 cm
- Cuba electrolítica de vidrio de 10 x 11 x 13 cm
- Cables conectores

3.5.2. Equipos e Instrumentos

- Fuente de poder Phywe
- Multiparámetro MultiLogPRO
- Turbidímetro Lutron 2016
- Termoreactor Hanna HI839800
- Fotómetro Lovibond MD 600

- Termómetro de Hg
- Cronómetro
- Bagueta

3.5.3. Reactivos

- Vial COD/CSB 0-150 mg/L
- Sosa caustica DIRNA (99%)

3.6. Procedimiento

3.6.1. Recolección de muestras

Se hizo la recolección de muestras tipo compuestas, lo cual resulta de la homogenización de varias muestras de los pozos N° 01 (lixiviados antiguos). Las muestras de los lixiviados fueron tomadas entre los meses de abril y mayo del 2023, según la estación climatológica “Anta Ancachuro” en los meses antes mencionados reporta una temperatura máxima de 22.8 °C (Senamhi, 2024).

- a) Se usó la indumentaria de seguridad personal (uso de equipos de protección personal).
- b) Para el material de muestreo se utilizó recipientes PET (Tereftalato de polietileno) de 2 litros de capacidad. Seguidamente, se realizó el análisis en campo de pH, temperatura y conductividad eléctrica. Se recolectó un volumen de 10 L.
- c) Se transportó las muestras en un cooler con el fin de evitar el contacto con la luz y la radiación, ya que podrían modificar sus propiedades (APHA y otros, 2005). Se almacenó y refrigeró en el laboratorio de Tecnología de la UNSAAC a 4 °C (ANA & MINAGRI, 2016) con el fin de no variar sus propiedades iniciales.

3.6.2. Caracterización Físicoquímica de la muestra

Se realizó la caracterización de las muestras como son: pH, temperatura, conductividad eléctrica, turbiedad, Demanda Química de Oxígeno (DQO) como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1

Caracterización físico-química de las muestras antes de la electrocoagulación.

Parámetros Físico Químicos	Valor
Ph	
Temperatura (°C)	
Conductividad Eléctrica (mS/cm)	
Turbiedad (NTU)	
DQO (mg/L)	

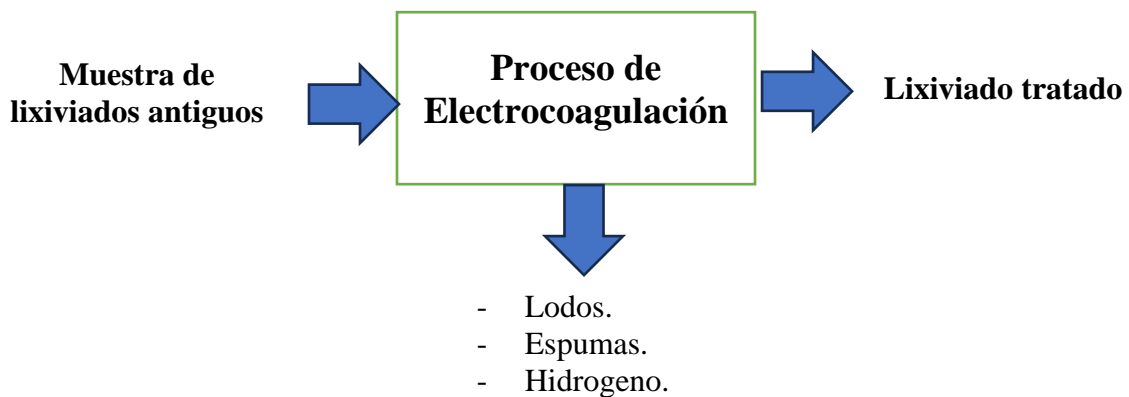
Los resultados obtenidos de la caracterización se compararon con los límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes de infraestructuras de residuos sólidos que establece el Decreto Supremo vigente N° -2009-MINAM.

3.6.3. Proceso de electrocoagulación

En la figura 3 se muestra el diagrama de bloques del proceso de electrocoagulación.

Figura 3

Diagrama de bloques del proceso de electrocoagulación.

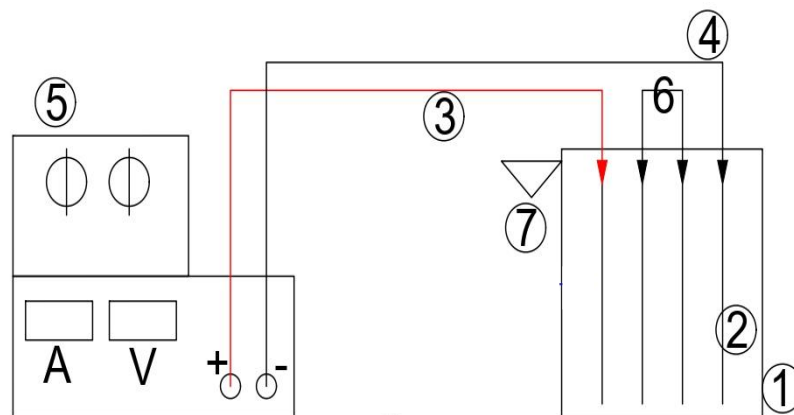


a. Armado del equipo de electrocoagulación

En la figura 4 se puede apreciar el armado del equipo de electrocoagulación, siendo un reactor tipo batch de 4 electrodos (2 electrodos de aluminio y 2 electrodos de hierro). Se hizo la conexión de los cables, positivo (hacia el ánodo) y negativo (hacia el cátodo) y un cable adicional que unió los electrodos centrales cerrando así, el paso de corriente en el circuito. La celda tuvo una configuración monopolar en serie, la capacidad de la celda es de 1 litro. Los componentes de dicho sistema se muestran en la figura 4.

Figura 4

Armado del equipo de electrocoagulación



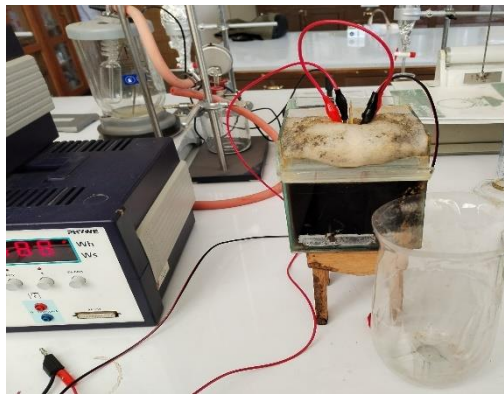
1. Celda electrolítica de vidrio
2. Electrodo (aluminio o hierro)
3. Cable positivo (ánodo)
4. Cable negativo (cátodo)
5. Fuente de poder
6. Cable de unión de electrodos intermedios

7. Canal de lodos

En la figura 5 se observa el sistema de electrocoagulación empleado para la experimentación de la presente investigación.

Figura 5

Sistema de electrocoagulación.



b. Pasos para el proceso de electrocoagulación

- Se hizo una limpieza mecánica de las posibles picaduras por corrosión y una limpieza química para remoción de aceites y grasas y la activación de las capas superficiales de metal.
- A continuación, se armó la configuración señalada en la figura 5 y se añadió 1 litro de muestra de lixiviado.
- Se configuró el suministro de amperaje requerido y en paralelo se controló el tiempo.
- Se tomaron volúmenes alícuotas a intervalos de tiempo, según la planificación de la experiencia, ver tabla 6. Y posteriormente se analizaron.

- La turbiedad y la DQO se midió dos horas después del proceso de electrocoagulación, ya que en la primera etapa de las pruebas experimentales se pudo observar que dentro de este tiempo, ya no hay una variación significativa en la remoción de estos parámetros. La técnica empleada para la medición de la DQO fue el método colorimétrico (Ninan Valer & Zambrano Jarandilla, 2019).

3.7. Diseño de la investigación

El diseño de investigación presente es de tipo factorial experimental. Se señala que: “Se trata de diseños factoriales, aquellos estudios en los cuales se manipulan en forma simultánea dos o más variables independientes, que se denominan factores, con la finalidad de analizar su efecto conjunto sobre una variable dependiente” (Carlessi Sánchez y Meza Reyes, 2017, p. 148).

3.7.1. Parámetros y variables de operación:

Se trabajó con los siguientes parámetros.

a) Parámetros de operación

- Temperatura (°C)
- pH
- Volumen de muestra (l)

b) Variables independientes

- Distancia entre electrodos (cm)
- Densidad de corriente $\left(\frac{mA}{cm^2}\right)$
- Tipo de electrodo

c) Variables dependientes

- Turbiedad final (NTU)

En la tabla 2 se muestra los valores bajos y altos de las variables independientes de la investigación.

Asaithambi et al. (2018), recomiendan una distancia de separación de 0,5 cm a 2 cm para resultados eficientes en la eliminación de DQO y turbidez. También menciona que, a una distancia mayor a 2 cm, la eficiencia de remoción disminuye.

Por otro lado, Chen G. (2004) menciona que el sistema de electrocoagulación funcione durante un largo período de tiempo sin mantenimiento, sugiere que su densidad de corriente sea de 2 a 2.5 mA/cm² a menos que se tomen medidas para una limpieza periódica de la superficie de los electrodos.

Tabla 2

Valores máximos y mínimos de las variables independientes: niveles.

Variables independientes	Nivel alto	Nivel bajo
Distancia entre electrodo (cm)	1.5	0.5
Densidad de corriente ($\frac{mA}{cm^2}$)	3	2
Tipo de electrodo	Ánodo/cátodo (Al/Fe)	Ánodo/cátodo (Al/Fe)

3.7.2. Diseño experimental de las pruebas

En esta etapa se evaluó la incidencia de las tres variables independientes con dos niveles sobre la turbiedad final.

Se utilizó el diseño factorial con punto central.

$$N^{\circ} = 2^k + P \quad (26)$$

Donde:

N° : Número de experimentos.

k : Número de variables.

P : Número de puntos centrales.

Siendo así:

$$2^3 + 2 = 10$$

Utilizando este diseño factorial con dos puntos centrales, se tuvo un total de 10 experiencias, por duplicado.

A continuación, en la tabla 3 se muestra el plan experimental para las variables consideradas a escala codificada.

Tabla 3*Matriz de diseño a escala codificada.*

N°	Escala Codificada			% Remoción de la turbiedad	% Remoción de la DQO
	X1	X2	X3		
1	+ 1	+ 1	+ 1		
2	+ 1	+ 1	- 1		
3	+ 1	- 1	+ 1		
4	+ 1	- 1	- 1		
5	- 1	+ 1	+ 1		
6	- 1	+ 1	- 1		
7	- 1	- 1	+ 1		
8	- 1	- 1	- 1		
9	0	0	0		
10	0	0	0		

Donde:

X1 : Tipo de electrodo Ánodo/cátodo (Al:Fe/Fe:Al)

X2 : Distancia entre electrodos (cm)

X3 : Densidad de corriente $\left(\frac{mA}{cm^2}\right)$

Haciendo uso de la tabla 3 se elaboró la siguiente matriz a escala codificada y natural (tabla 4).

Tabla 4*Matriz de diseño a escala codificada y natural.*

N°	Escala Codificada			Escala Natural			% Remoción de la turbiedad	% Remoción de la DQO
	X1	X2	X3	Ánodo	Distancia (cm)	Densidad de corriente (mA/cm ²)		
1	+ 1	+ 1	+ 1	Al	1.5	3		
2	+ 1	+ 1	- 1	Al	1.5	2		
3	+ 1	- 1	+ 1	Al	0.5	3		
4	+ 1	- 1	- 1	Al	0.5	2		
5	- 1	+ 1	+ 1	Fe	1.5	3		
6	- 1	+ 1	- 1	Fe	1.5	2		
7	- 1	- 1	+ 1	Fe	0.5	3		
8	- 1	- 1	- 1	Fe	0.5	2		
9	0	0	0	Al/Fe	1	2.5		
10	0	0	0	Al/Fe	1	2.5		

Se modificó la conductividad eléctrica del lixiviado ya que era demasiado alta, lo que podría conducir a una pasivación de los electrodos y por ende la disminución de la eficiencia del proceso. Esta modificación de la conductividad se hizo mediante la dilución del lixiviado con agua destilada a 9000 uS/cm; valor mínimo (observado mediante experimentación) para el cual, las condiciones operativas se mantuvieron estables. El uso de altas densidades de corriente con alta conductividad potencia la pasivación de los electrodos y también es menos

atractivo desde la perspectiva del consumo de energía. Por lo tanto, es necesario lograr un equilibrio entre el consumo de energía y la utilización eficiente del coagulante introducido (Fernandes et al., 2015). Proporcionar densidades de corriente más altas también puede dar como resultado un consumo innecesario del ánodo de sacrificio (Chen et al., 2000). También Orkun y Kuleyin (2012) estudió cuatro valores diferentes de conductividad que oscilaban entre 16400 a 40000 uS/cm utilizando NaCl como electrolito de soporte y encontró que la eficiencia de eliminación de DQO y el voltaje de la celda disminuyeron constantemente al aumentar la conductividad.

Los ensayos realizados y su respectiva repetición fueron evaluados en función a la turbidez final alcanzada del lixiviado cuando se hace uso de aluminio o hierro como ánodo de sacrificio y así, se determinó el mejor entre ambos. El proceso de electrocoagulación tuvo un periodo de duración de 120 minutos por prueba, durante dicho proceso se realizó la toma de muestras en intervalos de 15 minutos para su posterior análisis de turbiedad.

Para el análisis de los resultados se realizaron en tres partes:

Primero, se evaluó el efecto de la densidad de corriente y la distancia de separación de electrodos y punto central, cuando se emplea el Al como ánodo de sacrificio. Los resultados obtenidos se analizaron mediante gráficas de turbiedad final vs tiempo para determinar el experimento que proporcione una mejor remoción de turbiedad, así mismo estos resultados fueron comparados con la bibliografía.

