



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Electrocoagulación de iones de metales pesados en aguas residuales

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Sergio José Soto Fructuoso

DIRECTOR: Santiago Rafael Urréjola Madriñán

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Electrocoagulación de iones de metales pesados en aguas
residuales*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El Trabajo de Fin de Grado (TFG) se centra en la aplicación de la electrocoagulación como una técnica prometedora para el tratamiento de aguas contaminadas, abordando específicamente la remoción de metales pesados. A través de una serie de experimentos rigurosos, se evaluó la eficacia de este método en la eliminación de contaminantes metálicos, considerando variables como el tiempo de tratamiento, la concentración inicial y final de los metales y el pH. Los resultados obtenidos fueron analizados mediante técnicas espectroscópicas y revelaron una variación significativa en la tasa de remoción de los metales en función de estos parámetros. Además de los aspectos técnicos, el estudio también aborda consideraciones éticas y sociales relacionadas con la gestión del agua y la contaminación ambiental. Se propusieron mejoras en el diseño del sistema de electrocoagulación para optimizar su eficiencia y viabilidad a escala práctica. En resumen, el TFG ofrece una evaluación exhaustiva de la electrocoagulación como método de tratamiento de aguas contaminadas, destacando su potencial para abordar problemas ambientales urgentes y promover la sostenibilidad en la gestión del agua

PALABRAS CLAVE

electrocoagulación, metales pesados, pH, espectroscópica, gestión del agua

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi tutor, Santiago Urrejola, cuya dedicación, paciencia y valiosa orientación fueron fundamentales en la realización de este Trabajo de Fin de Grado. También quiero hacer especial hincapié en el apoyo incondicional de mis padres, cuyo amor, sacrificio y aliento han sido la fuerza motriz detrás de este logro. Su constante respaldo y confianza en mí han sido un verdadero regalo, impulsándome a dar lo mejor de mí en cada paso del camino. Agradezco infinitamente su presencia y apoyo en este viaje académico y personal. Por último, quiero agradecer a mis amigos y seres queridos por su aliento y comprensión a lo largo de esta etapa. Su presencia ha sido un pilar invaluable en este proceso. A todos ellos, mi más sincero agradecimiento por ser parte de este importante capítulo en mi vida.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	5
1.Introducción y objetivos	6
1.1 Introducción	6
1.2 Aguas residuales	6
1.2.1 Efectos negativos de las aguas residuales.....	7
1.2.2 Principales contaminantes presentes en las aguas residuales	8
1.3 Convenios que regulan las aguas residuales	9
1.3.1 Convenio de Albufeira.....	10
1.3.2 Acuerdo de Toulouse	10
1.3.3 Conferencia de Directores Iberoamericanos del Agua (CODIA).....	10
1.3.4 Convenio de Helsinki	10
1.4 Objetivos	11
2.Estado del arte	12
2.1 Metales pesados	12
2.1.1 Principales fuentes de contaminación por metales	13
2.2 Principales procesos para eliminar metales pesados de las aguas residuales.....	16
2.2.1 Precipitación química	16
2.2.2 Intercambio iónico	17
2.2.3 Adsorción.....	17
2.2.4 Filtración con membranas.....	18
2.2.5 Coagulación y Floculación.	18
2.2.6 Fitorremediación.....	19

2.3 Electrocoagulación.....	19
2.3.1 Procesos físico-químicos que intervienen	21
2.3.2 Factores que afectan a la electrocoagulación.....	22
2.3.3 Reacciones químicas que intervienen	23
2.3.4 Diseño y tipo de reactores mas utilizados.....	24
2.3.5 Ventajas y desventajas de la electrocoagulación	25
2.3.6 Principales aplicaciones de la electrocoagulación	26
3 Desarrollo del TFG	28
3.1 Metodología	28
3.1.1 Flujo de trabajo	28
.....	29
.....	29
3.1.2 Diseño de la celda	29
3.1.3 Construcción del montaje completo	31
3.2 Contaminación del agua.....	32
3.2.1 Cloruro de cobre (II)dihidratado.....	32
3.2.2 Sulfato de zinc heptahidratado.....	32
3.2.3 Nitrato de níquel (II) hexahidratado	33
3.2.4 Concentración inicial de los contaminantes	34
3.3 Inicio de la primera experimentación.....	36
3.4 Inicio de la segunda experimentación	38
4. Resultados/Validación/ Pruebas	40
4.1 resultado de los experimentos	40
4.2 Concentraciones finales	40
4.2.1 Absorbancia	40
4.2.2 Recta de calibrado.....	42
4.2.3 Tasa de remoción	42
4.3. Resultados primera experimentación	42
4.4 Resultados segunda experimentación	48
4.5 Comparativa ambos experimentos	52
5 Conclusiones y líneas futuras	53
5.1 Conclusiones en base a los objetivos propuestos.....	53
5.2 líneas futuras	53
Bibliografía.....	55
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	58

Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	62
---	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Aumento de publicaciones sobre electrocoagulación(tomada de[28]).....	20
Figura 2-2 Mecanismo de electrocoagulación en agua contaminada con un metal pesado (tomada de[28]).....	21
Figura 2-3 Reactor tipo batch (tomada de[29])	24
Figura 2-4 Tipos de reactores y métodos de separación.....	25
Figura 3-1 Flujo de trabajo	29
Figura 3-2 Cubeta utilizada	30
Figura 3-3 Electrodo usados	30
Figura 3-4 Medidor pH, temperatura y conductividad	31
Figura 3-5 Configuración monopolar en paralelo (tomada de[32])	31
Figura 3-6 Montaje de la celda final.....	31
Figura 3-7 cobre(II) cloruro hidratado	32
Figura 3-8 Sulfato de zinc heptahidratado	33
Figura 3-9 Nitrato de níquel (II) hexahidratado	34
Figura 3-10 Montaje primera experimentación	36
Figura 3-11 Muestras de cada uno de los metales	37
Figura 4-1 Diferentes modos del Lambda XLS	41
Figura 4-2 Recta de calibrado del Zinc	43
Figura 4-3 Recta de calibrado del Cobre	44
Figura 4-4 Recta de calibrado del Níquel.....	45
Figura 4-5 Comparativa de remoción de los 3 metales	47
Figura 4-6 Tasa de remoción de los 3 metales a la vez	49
Figura 4-7 Tasa de remoción de los 3 metales a la vez a pH 10	50
Figura 4-8 Comparativa de tasa de remoción a diferente pH	51
Figura 4-9 Comparativa tasa de remoción entre las 2 experimentaciones	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Efectos negativos aguas residuales [2].....	8
Tabla 1-2 Contaminantes, principales fuentes y efectos [4].....	9
Tabla 2-1 Máxima concentración de metales permitidas en el agua (tomada de[11])	13
Tabla 2-2 Metales, principales fuentes y efectos(tomada de [19]).....	16
Tabla 2-3 Procesos físico-químicos que intervienen(tomada de[29]).....	22
Tabla 2-4 Factores que afectan a la electrocoagulación (tomada de[30])	22
Tabla 2-5 Ventajas y desventajas de la electrocoagulación (tomada de[30])	26
Tabla 3-1 Concentraciones de referencia de cada uno de los metales (tomada de[36]).....	34
Tabla 3-2 Masa molar de los compuestos	35
Tabla 3-3 Masa molar de cada metal.....	35
Tabla 3-4 Valor de pH ,conductividad y temperatura obtenidos al principio, a los 30 minutos ,45 minutos y 60 minutos.....	38
Tabla 4-1 Longitudes de onda de cada metal	41
Tabla 4-2 Muestras pretratamiento y postratamiento	42
Tabla 4-3 Recta calibrado zinc	43
Tabla 4-4 Recta calibrado cobre.....	44
Tabla 4-5 Recta calibrado níquel.....	45
Tabla 4-6 Concentración final y tasa de remoción de cada metal	46
Tabla 4-7 Absorbancia , concentración final y tasa de remoción del Zinc	46
Tabla 4-8 Absorbancia , concentración final y tasa de remoción del Cobre.....	46
Tabla 4-9 Absorbancia , concentración final y tasa de remoción del Níquel.....	47
Tabla 4-10 Absorbancia de cada metal	48
Tabla 4-11 Concentraciones de cada metal	48
Tabla 4-12 Tasas de remoción de cada metal.....	48
Tabla 4-13 Absorbancia de cada metal	49
Tabla 4-14 Concentraciones de cada metal	50
Tabla 4-15 Tasas de remoción de cada metal.....	50
Tabla A1-1 Coste total	60

1.INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Hoy en día el tratamiento eficaz de las aguas residuales se ha convertido en una máxima prioridad medioambiental, debido a la presencia de numerosos agentes contaminantes en los recursos hídricos entre los que se encuentran los iones de metales pesados. En este contexto, existen numerosos métodos para abordar este problema entre ellos la electrocoagulación la cual es una tecnología innovadora y eficaz. La electrocoagulación como proceso electroquímico implica la generación in situ de floculantes con el fin de eliminar contaminantes, siendo eficaz en la precipitación de metales pesados