Segundo, se trabajó la misma metodología para la evaluación del Fe como ánodo.

Tercero, se seleccionó el tratamiento con las condiciones operacionales (distancia de separación entre electrodos, densidad de corriente y tipo de electrodo) que logró la menor

turbidez final; los cuales constituyen los parámetros operacionales adecuados. Con estas condiciones operacionales definidas se llevó a cabo el proceso de electrocoagulación y su respectiva replica para el análisis de la DQO como también de la turbiedad. Estos resultados fueron ajustados para determinar su orden de reacción y fueron comparados con la bibliografía.

Así mismo se realizó la siguiente tabla de eficiencia de remoción alcanzada al final de tratamiento para las diferentes condiciones de operación, tanto para el Al como para el Fe.

Tabla 5

Tabla de resumen con porcentaje de remoción de turbiedad.

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Distancia entre electrodos (cm)	Turbiedad después de tratamiento (NTU)		Turbiedad promedio después de tratamiento (NTU)	% de Remoción de Turbiedad
		Prueba	Réplica		
2	0.5				
2	1.5				
2.5	1				
3	0.5				
3	1.5				

3.7.3. Definición de los parámetros del proceso

En base a los resultados de las pruebas experimentales desarrolladas de la tabla 4, se seleccionó el tratamiento con las condiciones operacionales que lograron la menor turbidez final; los cuales constituyen los parámetros operacionales adecuados. Una vez definida la mejor condición operacional, se llevó a cabo dicha prueba, así como su respectiva réplica y se realizó la medición de la DQO, como también la turbiedad.

- **Cantidad de aluminio y hierro suministrado en el ánodo, en función de la corriente eléctrica**

Se calculó la masa del electrodo de Al y Fe respectivamente como ánodos consumidos después de tratamiento. Se hizo uso de la segunda ley de Faraday cuando se aplica el nivel máximo 3 mA/cm^2 , mínimo 2 mA/cm^2 y el punto central $2,5 \text{ mA/cm}^2$ de la densidad de corriente. Faraday observó que la masa de producto formado o de reactivo consumido en un electrodo, era proporcional a la cantidad de electricidad transferida al electrodo y a la masa molar de la sustancia en cuestión. La cantidad de carga que pasa a través de un circuito eléctrico, como el de una celda electrolítica, se mide en Coulomb. La carga de 1 mol de electrones es de 96485 C y equivale a 1 F (Vera, 2007).

3.8. Modelo Cinético de DQO y velocidad de remoción de la turbiedad

Teniendo los resultados de las pruebas experimentales con los parámetros que alcanza la menor turbiedad final, se determinó el modelo cinético para la degradación de la DQO y velocidad de remoción de la turbiedad final.

Se elaboró la gráfica tiempo vs. concentración haciendo uso del software Microsoft Excel para la degradación de la DQO como también, para la turbiedad y se determinó el orden de reacción mediante el método integral, ajustando la curva que represente el mayor coeficiente de determinación (R^2).

En la tabla 6 se muestra el tiempo de tratamiento, la turbiedad y la DQO.

Tabla 6

Cinética de reacción para la remoción de la turbiedad y la DQO.

Tiempo (s)	Turbiedad (NTU)	DQO (mg/L)
0		
15		
30		
45		
60		
75		
90		
105		
120		

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización del lixiviado crudo

Los resultados de la caracterización del lixiviado crudo antiguo del relleno sanitario de Anta se muestran en la tabla 7 a continuación.

Tabla 7

Caracterización físico-química del lixiviado crudo.

Parámetros Físico Químicos	Valor
pH	8.5
Temperatura (°C)	22.4
Conductividad Eléctrica (uS/cm)	18200
Turbiedad (NTU)	118
DQO (mg/l)	1790

El lixiviado analizado tiene un pH de 8.5. Además (Suero Sánchez, 2022) determina la relación de biodegradabilidad DBO5/DQO igual a 0.0847, los cuáles corresponden a un lixiviado viejo, con ausencia de ácidos carboxílicos y baja biodegradabilidad, además la presencia de compuestos difícilmente oxidables y elevado peso molecular superior a 5000 g/mol (Ninan Valer & Zambrano Jarandilla, 2019) y (Ávila Armas & Silva Vásquez, 2010).

La temperatura de 22.4 °C corresponde a la temperatura ambiente reportada por (Senamhi, 2024), en la fecha del muestreo.

Ségún Chávez Montes (2011), la conductividad eléctrica esta relacionada con la presencia de sales en solución, cuya disociación genera iones positivos y negativos capaces de trasportar energía, siendo este un parámetro necesario para un buen proceso de

electrocoagulación. En la tabla 9 se observa una conductividad eléctrica de 18200 uS/cm para un lixiviado viejo. Ninan Valer & Zambrano Jarandilla (2019) obtuvo una conductividad eléctrica similar de 27220 uS/cm a 30220 uS/cm.

Según Romero Rojas (2010), la turbiedad constituye el material suspendido o coloide los cuales reducen la transparencia del agua. En la tabla 7 se obtuvo un valor de 118 NTU lo cual es coherente con las condiciones climatológicas, ya que es los meses de abril y mayo no hubo lluvias, además Huda et al. (2017), obtuvieron 231 NTU para lixiviado viejo, Kobya et al. (2003), obtuvieron 80 NTU para lixiviado viejo, contrastándose valores similares a los obtenidos en esta investigación.

De acuerdo con el Decreto Supremo vigente N° -2009-MINAM límites máximos permisibles (LMP) para la descarga de efluentes de infraestructuras de residuos sólidos, el resultado de la DQO de 1790 mg/l, en la caracterización fisicoquímica, supera 14.91 veces al LMP. El valor de DQO de 1790 mg/l para un lixiviado viejo, es similar a lo reportado por Ninan Valer & Zambrano Jarandilla (2019), quienes obtienen un valor de DQO de 1850 a 3108 mg/L para lixiviados viejos, las cuáles guardan relación.

Por tal razón, los lixiviados a tratar no cumplen con los límites máximos permisibles para el parámetro de la DQO establecido por la normativa vigente. Por tanto amerita su tratamiento para el cumplimiento de dicha normativa.

Suero Sánchez (2022), en su investigación determina el índice de biodegradabilidad DBO_5/DQO para los lixiviados del relleno sanitario de Anta, siendo 0,0847. Por lo tanto, este lixiviado se considera como lixiviado antiguo, y es adecuado su tratamiento por el método de electrocoagulación.

Las tasas de biodegradación son críticas para determinar el sistema de tratamiento a seguir al manipular estos lixiviados. Por lo tanto, siempre es aconsejable considerar el sistema biológico cuando se trata de lixiviados jóvenes como primer paso del tratamiento. Por otro lado, para lixiviados viejos, debido a su baja biodegradabilidad, el proceso fisicoquímico es la mejor opción Cristancho Montenegro et al. (2020).

4.2. Proceso de electrocoagulación

Los resultados del proceso de electrocoagulación de acuerdo al plan experimental de la tabla 4 se muestran en tres ítems:

Primero, se analiza el efecto de la densidad de corriente y la distancia de separación de electrodos y el punto central cuando se emplea el Al como ánodo de sacrificio.

Segundo, se analiza el efecto de la densidad de corriente y la distancia de separación de electrodos y el punto central cuando se emplea el Fe como ánodo de sacrificio

Tercero, se analiza la turbiedad y la DQO de los resultados obtenidos de la experimentación con los parámetros de operación que alcanzan menor turbidez final. Así mismo se realiza el ajuste de los resultados de DQO y turbiedad para determinar su orden de reacción.

Cabe mencionar que, en ensayos previos al plan del proceso de experimentación se evaluó la influencia de la temperatura sobre la turbiedad final, pretendiendo mantener una temperatura constante de 25°C, a través de un baño isotérmico, sin embargo; esto ocasionó inestabilidad en el suministro de densidad de corriente; además de resultar una menor reducción de turbidez. Por lo tanto, se concluyó que el comportamiento espontáneo de la temperatura es favorable al proceso de electrocoagulación, resultado que concuerda con el

estudio realizado por Yilmaz et al.(2008) y también por Sedeqi et al. (2021), quienes reportan que la temperatura inicial es otro parámetro independiente que influye en la electrocoagulación. Independientemente de otros parámetros, si la temperatura inicial se elevaba lo suficiente, los niveles de eliminación de DQO también aumenta, esto se debería a que el aumento de las temperaturas mejora la movilidad molecular, lo que resulta un mayor número de colisiones de partículas y por ende una mejor formación de flóculos y una mayor eliminación de la contaminación.

Aunque se comprueba que el incremento de la temperatura influye de manera favorable en la remoción de la turbiedad, Islam (2017) recalca que debería haber un límite superior teórico para el aumento de temperatura, por encima del cual sería perjudicial porque el exceso de energía generaría que los flóculos se dispersaran.

Por otra parte, Katal y Pahlavanzadeh (2011), sostienen que la temperatura tiene un efecto negativo sobre la eliminación de la DQO. Resultados que no concuerdan a los determinados con la presente investigación. Esta afirmación podría atribuirse a que en su estudio se emplea 70 mA/cm^2 de densidad de corriente (más de veinte veces el valor empleado en la presente investigación) por un periodo de 30 minutos, dónde se registra una temperatura final de $60 \text{ }^\circ\text{C}$; condiciones de operación que son diferentes a las establecidas en la presente investigación especialmente en el suministro de densidad de corriente. Estos resultados a su vez daría validez a lo anteriormente mencionado por Islam (2017), quién menciona que se debería establecer un límite superior para la temperatura. Puesto que la temperatura en el reactor tiende a aumentar durante el procesamiento producto de las reacciones electrolíticas de oxido reducción (Hernandez Flores & Mejia Rosa, 2019) del tiempo de contacto, el tipo de electrodo y la densidad de corriente aplicada (Ilhan et al., 2008).

Otra de las observaciones que se realizaron en ensayos previos es que existe mayor disociación de iones de Al o Fe en una disposición en serie en comparación a un arreglo en paralelo. Esto se puede explicar a que en un circuito en serie el paso de la corriente es la misma para todos los electrodos (Fowler, 1994) y la primera ley de Faraday establece que la cantidad de una sustancia liberada de un electrodo es proporcional intensidad de corriente suministrada. Al respecto, Ilhan et al. (2008), señalan que el electrodo de Fe suministra más iones de Fe a la solución y en consecuencia producen mayor cantidad de lodo en contraste al electrodo de Al (Ilhan et al., 2008). Afirmación que corrobora los resultados obtenidos en esta investigación. Además, se ha demostrado que una disposición en serie resulta ser más económico (Moneer y El Nemr, 2012).

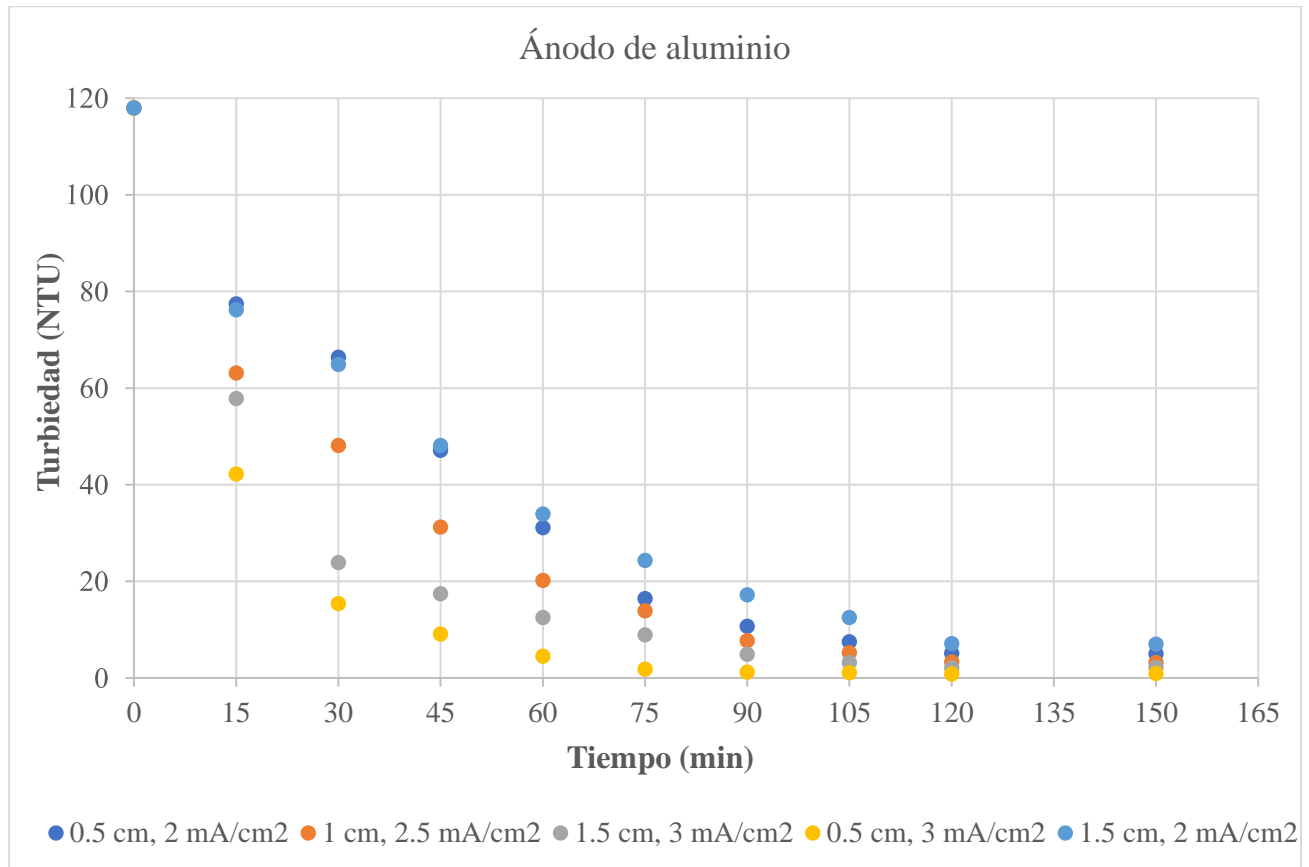
4.2.1. Efecto de la densidad de corriente y la distancia de separación de los electrodos en la turbidez final usando ánodo de aluminio con punto central.

Este análisis se centra en observar la influencia de variables independientes de densidad de corriente y distancia entre electrodos sobre la capacidad de la electrocoagulación para eliminar la turbidez de acuerdo a la tabla 4.

En la figura 6 se observa la turbiedad final en función del tiempo, para distancias de separación entre electrodos de 0.5 cm, 1 cm y 1.5 cm, y densidades de corriente de 2 mA/cm², 2.5 mA/cm² y 3 mA/cm².

Figura 6

Efecto de la densidad de corriente y la distancia entre separación en la turbiedad final, con ánodo de aluminio y punto central.



Del gráfico anterior es apreciable que para una distancia de separación entre de 0.5 cm con densidad de corriente de 2 mA/cm², la turbiedad final desciende hasta 4.9 NTU; así mismo, para la misma distancia de separación y una densidad de corriente de 3 mA/cm², la turbiedad decrece hasta 0.6 NTU. También se observa que para una distancia de separación de 1.5 cm, con densidad de corriente de 2 mA/cm², la turbiedad disminuye hasta 6.8 NTU, y para esa misma distancia de separación de 1.5 cm y 3 mA/cm² de densidad de corriente, la turbiedad reduce hasta 2.1 NTU. Para el punto central a una distancia entre electrodos de 1 cm, a una densidad de corriente de 2.5 mA/cm², la turbiedad disminuye hasta 3.1 NTU.

De lo examinado con anterioridad, se puede afirmar que el suministro de densidad de corriente tiene un efecto relevante sobre la turbidez final. Se evidencia que dentro de los primeros 45 minutos de operación a una densidad de corriente de 3 mA/cm^2 , se obtiene una menor turbiedad final al cabo del tratamiento en comparación con una densidad de corriente de 2 mA/cm^2 . Este resultado fue el esperado puesto que, según la conocida ley de Faraday, la formación de coagulantes (Al(OH)_3) es proporcional a la intensidad y tiempo aplicados. Así mismo, evaluando el efecto de la distancia de separación, de la figura 5 es estimable que a menor distancia de separación entre electrodos la turbidez final es menor. Al respecto Ghasem et al. (2016) mencionan que, una eficiente remoción de DQO y turbidez se alcanza en un intervalo de separación de electrodos de 0.5 a 2 cm, y luego disminuye al aumentar de 2 a 3 cm.

Para una densidad de corriente de 3 mA/cm^2 y una separación de 0.5 cm entre los electrodos representa la menor turbiedad final, siendo esta del 99.5%. Así mismo, se observa la aproximación de la turbiedad a cero desde el minuto 90 en comparación a las demás condiciones de operación. Esta variable determina la cantidad de coagulante aplicado al volumen de efluente tratado, cuanto mayor sea el flujo de salida, mayor será la proporción de coagulante generado y al mismo tiempo junto a la conductividad, determina también el grado de formación de lodos.

Cuando estos flóculos alcanzan un tamaño suficiente, pueden capturar físicamente más partículas que causan turbidez (España Patente nº ES2382274B1, 2013). La densidad de corriente no solo determina la tasa de dosificación del coagulante, sino también la tasa de producción de burbujas de gas de H_2 (Ricordel et al., 2010) lo que también contribuye a la eficiencia del tratamiento de la electrocoagulación. Además, a medida que aumenta la densidad de corriente, aumenta la velocidad de formación de burbujas de gas de H_2 y disminuye el tamaño de las

mismas (Merzouk y otros, 2009). Ambas tendencias favorecen altas eficiencias de eliminación de contaminantes mediante la flotación de hidrógeno (Pajootan et al., 2012).

En suma, tanto la distancia de separación como la densidad de corriente son factores importantes para lograr una reducción efectiva en la turbiedad.

En la tabla 8 se observa la eficiencia de remoción de la turbiedad para cada condición de operación, utilizando electrodo de aluminio.

Tabla 8

Eficiencia de remoción para cada condición de operación, utilizando electrodo de aluminio.

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Distancia entre electrodos (cm)	Turbiedad después de tratamiento (NTU)		Turbiedad promedio después de tratamiento (NTU)	% de Remoción de Turbiedad
		Prueba	Réplica		
2	0.5	4.8	5.1	4.9	95.6
2	1.5	6.9	7.2	7.1	94
2.5	1	3.4	3.1	3.1	97.3
3	0.5	0.6	0.7	0.6	99.5
3	1.5	1.9	2	2.1	98.2

De la tabla 8 es apreciable que se obtienen remociones superiores al 90%. Asimismo, la mejor remoción de turbiedad obtenida, al tratar el lixiviado con aluminio como ánodo, corresponde al emplear 3 mA/cm² de densidad de corriente con una separación de electrodos de 0.5 cm, logrando un porcentaje de remoción del 99.5%. Cuanto menor sea la distancia entre los electrodos, mejor será el tamaño de los poros de los electrodos, lo que a su vez mejora el proceso de disolución de los electrodos (Huda et al., 2017). Así mismo, el aumento de la distancia entre

electrodos implica un aumento en el consumo de energía para la remoción de DQO (Ricordel y Djelal, 2014).

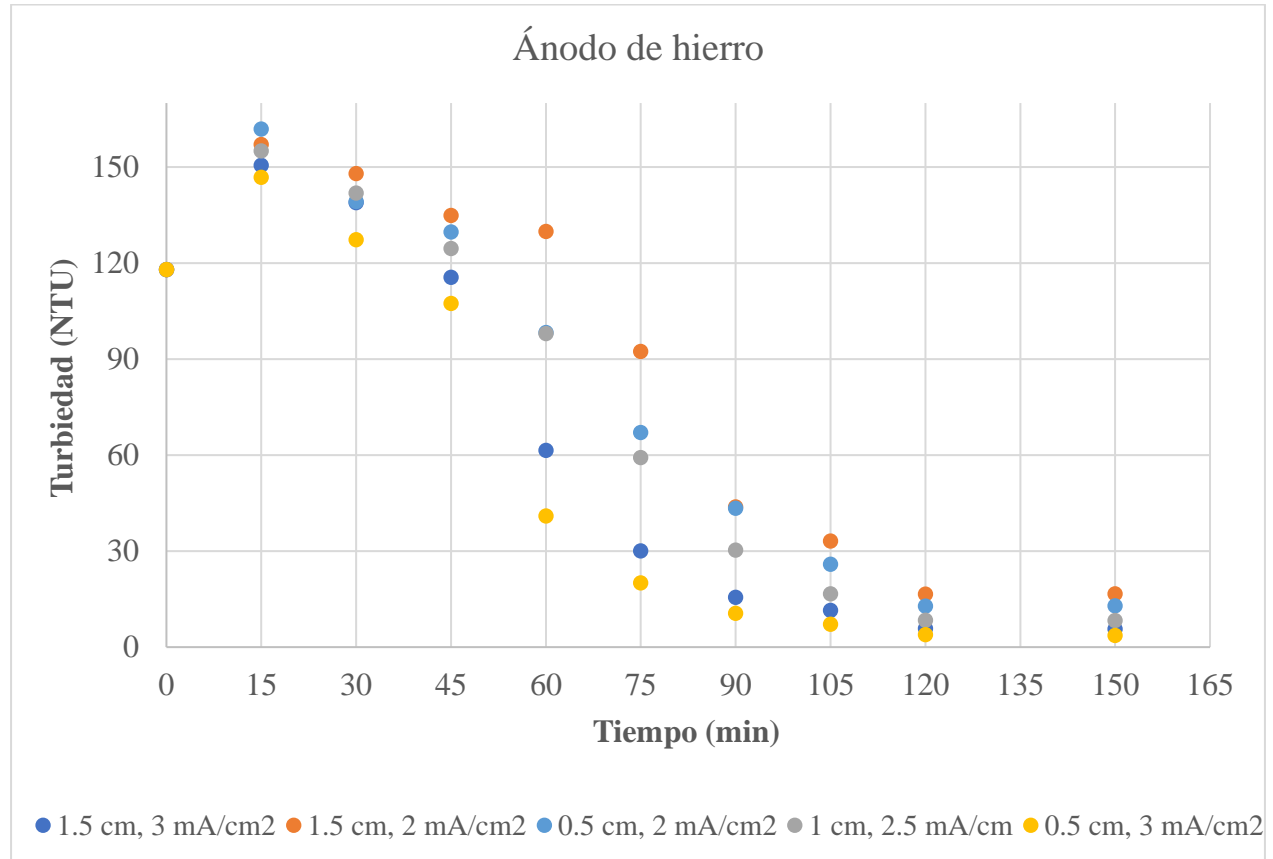
4.2.2. Efecto de la densidad de corriente y la distancia de separación de los electrodos sobre la turbidez final usando hierro de ánodo con punto central

De igual manera, para el hierro como ánodo de sacrificio, se observó la influencia de variables independientes (densidad de corriente y distancia entre electrodos) sobre la capacidad de la electrocoagulación para la eliminación de la turbidez final.

En la figura 7 se estima la turbiedad final en función del tiempo, para distancias de separación entre electrodos de 0.5 cm, 1 cm y 1.5 cm, y densidades de corriente de 2 mA/cm², 2.5 mA/cm² y 3 mA/cm².

Figura 7

Efecto de la densidad de corriente y la distancia de separación de electrodos en la turbiedad final, con ánodo de hierro con punto central.



Se distingue que para una distancia de separación entre de 0.5 cm con densidad de corriente de 2 mA/cm², la turbiedad final desciende hasta 12.8 NTU; así mismo, para la misma distancia de separación y una densidad de corriente de 3 mA/cm², la turbiedad final decrece hasta 3.9 NTU. También se observa que para una distancia de separación de 1.5 cm, con densidad de corriente de 2 mA/cm², la turbiedad disminuye hasta 16.6 NTU, y para esa misma distancia de separación de 1.5 cm y 3 mA/cm² de densidad de corriente, la turbiedad final reduce hasta 5.8 NTU. Así mismo para el punto central a una distancia entre electrodos de 1 cm y 2.5 mA/cm² se observa una turbiedad final de 9 NTU.

De lo descrito anteriormente, se confirma que el suministro de densidad de corriente tiene un efecto relevante sobre la turbidez final. Se manifiesta que la densidad de corriente aplicada determina la velocidad de formación del coagulante $\text{Fe}(\text{OH})_3$ generado, esta relación es directamente proporcional; una mayor concentración de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ incrementa la disminución de turbidez (Pérez Sicairos et al., 2011). El aumento de la densidad de corriente implica también el aumento del porcentaje de eliminación de DQO (Inan et al., 2004).

Realizando una comparación entre las distancias de separación sobre el alcance de una menor turbiedad final, estas se alcanzan a distancias cortas de separación entre electrodos y esto conjuntamente ligado al suministro de densidad de corriente.

La figura 7 muestra la turbiedad final en el tiempo, de donde se puede apreciar que los primeros 15 minutos hay un ligero incremento de turbiedad de 118 NTU a 161.9 NTU como punto máximo, resultado que es coherente a lo reportado por Chezeau et al. (2020), quienes señalan que la turbidez muestra un comportamiento atípico cuando comienza la electrólisis; además las muestras presentaron una coloración oscura verdosa y luego cambió a un color marrón amarillento. El color verde es causado por la presencia del ión ferroso y el marrón es por la presencia del ión férrico (Nasrullah y otros, 2014), (Huda y otros, 2017). Según Lakshmanan y otros, (2009) esta forma de hierro se presenta en las etapas iniciales del tratamiento y al ser más soluble que el ion férrico (ion queda coloración amarillenta al agua residual y responsable de la generación de los hidróxidos de hierro III), causa una ralentización en la coagulación y por lo tanto se alcanzó un incremento en la eliminación de la turbidez. Este inconveniente podría ser mejorado al incrementar la cantidad de oxígeno disuelto (Kumar y otros, 2018) mediante procesos de, por ejemplo, aeración del agua residual (Akansha y otros, 2020).

Se aprecia la mejor eliminación de turbiedad de 118 NTU hasta 3.9 NTU, que en términos de porcentajes de remoción corresponden a 96.7 %, para una densidad de corriente de 3 mA/cm² y una separación de 0.5 cm, afirmándose que las mejores remociones se dan a distancias cortas de separación entre electrodos y esto conjuntamente ligado al suministro de densidad de corriente.

En la tabla 9 se observa el porcentaje de remoción de turbiedad alcanzado por cada condición de operación correspondiente al proceso de electrocoagulación cuando se emplea Fe como ánodo de sacrificio.

Tabla 9

Eficiencia de remoción para cada condición de operación, utilizando electrodo de hierro.

Densidad de corriente (mA/cm ²)	Distancia entre electrodos (cm)	Turbiedad después de tratamiento (NTU)		Turbiedad promedio después de tratamiento (NTU)	% de Remoción de Turbiedad
		Prueba	Réplica		
2	0.5	12.8	13.4	13.1	89.2
2	1.5	16.7	17.5	17.1	85.9
2.5	1	9.3	8.7	9	92.8
3	0.5	3.9	4.1	4	96.6
3	1.5	5.7	6.1	5.9	95

De la tabla 9 es apreciable que se obtienen remociones superiores al 85%. Asimismo, la mejor remoción de turbiedad obtenida, al tratar el lixiviado con hierro como ánodo, corresponde al emplear 3mA/cm² de densidad de corriente con una separación de electrodos de 0.5 cm, logrando un porcentaje de remoción del 96.6%. Cuanto menor sea la distancia entre los

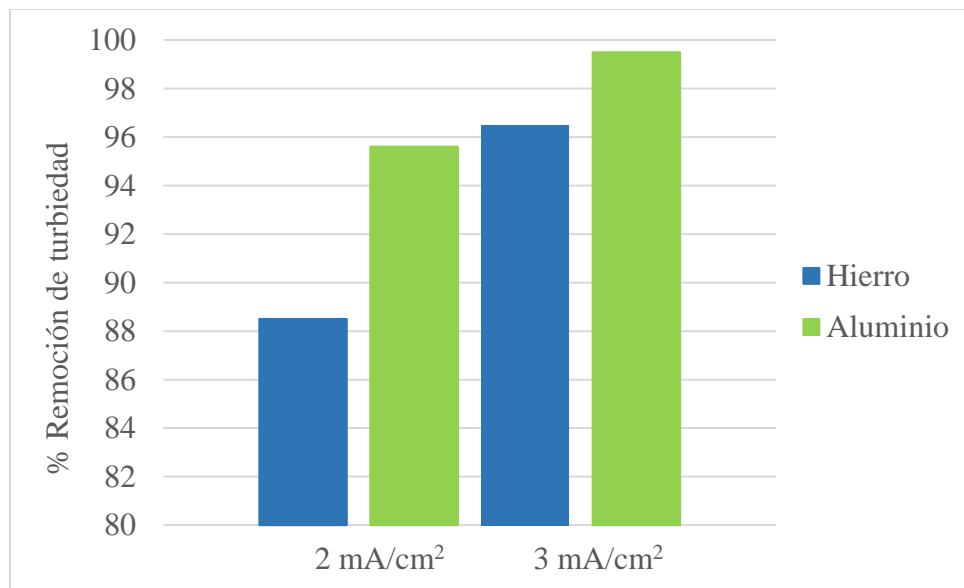
electrodos, mejor será el tamaño de los poros de los electrodos, lo que a su vez mejora el proceso de disolución de los electrodos (Huda et al., 2017).

Otra de las variables del estudio realizado es la influencia de la naturaleza del electrodo para la mejora de la eficiencia de electrocoagulación. De acuerdo a las experimentaciones realizadas con anterioridad se determinó el mejor electrodo de operación en el sistema de electrocoagulación, evidenciado en el mejor porcentaje de remoción de turbiedad como se muestra la siguiente figura de resultados.

En la figura 8 se observa la comparación de eficiencia electrodos según el porcentaje de remoción de turbiedad.

Figura 8:

Comparación de la eficiencia de electrodos según el porcentaje de la remoción de turbiedad.



De la figura 8 se puede observar la comparación de los porcentajes de remoción de turbiedad, cuando se emplea el hierro o aluminio como ánodo de sacrificio, con una distancia de separación entre electrodos de 0.5 cm ya que, esta distancia de separación se determinó la más

eficaz, resultado que es coherente a los obtenidos por Moreno-Casillas et al. (2007), quién sugiere distancias de separación de electrodos cercanas (0.5-1) cm para optimizar la remoción de DQO.

Asimismo, de la figura se observa que para las densidades de corriente aplicadas (2 mA/cm² y 3 mA/cm²) el aluminio consigue una mejor remoción de la turbiedad para ambos casos. Utilizando el aluminio como ánodo de sacrificio, se obtuvo 99.5% en la remoción de la turbiedad a comparación con el hierro como ánodo, razón por la cual las pruebas finales se realizaron utilizando aluminio como ánodo. Resultado al que también arribaron Inan et al. (2004) quienes realizaron una comparación de ánodos de sacrificio (Al y Fe) sobre la eficiencia de remoción de DQO alcanzando un 52% de eliminación de DQO para el ánodo de aluminio contra 42% de eliminación de DQO para el ánodo de hierro.

Otra razón por la que se hizo esta elección, es porque el aluminio genera menos lodo que el hierro. Particularmente el aluminio genera mayor remoción de contaminantes por flotación y una mínima generación de lodos sedimentables, en cambio el hierro, presenta mucho mayor porcentaje de lodos sedimentables en comparación al aluminio. Es más, después de sedimentación, las muestras presentan una especie de nebulosa no sedimentable para los primeros 45 minutos de tratamiento, cuando se hace uso de hierro como ánodo. Lo que sugirió tener mucho más cuidado al momento de realizar los análisis de turbiedad. Esta observación es coherente a lo reportado por Ilhan et al. (2008), quienes determinaron que la menor producción volumétrica de lodo se produjo en el proceso de electrocoagulación con electrodo de aluminio. Además, afirman que el aluminio es mejor que el hierro en los aspectos de eliminación de DQO y producción de lodos. Y también, se demuestra que para aplicaciones bajas de densidad de corriente (4.5 - 6.5mA/cm²) el consumo de material del electrodo de aluminio es menor al de hierro (Kobyta et al., 2003).

La presencia de iones de aluminio y complejos de aluminio desestabilizan las partículas coloidales rompiendo la emulsión. La coagulación aumenta el tamaño y cambia las propiedades superficiales de las partículas. Estos floculantes formados en la fase acuosa se pueden separar por diferencias de gravedad (Pajootan et al., 2012).

4.3. Parámetros del proceso de electrocoagulación

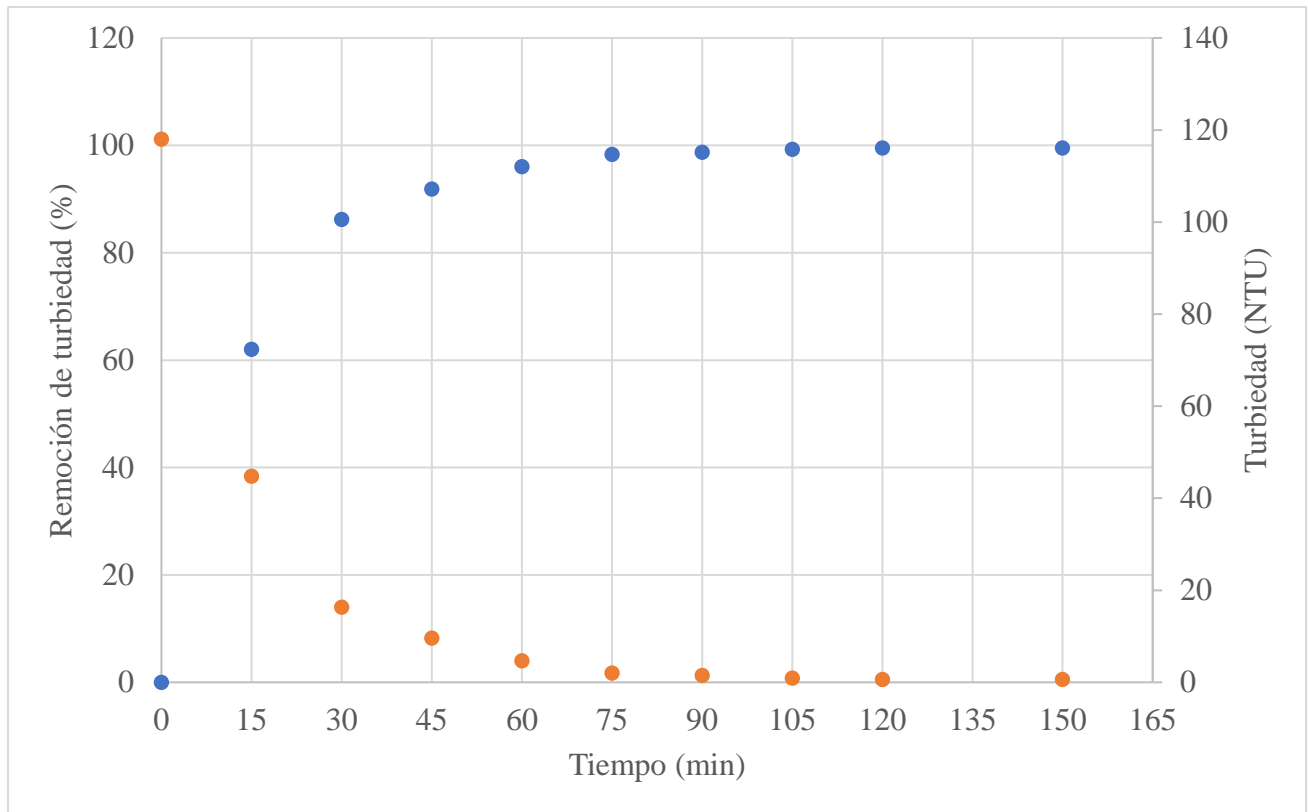
De acuerdo al análisis de los resultados obtenidos en el anterior ítem se ha determinado que los parámetros que logran mayor disminución de turbidez final son: el aluminio como ánodo, una distancia de separación entre electrodos de 0.5 cm y un suministro de 3 mA/cm² de intensidad de corriente. Los resultados del tratamiento de los lixiviados con estos parámetros de operación, se muestran en la figura 8 y 9 en términos porcentuales de remoción de turbiedad y DQO respectivamente.

Además, en el estudio elaborado por Dia y otros (2017) realizaron la evaluación del material del ánodo (aluminio y hierro) sobre la eficiencia en la remoción de DQO, obteniendo la mejor eficiencia de remoción para el aluminio. Este estudio reafirma así, la buena elección del aluminio, como ánodo de sacrificio, para las pruebas finales en comparación al hierro.

La figura 9 muestra el porcentaje de remoción de la turbiedad y la degradación de la turbiedad en función al tiempo

Figura 9

Porcentaje de remoción de la turbiedad con 3 mA/cm² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.



De la figura 9 se observa que en los primeros 30 minutos, se llega a una remoción por encima del 85%, lo cual indica que trabaja bastante bien a esas condiciones. La remoción de turbidez eliminada es de 99.5%. Esta remoción es coherente con el informe de Muñoz Espitia et al. (2022) quién alcanzó una remoción de 99.77 % de turbidez.

En la tabla 10 se puede apreciar el porcentaje de remoción de la DQO en el tiempo.

Tabla 10

Porcentaje de remoción de la DQO, utilizando como ánodo el aluminio.

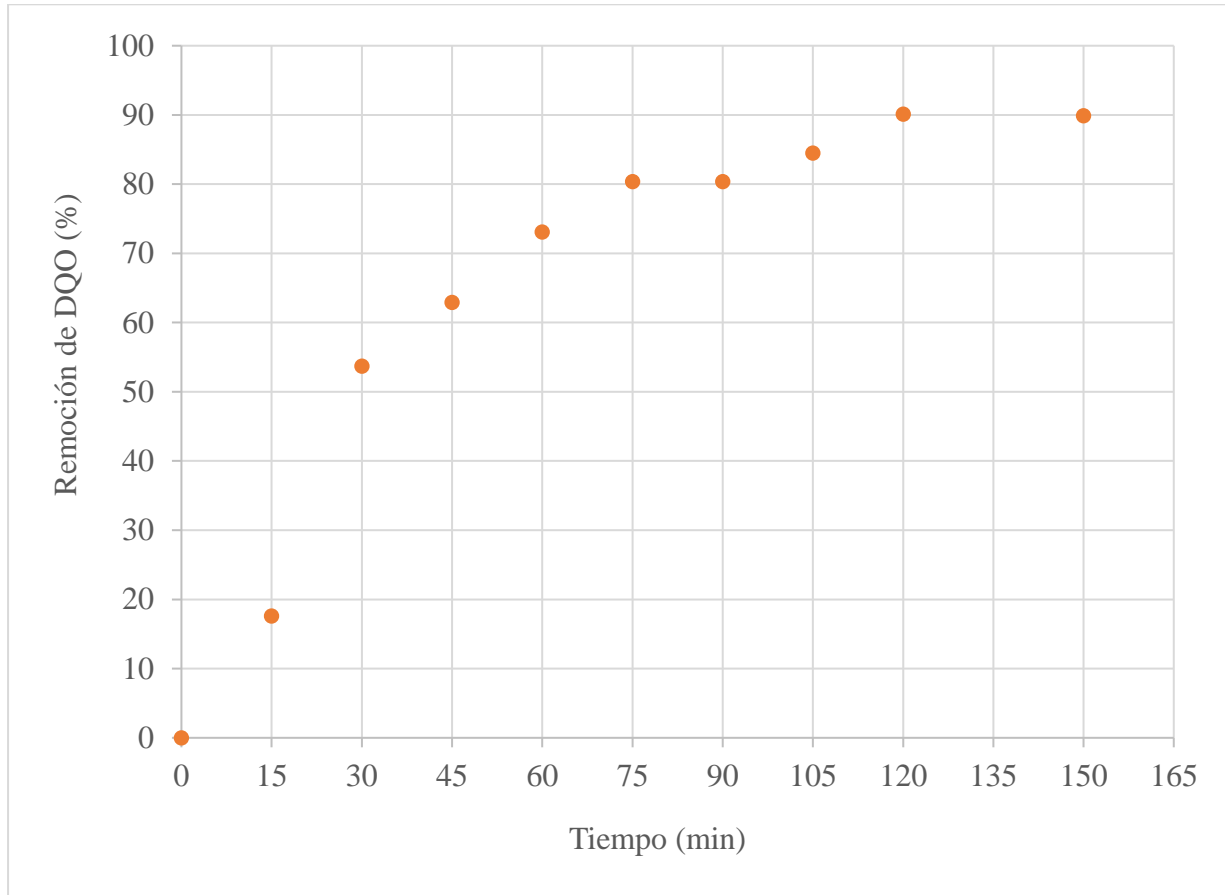
Tiempo (min)	DQO promedio (mg/L)	% de Remoción de DQO
0	1650	0
15	1390	17.52
30	764	53.62
45	612	62.92
60	444	73.0
75	324	80.33
90	324	80.31
105	256	84.53
120	163	90.12

En la tabla 10 se aprecia el porcentaje de remoción de la turbiedad en función al tiempo, llegando hasta un 90.12 % en 120 minutos.

En la figura 10 se observa el porcentaje de remoción de DQO en función al tiempo.

Figura 10

Porcentaje de remoción de la Demanda Química de Oxígeno, con 3 mA/cm² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.



De la figura 10 es apreciable que, en el tiempo de tratamiento de 120 minutos, el porcentaje de remoción de Demanda Química de Oxígeno eliminado (DQO) es de 90.12%, resultado coherente a lo obtenido por Dia, Drogui, Buelna, Dubé, & Ihsen, (2017) quienes en su estudio trataron lixiviados previamente procesados por biofiltración; lixiviados que tenían una concentración inicial de 1650 mg/l de DQO y lograron una remoción del 90 % de DQO. De igual modo Ilhan et al. (2008) señalan que los electrodos de aluminio mostraron una mayor eficiencia de tratamiento que los de hierro en cuanto a la eliminación de DQO.

En el análisis de la cantidad de materia orgánica removida en el tiempo, se inició con un valor de 1650 mg/l hasta llegar a 163 mg/l considerándose el valor más bajo, razón por la cual se detuvo el proceso de electrocoagulación.

- **Cantidad de aluminio y hierro suministrado, en función de la corriente eléctrica.**

A continuación, se observa el cálculo de la cantidad Al y Fe generado en el sistema de tratamiento a las diferentes condiciones de suministro de densidad de corriente mediante la segunda ley de Faraday desarrollada.

$$\Delta m_{teórico} = \frac{M \cdot I \cdot t_{EC}}{n \cdot F} \quad (28)$$

En la tabla 11 se muestra un resumen de los parámetros para electrodos de aluminio y hierro que se utilizará para el cálculo de la cantidad de Aluminio y Hierro generado en el sistema.

Tabla 11

Resumen de los parámetros para los cálculos de aluminio y hierro generados.

Electrodo de aluminio		Electrodo de hierro	
Peso molecular (g/mol)	26.9815	Peso molecular (g/mol)	55.847
	1.12 A		1.12 A
Intensidad de corriente (A)	1.4 A	Intensidad de corriente (A)	1.4 A
	1.68 A		1.68 A
tiempo (min)	7200	tiempo (min)	7200
Número de electrones (n)	3	Número de electrones (n)	2
Constante de Faraday	96487	Constante de Faraday	96487
(C/mol)		(C/mol)	

- **Para el aluminio:**

Reemplazando en la ecuación 28 para las intensidades de corriente I de 1.12 A, 1.4 A y 1.68 A respectivamente.

$$\Delta m_{teórico} = \frac{26.9815 \frac{g}{mol} * 1.12 A * 7200 s}{3 * 96487 C/mol} \quad (29)$$

$$\Delta m_{teórico} = \mathbf{0.7515 g de Al} \quad (30)$$

$$\Delta m_{teórico} = \frac{26.9815 \frac{g}{mol} * 1.4 A * 7200 s}{3 * 96487 C/mol} \quad (31)$$

$$\Delta m_{teórico} = \mathbf{0.9394 g de Al} \quad (32)$$

$$\Delta m_{teórico} = \frac{26.9815 \frac{g}{mol} * 1.68 A * 7200 s}{3 * 96487 C/mol} \quad (33)$$

$$\Delta m_{teórico} = \mathbf{1.1273 g de Al} \quad (34)$$

- **Para el hierro:**

De forma similar para el caso de hierro se reemplazó los datos en la ecuación 27 para las intensidades de corriente I de 1.12 A, 1.4 A y 1.68 A respectivamente.

$$\Delta m_{teórico} = \frac{55.8470 \frac{g}{mol} * 1.12 A * 7200 s}{2 * 96487 C/mol} \quad (35)$$

$$\Delta m_{teórico} = \mathbf{2.3334 g de Fe} \quad (36)$$

$$\Delta m_{teórico} = \frac{55.8470 \frac{g}{mol} * 1.4 A * 7200 s}{2 * 96487 C/mol} \quad (37)$$

$$\Delta m_{teórico} = 2.9167 \text{ g de Fe} \quad (38)$$

$$\Delta m_{teórico} = \frac{55.8470 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 1.68 \text{ A} * 7200 \text{ s}}{2 * 96487 \text{ C/mol}} \quad (39)$$

$$\Delta m_{teórico} = 3.50 \text{ g de Fe} \quad (40)$$

En las ecuaciones anteriores se muestran la cantidad de aluminio y hierro generados como coagulantes, a diferentes intensidades de corriente eléctrica. Así mismo, se observa una mayor generación de hierro en comparación con el aluminio en el proceso de electrocoagulación. Sin embargo, el Al presenta mejores porcentajes de remoción en comparación al Fe y se asegura una menor carga iónica, afectando menos a la conductividad eléctrica.

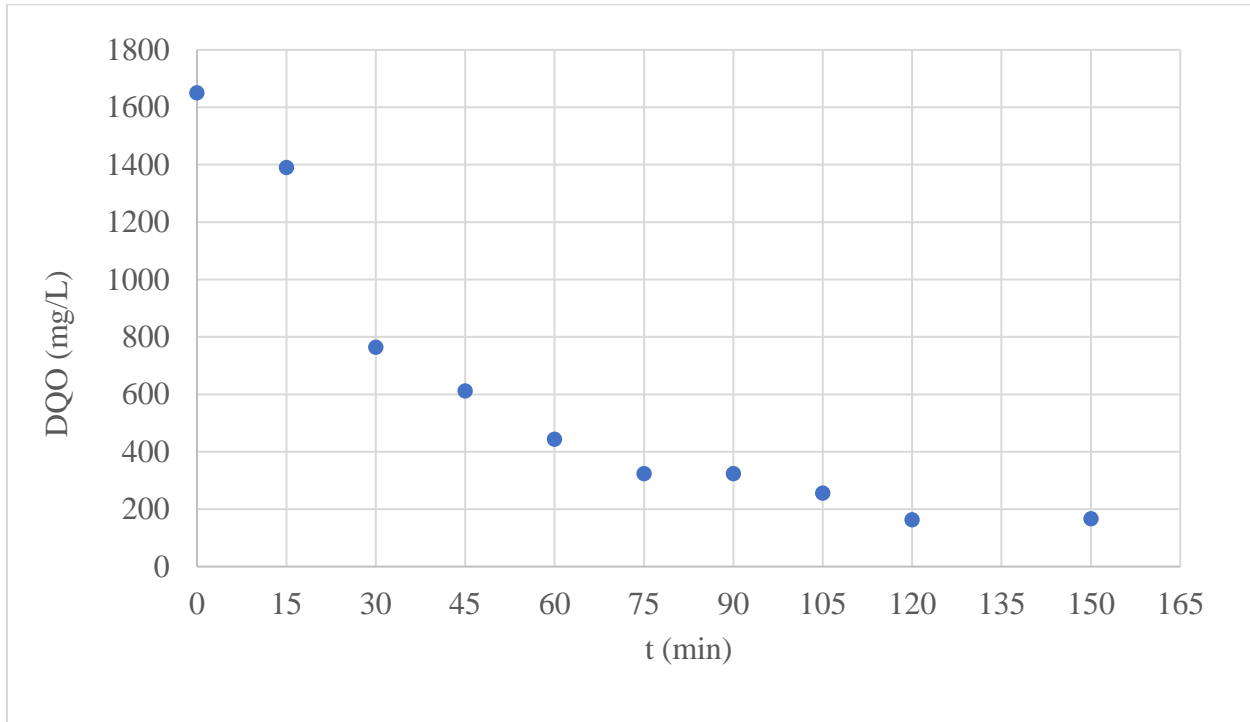
4.4. Cinética de degradación de la Demanda Química de Oxígeno

Según Gilpavas (2008), Chaves Tenorio (2021), L.Riadi1 y otros (2017), en sus investigaciones, trabajaron en la cinética de degradación de la Demanda Química de Oxígeno, mediante el método integral. En el método integral se supone el orden de reacción y se integra la ecuación diferencial empleada, si el orden que asumimos es correcto, la gráfica apropiada (determinada a partir de la integración) de los datos de concentración y tiempo, debería ser lineal (Fogler, 2008).

Los resultados de la reducción de la DQO en función del tiempo se muestran en la figura 11.

Figura 11

Reducción de la DQO (mg/L) en función del tiempo, con 3 mA/cm^2 y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.

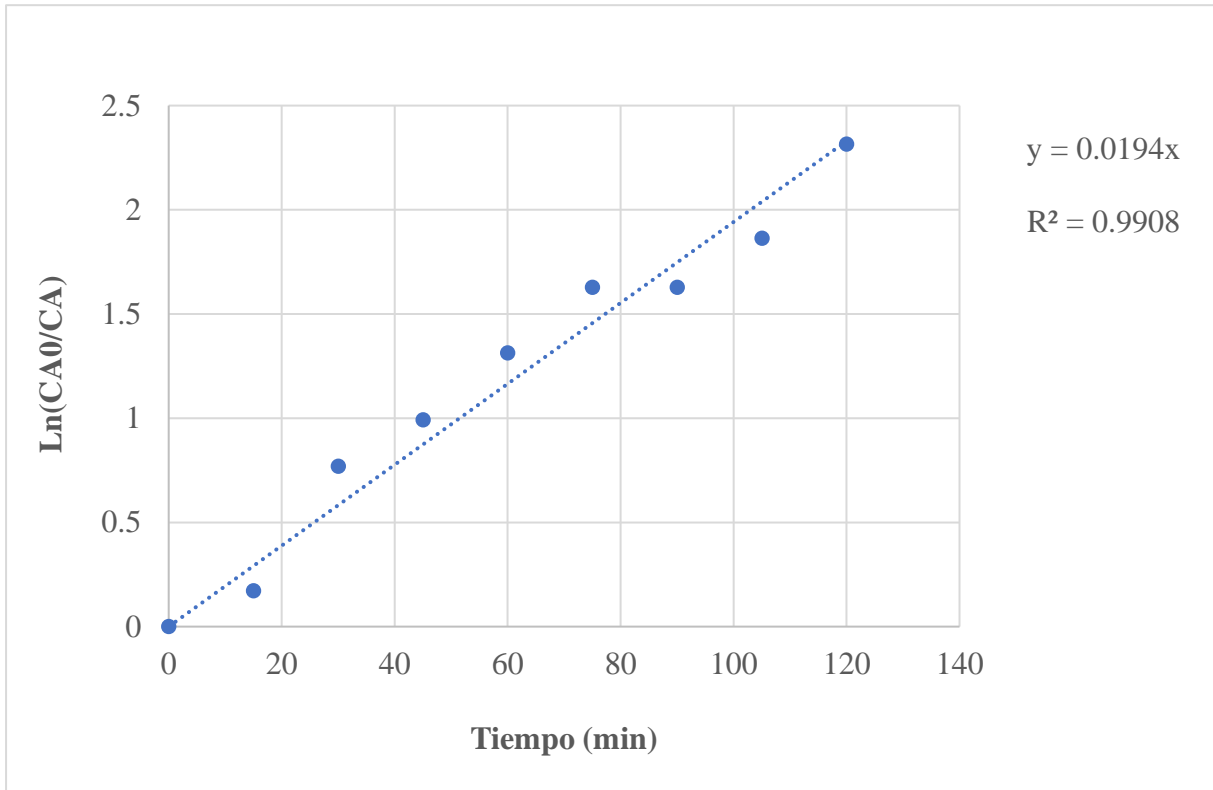


En la figura 11, se observa que en el minuto 120, el valor de la DQO es 163 mg/L.

Los datos se ajustaron a un modelo, por medio de la asignación de la función que mejor se ajuste a una línea recta, determinando el orden de reacción a partir de la mejor correlación obtenida para los datos evaluados. La cinética de DQO que mejor se ajustó para el tratamiento del lixiviado con electrodo de aluminio, se puede apreciar en la figura 12.

Figura 12

Cinética de reacción de orden 1 para la remoción de la DQO, con 3 mA/cm² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.



En la figura 12 se observa la gráfica con orden de reacción 1 y con un coeficiente de correlación línea de 0.9908, donde la pendiente es igual a la constante de velocidad de remoción de materia orgánica según las ecuaciones 16, 17, 18 y 19.

$$m = k \quad (41)$$

$$k = 0.0194 \text{ min}^{-1} \quad (42)$$

Entonces la ecuación de la velocidad de remoción de materia orgánica fue:

$$-r_A = kC_A \quad (43)$$

$$-r_A = [0.0194 \text{ min}^{-1}]C_A \quad (44)$$

Así mismo, es posible comparar los valores de orden de reacción con los obtenidos por Ninan Valer & Zambrano Jarandilla (2019), Gilpavas (2008) y Chaves Tenorio (2021) en la tabla 12.

Tabla 12:

Comparación del orden de reacción con diferentes autores.

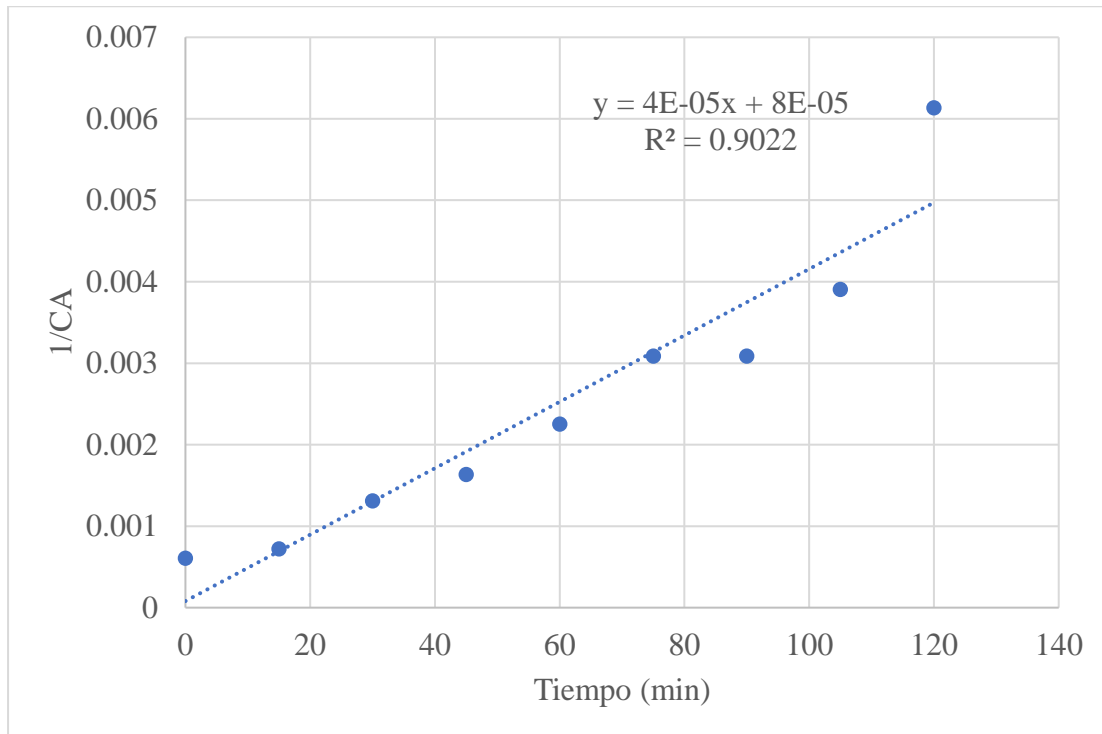
Autor	Contaminante	Método	K (min⁻¹)	Orden de reacción	Remoción
Autoría propia	Aguas residuales del relleno sanitario de Anta.	Integral	0.0194	1	90.12 % en 120 min.
(Chacón Bacilio & Huampotupa Champi, 2021)	Aguas residuales de la industria láctea.	Integral	0.0356	1	86.96 % en 50 min.
(Ninan Valer & Zambrano Jarandilla, 2019)	Aguas residuales de relleno sanitario	Integral	0.001854	1	99.5% en 120 min.
(Gilpavas, 2008)	Aguas residuales del proceso de curtición.	Integral	0.0149	1	50.67% en 60 min
(Chaves Tenorio, 2021)	Aguas residuales cosméticas.	Integral	0.0647	1	65.2% en 30 min

Como se puede observar en la tabla 12, el valor de la constante de velocidad obtenidos, corresponden al primer orden.

Se realizó el análisis de cinética de segundo orden, como muestra la figura 13.

Figura 13

Cinética de reacción de orden 2 para la remoción de la DQO, con 3 mA/cm² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.



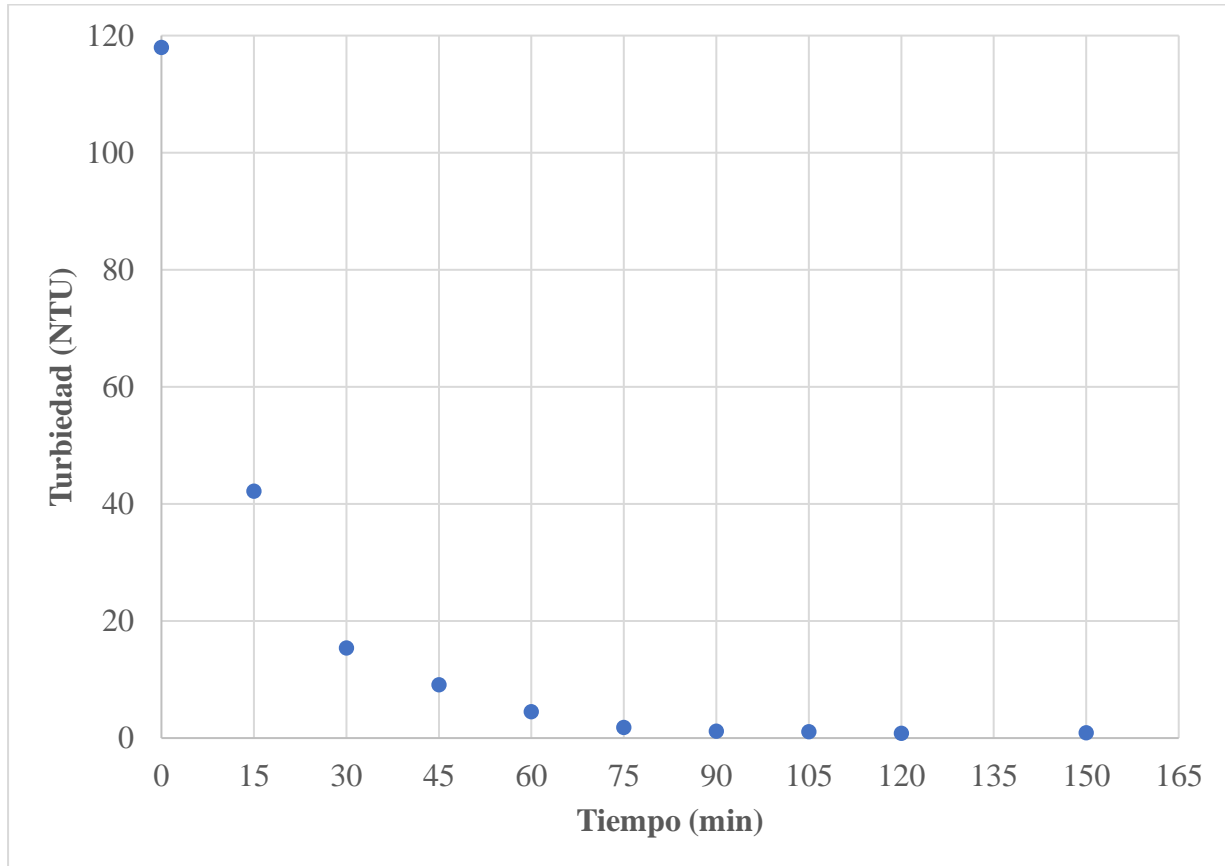
Se analizó la cinética de orden 2 mediante el uso de las ecuaciones 23, 24 y 25. Como se puede observar se obtuvo un coeficiente de correlación lineal igual a 0.9022, lo cual es inferior al coeficiente de correlación lineal de primer orden, reafirmando de este modo que el comportamiento de la cinética de degradación de la DQO corresponde a una reacción de primer orden.

4.5. Velocidad de remoción de la turbiedad

En la figura 14 se muestra la reducción de la turbiedad, utilizando electrodos de aluminio con una distancia entre electrodos de 0.5 cm y una densidad de corriente de 3 mA/cm², donde el valor de la turbiedad disminuye hasta 0.6 en 120 minutos.

Figura 14

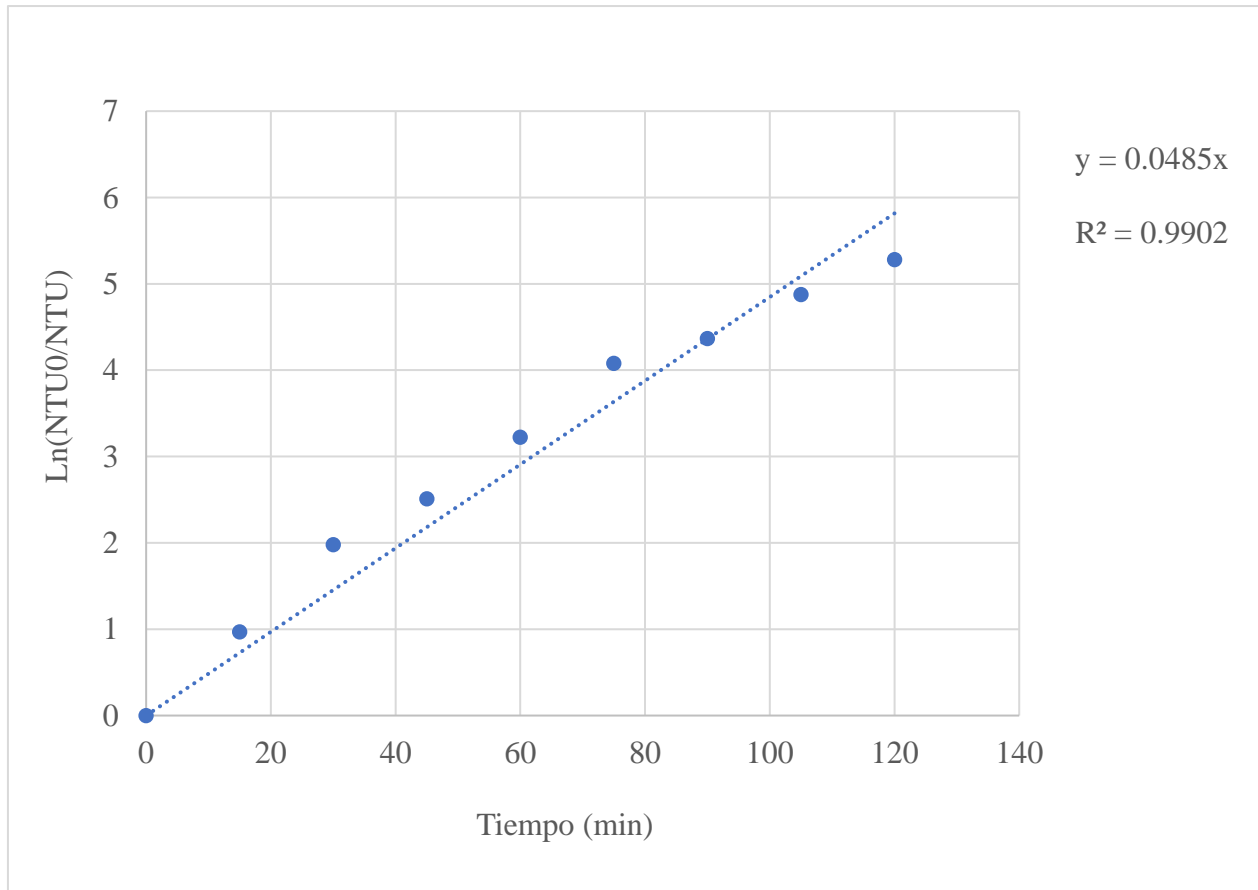
Reducción de la turbiedad (NTU) en función del tiempo, con 3 mA/cm² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.



A partir de la figura 14, se realizó el análisis de la velocidad de degradación de la turbiedad mediante las ecuaciones 17, 18, 19 y 20, obteniéndose lo siguiente:

Figura 15

Comportamiento de primer orden para la velocidad de eliminación de la turbiedad, con 3 mA/cm² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.



Como se puede observar en la figura 15, el comportamiento de la disminución de la turbiedad corresponde a una ecuación de primer orden, donde el valor de la pendiente de la gráfica, es la constante de velocidad de remoción de la turbiedad.

$$m = k \quad (45)$$

$$k = 0.0485 \text{ min}^{-1} \quad (46)$$

Entonces, la ecuación de velocidad será:

$$-r_A = kC_A \quad (47)$$

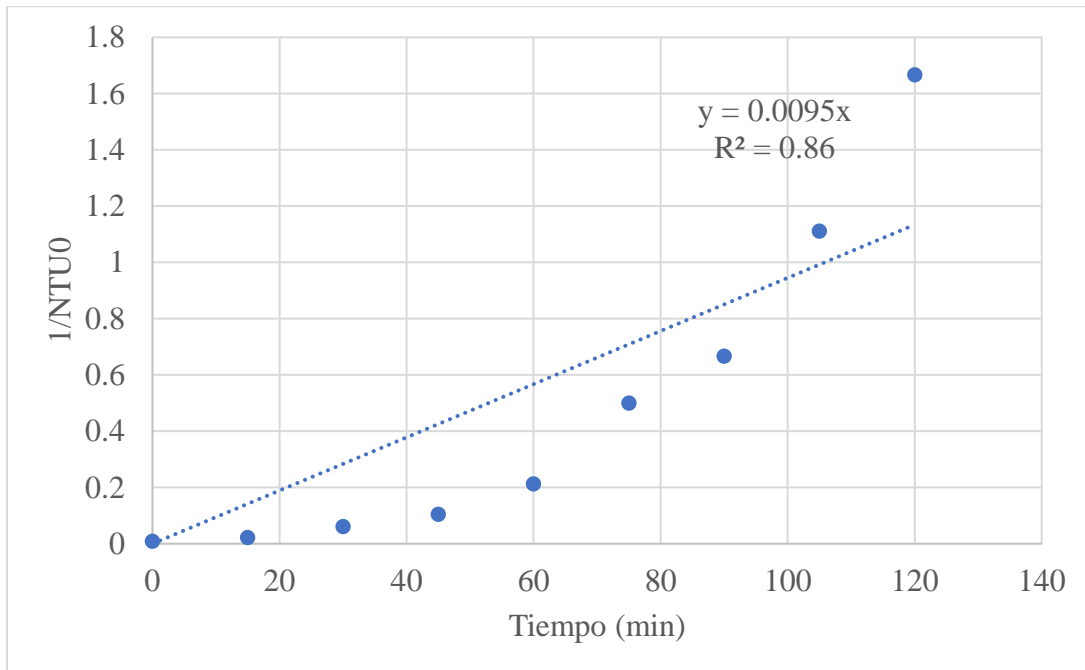
$$-r_A = [0.0485 \text{ min}^{-1}]C_A \quad (48)$$

En contraste con los hallazgos de Valdiviezo Gonzales et al. (2022) y también Roussy y otros (2005), el comportamiento de la remoción de turbidez correspondiente a una ecuación de primer orden, es coincidente. Además, Valdiviezo Gonzales et al. (2022), reportan una constante de velocidad de sedimentación de turbidez equivalente a $k = 0.00016 \text{ min}^{-1}$, mientras que en la presente investigación la constante de velocidad de remoción de la turbiedad es $k = 0.0485 \text{ min}^{-1}$, de donde es apreciable gran diferenciación entre ambas. Estas disparidades podrían atribuirse a que la velocidad de remoción de turbidez comprende no solo la remoción de materia orgánica por sedimentación sino también la remoción, por flotación; además de las posibles diferencias en las muestras estudiadas y en las metodologías empleadas.

En la figura 16 se muestra el ajuste de los datos de la turbiedad para un comportamiento de segundo orden, con 3 mA/cm^2 y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.

Figura 16

Comportamiento de segundo orden para la velocidad de eliminación de la turbiedad, con 3 mA/cm² y con 0.5 cm con electrodos de aluminio.



Se analizó los datos para un segundo orden, y se obtuvo un coeficiente de correlación lineal de 0.86. Este valor es menor al coeficiente de correlación lineal de primer orden, razón por la cuál se descartó para esta presente investigación.

CONCLUSIONES

- Se evaluó la remoción de la turbiedad de los lixiviados viejos del relleno sanitario de Anta, mediante el proceso de electrocoagulación.
- Se realizó la caracterización fisicoquímica de los lixiviados del relleno sanitario de Anta encontrándose un pH promedio de 8.5, conductividad de 18.2 mS/cm, temperatura 22.4 °C, turbiedad de 118 NTU y DQO de 1790 mg/l.
- Se evaluó el efecto de las variables distancia entre electrodos, la densidad de corriente y el tipo de electrodo, en la remoción de la turbiedad en los lixiviados del Relleno Sanitario de Anta. Encontrándose que a una menor distancia de separación entre los electrodos (0.5 cm) se obtiene una mejor reducción de turbiedad, así mismo; el suministro de densidad de corriente en su nivel alto ($3\text{mA}/\text{cm}^2$) favorece a la eliminación de turbiedad y que el Al como ánodo, en comparación al Fe, proporciona mejor eliminación de la turbiedad.
- Se determinó los parámetros de distancia de separación entre electrodos, la densidad de corriente y el tipo de electrodo que alcanzó el mejor porcentaje de remoción de la turbiedad. Siendo estos, 0.5 cm de distancia de electrodos, $3\text{mA}/\text{cm}^2$ de densidad de corriente y Al como ánodo de sacrificio; parámetros con los que se reportó un porcentaje de remoción de 99.5% de turbiedad y 90.12% de DQO.
- Se determinó el modelo cinético de primer orden tanto para la reducción de la turbiedad como para la degradación de DQO de los lixiviados del Relleno Sanitario de Anta.

RECOMENDACIONES

- Ejecutar estudios sobre la calidad de los lodos generados.
- Implementar una tecnología de tratamiento de lixiviados para el Relleno Sanitario de Anta, ya que actualmente no cuenta tratamiento alguno.

BIBLIOGRAFÍA

- Akansha, J., Nidheesh, P., Gopinath, A., Anupama, K., & Kumar, M. S. (2020). Treatment of dairy industry wastewater by combined aerated electrocoagulation and phytoremediation process. *Elseiver*, 253.
- Akyol, A. (2011). Treatment of paint manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Treatment of paint manufacturing wastewater by electrocoagulation*. Turkia: Elsevier.
- ANA, & MINAGRI. (2016). Protocolo Nacional para el monitoreo de la calidad de los Recursos Hidricos Superficiales. Perú.
- APHA, AWWA, & WPCF. (2005). Métodos normlizados para el análisis de aguas potables y residuales. Madrid, España: Diaz de santos.
- Arango Romero, P. A. (2013). *Evaluación de alternativas para el tratamiento de lixiviados en el relleno sanitario Antanas del Municipio de San Juan de Pasto en Colombia (tesis de maestría)*. Universidad de Buenos Aires. Facultad de ciencias exactas y naturales, Colombia.
- Arango Ruiz, A. (2012). Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Dialnet*.
- Arellano Díaz, J., & Guzmán Pantoja, J. E. (2011). *Ingeniería ambiental*. Alpha Editorial.
- Asaithambi, P., Beyene, D., & Aziz, A. (2018). Removal of pollutants with determination of power consumption from landfill leachate wastewater using an electrocoagulation process: optimization using response surface methodology (RSM). *Appl Water Sci* 8, 69.

- Ávila Armas, D. I., & Silva Vásquez, C. G. (2010). Tratamiento de lixiviados diluido con aguas residuales en una planta piloto a escala de un sistema de lodos activados con el fin de lograr un efluente optimo. Lima, Perú.
- Barrera Díaz, C. (2014). *Aplicaciones electroquímicas a tratamiento de aguas residuales*. México: Reverte.
- Bastidas, L. M., & Castro, A. J. (2004). *Remoción de color de lixiviados tratados biologicamente mediante oxidación por permanganato de potasio (tesis de pregrado)*. Universidad de Colombia, sede Manizales, Colombia.
- Bermeo Garay, M., & Ticono Gomez, O. (2016). Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología. *Industrial Data*, 19.
- Carlessi Sánchez, H., & Meza Reyes, C. (2017). *Metodología y diseños en la investigación científica*. Business Support Aneth S.R.L.
- Carrasco, S. (2008). *Metodología de la investigación*. Lima: San Marcos.
- Chacón Bacilio, F. M., & Huampotupa Champi, C. K. (2021). Electrocoagulación de aguas residuales en la Industria Lactea Ramirez - Anta - Compone. *Electrocoagulación de aguas resdiduales en la Industria Lactea Ramirez - Anta - Compone*. Cusco.
- Chang, R., & Kenneth, G. (2017). *Quimica* (Vol. 12). Mexico: Mc Graw Hill education.
- Chaves Tenorio, J. E. (2021). Tratamiento de aguas residuales. Colombia: Universidad Nacional e Colombia.
- Chávez Montes, W. M. (2011). Tratamiento de lixiviados generados en el Relleno Sanitario de la ciudad de México. México.

- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Elseiver*, 17.
- Chen, X., Chen, G., & Yue, P. L. (2000). Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, 19(1-2), 65-76.
- Chezeau, B., Boudriche, L., Vial, C., & Boudjema, A. (2020). Treatment of dairy wastewater by electrocoagulation process: Advantages of combined iron/aluminum electrodes. *Separation Science and Technology*, 55(14), 2510-2527.
- Cristancho Montenegro, D. L., Torres Mejía, A. S., & Lobatón Orduz, J. F. (2020). Análisis comparativo del impacto al recurso hídrico generado en los principales rellenos sanitarios en Colombia. *Revista Mutis*, 25.
- Dany, R., Azai's, A., Benkaraache, S., Drogui, P., & D. Tyagi, R. (2018). Composting leachate: characterization, treatment, and future prospectives. *CrossMark*.
- Dia, O., Drogui, P., Buelna, G., Dubé, R., & Ihsen, B. S. (2017). Electrocoagulation of bio-filtrated landfill leachate: Fractionation of organic matter and influence of anode materials. *Chemosphere*, 1136-1141.
- DIGESA. (2009). Reglamento para el diseño, operación y mantenimiento de infraestructuras de disposición final de residuos sólidos del ámbito municipal: rellenos sanitarios. Perú.
- Esteban Nieto, N. (2018). *Tipos de Investigación*.
- Fernandes, A., Pacheco, M., Ciríaco, L., & Lopes, A. (2015). Review on the electrochemical processes for the treatment of sanitary landfill leachates: Present and future. *Applied Catalysis B: Environmental*, 176, 183-200.
- Fogler, H. (2008). *Elementos de Ingeniería de las reacciones químicas*. Pearson .

- Fowler, R. J. (1994). *Electricidad principios y aplicaciones*. España: Editorial S.A.
- Francitorra, R. G., Montiel Leguey, V., Aldaz Riera, A., Exposito Rodriguez, E., Garcia Garcia, V., Gallud Martinez, F., & Ortiz Diaz-Guerra, J. M. (2013). *España Patente n° ES2382274B1*.
- Ghasem, H., Abdolazim, A., Abdolmohammad Sadat, S., Abdolreza, E., Morteza, Z., Ali Akbar, B., & Tayebe, S. (2016). Optimization of Landfill Leachate Treatment Process by Electrocoagulation, Electroflotation and Sedimentation Sequential Method. *International Journal of Electrochemical Science*, 6706-6718.
- Gilpavas, E. (2008). APLICACIÓN DE LA ELECTROQUÍMICA EN AGUAS RESIDUALES. *Universidad EAFIT*.
- Giraldo, E. (2014). Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios: avances recientes. *Revista de ingeniería*(14), 44-55.
- Guanoluisa Acero, L. J. (2012). *Diseño de un sistema de tratamiento de lixiviados del relleno sanitario el Inga mediante electrocoagulación y fitorremediación (tesis de pregrado)*. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- Hariraj Singh, B. K. (2016). Assessment of kinetics behavior of electrocoagulation process for the removal of suspended solids and metals from synthetic water. *Environ*, 141-148.
- Harris, D. (1992). *Análisis químico cuantitativo*. México: Grupo editorial Iberoamericana.
- Hassan Pahlavanzadeh, R. K. (2010). Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment of paper mill wastewater. *Elsevier*, 199-205.

- Hernández Campanella, J. (2013). Sexto informe nacional de residuos sólidos de la gestión del ámbito municipal y no municipal 2013. Lima, Perú.
- Hernandez Flores, J. S., & Mejia Rosa, S. (2019). Evaluación del sistema de electrocoagulación para disminuir la carga contaminante a escala de laboratorio. Bogota.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018). *Metodología de la investigación* (Vols. 4, pp. 129). México: Mc Graw-Hill Interamericana.
- Huamán Boza, Y. (2016). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala de laboratorio para el tratamiento de lixiviados del botadero de la mejorada El Tambo . Huancayo: Universidad Alas Peruanas.
- Huda, N., Raman, A., Bello, M., & Ramesh, S. (2017). Electrocoagulation treatment of raw landfill leachate using iron-based electrodes: Effects of process parameters and optimization. *Journal of Environmental Management*, 75-81.
- Ilhan, F., Kurt, U., Apaydin, O., & Gonullu, M. T. (2008). Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1-3), 381-389.
- Inan, H., Dimoglo, A., Şimşek, H., & Karpuzcu, M. (2004). Olive oil mill wastewater treatment by means of electro-coagulation. *Separation and Purification Technology*, 36(1), 23-31.
- INEI. (Septiembre de 2020). *Acceso a los servicios básicos en el Perú, 2013-2019*.
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1756/
- Irene Vera, M. (2007). *Química General Unidad X: Electroquímica*. Argentina: Universidad Nacional del Nordeste.

- Islam, S. M.-U. (2017). Electrocoagulation (EC) technology for wastewater treatment and pollutants removal. *Sustainable Water Resources Management*, 5(1), 359–380.
- Katal, R., & Pahlavanzadeh, H. (2011). Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment of paper mill wastewater. *Desalination*, 265(1-3), 199-205.
- Kobyas, M., Can, O. T., & Bayramoglu, M. (2003). Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 100(1-3), 163-178.
- Kumar, A., Nidheesh, P., & Kumar, M. S. (2018). Composite wastewater treatment by aerated electrocoagulation and modified peroxi-coagulation processes. *Elsevier*, 587-593.
- L.Riadi1, L.Sapei, T.Lidiawati, & Y.E.Agustin. (2017). Application of a hybrid Electrocoagulation-Fenton process in yarn dye wastewater : Kinetic study. *Second International Conference on Chemical Engineering (ICCE) UNPAR*, 1-5.
- Lakshmanan, D., Clifford, D. A., & Samanta, G. (2009). Ferrous and Ferric Ion Generation during Iron electrocoagulation. *Supporting Information for the Environmental Science and Technology article*.
- Leads, L. (2023). *Química.es*.
https://www.quimica.es/enciclopedia/Cin%C3%A9tica_qu%C3%ADmica.html
- Liu, H., Zhao, X., & Qu, J. (2010). Electrocoagulation in Water Treatment. *Electrochemistry for the Environment*, 245-262.

- Loayza Morales, C. A., & 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.
- Luján Diaz, A. J., & Sánchez Soto, G. I. (2020). *Revisión Sistemática - Eficiencia de Humedales artificiales en el tratamiento de lixiviados generados en la planta de residuos sólidos, Cajamarca (tesis de pregrado)*. Universidad Privada del Norte, Perú.
- Maiti, S. K., Hazra, T., & Debsarkar, A. (2020). Removal of total chromium from landfill leachate by electrocoagulation process using iron electrodes: effect of some major operational and chemical parameters. *J. Indian Chem. Soc*, 97, 2453-2460.
- Martínez Montoya, F., Montoya Martínez, J., & Segura Muñoz, J. (2018). *Guía para la prevención y vigilancia de algunas enfermedades infecciosas ectoparasitosis y alacranismo en situaciones de desastre*. Lima.
- Merzouk, B., Gourich, B., Sekki, A., Madani, K., & M., C. (2009). Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation–electroflotation technique: A case study. *Journal of Hazardous Materials*, 215-222.
- Metcalf, & Eddy , I. (1995). *Ingeniería de aguas residuales* . Madrid: McGraw-Hill.
- MINAM. (Abril de 2011). *Guía de diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de relleno sanitario manual*. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/guia-diseno-construccion-operacion-mantenimiento-cierre-relleno>
- MINISDEF, M. d. (8 de noviembre de 2016). *Protocolo de toma de muestras de agua residual*. https://www.defensa.gob.es/itoxdef/Galerias/documentacion/protocolos/ficheros/PROTOCOLO_DE_TOMA_DE_MUESTRAS_DE_AGUA_RESIDUAL_ver_2.pdf

- MMAyA, M. d. (2015). *Guía para la toma de muestras de agua residual*.
https://www.bivica.org/files/5376_aguas-residuales-muestra.pdf
- Mohd, N., Lakhveer, S., Krishnan, S., Sakinah, M., & Zularisam, A. (2018). Electrode design for electrochemical cell to treat palm oil mill effluent by electrocoagulation process. *Environmental Technology & Innovation*, 9, 323-341.
- Mollah, M. Y., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC) — science and applications. *Journal of Hazardous Materials* .
- Moneer, A., & El Nemr, A. (2012). Electro-Coagulation for Textile Dyes Removal. *Nonconventional Textile Waste Water Treatment. Nova Science Publishers*, 162-204.
- Moreno-Casillas, H. A., Cocke, D. L., Gomes, J. A., Morkovsky, P., Parga, J., & Peterson, E. (2007). Electrocoagulation mechanism for COD removal. *Separation and Purification Technology*, 2004-2011.
- Moya Llamas, M. (s.f.). Tecnologías electroquímicas en el tratamiento de aguas: electrocoagulación.
- Muñoz Espitia, M. Á., Cortés Bermúdez, J. D., & Agudelo Valencia, R. N. (2022). Electrocoagulación con electrodos de aluminio para tratamiento de aguas residuales de curtiembres en Villapinzón, Cundinamarca, Colombia. *Revista Mutis*, 12(1).
- Murat, E., Mehmet, K., & Mahmut, B. (2006). Tekstil endüstrisi atıksularinin elektrokoagülasyon ile aritilmasi: Teknik ve ekonomik değerlendirme. *tüdergisi/e*, 55-65.

- Mussa, Z. H., Othman, M. R., & Abdullah, M. P. (2015). Electrochemical Oxidation of Landfill Leachate: Investigation of Operational Parameters and Kinetics Using Graphite-PVC Composite Electrode as Anode. *J. Braz. Chem. Soc*, 26, 939-948.
- Najera Aguilar, H. A. (2017). *UNICACH*.
https://www.unicach.mx/_/ambiental/descargar/Gaceta4/Lixiviados.pdf
- Nasrullah, M., Siddique, M. N., & Zularisam, A. (2014). Effect of High Current Density in Electrocoagulation Process for Sewage Treatment. *ASIAN JOURNAL OF JOURNAL OF CHEMISTRY*, 26, 4282-4285.
- Ninan Valer, K. G., & Zambrano Jarandilla, M. C. (2019). Tratamiento de lixiviados del Relleno Sanitario de Jaquira por Electrocoagulación. Cusco.
- Ojeda Armaignac, E., & Hing Cortón, R. (s.f.). Estudio del proceso de electrocoagulación de la vinaza empleando electrodos de aluminio. 2010. Cuba.
- Orkun, M. O., & Kuleyin, A. (2012). Treatment performance evaluation of chemical oxygen demand from landfill leachate by electro-coagulation and electro-fenton technique. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 31(1), 59-67.
- Pajootan, E., Arami, M., & Mahmoodi, N. M. (2012). Binary system dye removal by electrocoagulation from synthetic and real colored wastewaters. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 282-290.
- Parra Pinchao, E. A., & Camilo Gómez, M. D. (2021). *Comparación de las diversas estrategias en el tratamiento de lixiviados, para el mejoramiento de la calidad de los efluentes en los rellenos sanitarios*. Uniautónoma del Cauca, Colombia.

- Pérez Sicairos, S., Morales-Cuevas, J. B., Félix-Navarro, R. M., & Hernández-Calderón, O. M. (2011). Evaluation of the electro-coagulation process for the removal of turbidity of river water, wastewater and pond water. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(1), 79-91.
- Poma Javier, J. R., & Quispe Sanca, P. A. (2016). *Remoción de contaminantes de aguas residuales urbanas por el método de electrocoagulación (tesis de pregrado)*. Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú.
- Prando, R. R. (1996). *Manual de gestión de la calidad ambiental*. Piedra Santa.
- Puenguenán Cuatín, O. L., & Segura Ramirez, K. V. (2013). *Proceso de ELECTROFLOX en el tratamiento de aguas residuales de curtiembre*. Universidad del Valle, Colombia.
- Qarani Aziz, S., Abdul Aziz, H., Suffian Yusoff, M., J K Bashir, M., & Umar, M. (2010). Leachate characterization in semi-aerobic and anaerobic sanitary landfills: a comparative study. *Elseiver*, 2608-2614.
- Ricordel, C., & Djelal, H. (2014). Treatment of landfill leachate with high proportion of refractory materials by electrocoagulation: System performances and sludge settling characteristics. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2(3), 1551-1557.
- Ricordel, C., Darchen, A., & Hadjiev, D. (2010). Electrocoagulation–electroflotation as a surface water treatment for industrial uses. *Separation and Purification Technology*, 342-347.
- Rivas Arias, C. A. (s.f). *Piensa un minuto antes de actuar: gestión integral de residuos sólidos*. <https://www.mincit.gov.co/getattachment/c957c5b4-4f22-4a75-be4d-73e7b64e4736/17-10-2018-Uso-Eficiente-de-Recursos-Agua-y-Energi.aspx>
- Romero Rojas, J. A. (2010). *Tratamiento de aguas residuales*. Colombia.

- Roussy, J., Van Vooren, M., Dempsey, B. A., & Guibal, E. (2005). Influence of chitosan characteristics on the coagulation and the flocculation of bentonite suspensions. *Water Research*, 39(14), 3247-3258.
- Sedeqi, S., Bazargan, A., & Mirbagheri, S. A. (2021). Consuming the least amount of energy and resources in landfill leachate electrocoagulation. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101454.
- Senamhi. (2024). *Senamhi*. <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=cusco&p=estaciones>
- Suero Sánchez, E. D. (2022). *Manejo de lixiviados de la fracción orgánica de los residuos sólidos del relleno sanitario de Anta, Cusco, Perú*. [Tesis para optar el grado de Magister]. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Tibanlomo Chisag, N. M. (2014). *Diseño de una planta de lixiviados para el botadero de Curgua del cantón Guaranda provincia de Bolivar*. Ecuador.
- Tito Huallpa, B. B., & Rojas Rodriguez, R. A. (2022). Remoción de materia orgánica de los lixiviados del relleno sanitario de Urubamba mediante el proceso electroquímico. Cusco.
- Tito, B. (8 de Enero de 2021). *Importancia de los rellenos sanitarios: tipos, características*. <https://ingenieriaambiental.net/rellenos-sanitarios/>
- Toala Perez, S. C. (Junio de 2019). Caracterización de lixiviados en un bioreactor con residuos estabilizados del SDF (sitio de disposición final) de Berriozabal Chiapas. Mexico.
- Valdiviezo Gonzales, L., Cabello Torres, R. J., Flores del Pino, L., Salcedo, M. d., Alegría Arnedo, M. C., & Rodriguez Rodriguez, M. (2022). Cinética de descontaminación de

aguas de curtiembre utilizando biofloculantes. *Tecnología y ciencias del agua*, 13(6), 01-55.

Vassos, B. H., & Ewing, G. W. (1987). *Electroquímica Analítica*. Limusa.

Vera, M. I. (2007). Química General. *Química General*. Universidad Nacional del Nordeste.

Yilmaz, A. E., Boncukcuoğlu, R., Kocakerim, M. M., Yilmaz, M. T., & Paluluoğlu, C. (2008).

Boron removal from geothermal waters by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 153(1-2), 146-151.

Yugo, S., Quian, Z., Liao, M., & Chen, G. (2021). Importance of Combined Electrochemical

Process Sequence and Electrode Arrangements: A Lab-scale Trial of Real Reverse

Osmosis Landfill Leachate Concentrate. *Elsevier*, 2-11.

APENDICE

APENDICE A

A.1. PUNTO DE MUESTREO, CARACTERIZACIÓN Y ARMADO DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN.

El punto de muestreo se realizó en el pozo de los lixiviados viejos del Relleno Sanitario de Chacán-Anta. Hasta el momento de los muestreos, este Relleno Sanitario viene prestando servicio a toda la provincia de Anta, el mismo que esta ubicado a 4.2 km de la provincia de Anta, situada entre las comunidades de Chacán y Kehuar.

En la imagen A.1 se muestra el pozo de los lixiviados antiguos para la toma de muestras, lo cuál se realizó de acuerdo al protocolo de monitoreo ambiental de efluentes líquidos (ANA & MINAGRI, 2016).

Figura A. 1:

Punto de muestreo de la poza de lixiviados antiguos del Relleno Sanitario de Anta



En la figura A.2 se puede observar los instrumentos para la lectura de los parámetros al momento de hacer la caracterización fisicoquímica de las muestras (ANA & MINAGRI, 2016). Las muestras fueron recolectadas en horas de la mañana y fue llevado al laboratorio para ser analizado inmediatamente.

Figura A. 2:

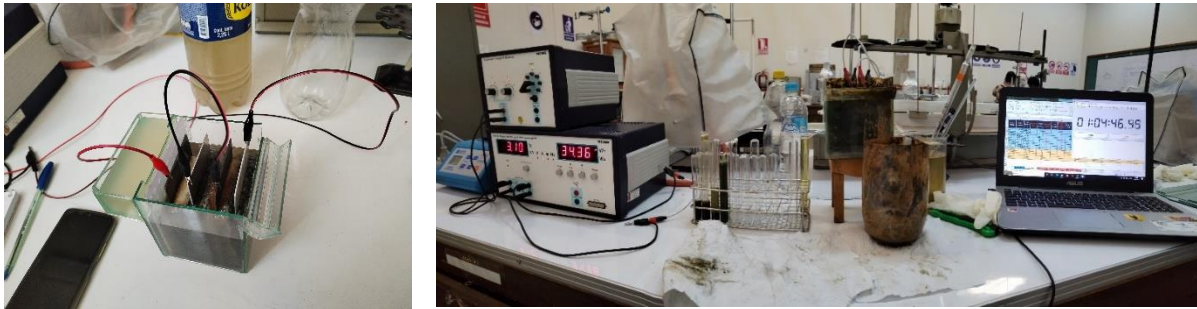
Instrumentos para la caracterización del lixiviados



En la imagen A.3 se puede apreciar el armado y la configuración del sistema de electrocoagulación para el tratamiento de lixiviados del relleno sanitario de Anta.

Figura A. 3:

Sistema de Electrocoagulación.



A.2. IMÁGENES DEL LIXIVIADO ANTES, DURANTE Y DESPUES DEL TRATAMIENTO POR ELECTROCOAGULACIÓN.

En la figura A.4, A.5 y A.6 se muestran los lixiviados antes, durante y después del proceso de electrocoagulación. Se observa que el lixiviado original es un líquido oscuro, durante el proceso de electrocoagulación se puede observar una espuma densa, color verde-oscuro, y para el lixiviado después del proceso de electrocoagulación, ya no hay espumas, y se vio un líquido casi transparente.

Figura A. 4:

Lixiviado antes de la electrocoagulación.

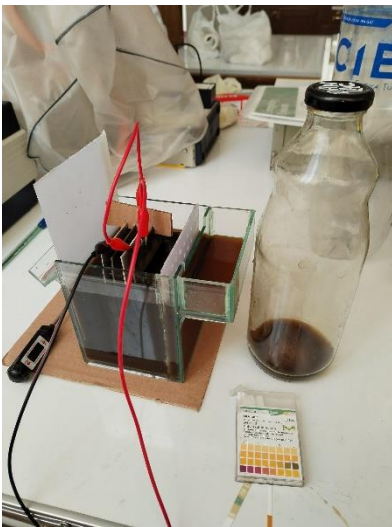


Figura A. 5

Lixiviado durante la electrocoagulación



Figura A. 6:

Lixiviado después de la electrólisis



En la figura A.7 podemos observar el tratamiento de lixiviados a diferentes tiempos, y la característica que resaltó más fue es la disminución de color según el tiempo.

Figura A. 7:

Muestras de lixiviados tratados comparados con el tiempo



A.3. FOTOS DEL ARMADO DE LA CUBA, TOMA DE MUESTRAS, OPERACIÓN, ANÁLISIS DE DQO Y TURBIEDAD.

Figura A. 8:

Punto de muestreo



Figura A. 9:

Sistema de transporte de muestras.



Figura A. 10:

Armado de sistema del sistema de electrocoagulación y puesta en marcha.

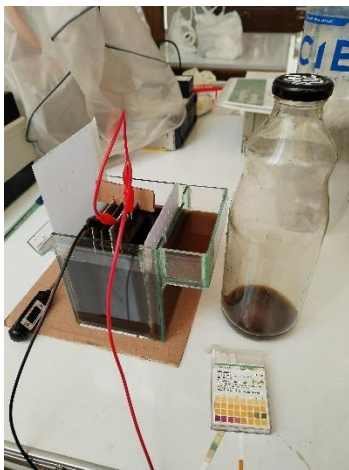


Figura A. 11:

Muestras de lixiviado después de la Electrólisis.



Figura A. 12:

Reactivo para determinación de DQO.



Figura A. 13

Termoreactor para DQO con muestras.



Figura A. 14

Fotómetro con lectura de muestra.



Figura A. 15

Turbidímetro con lectura de muestra

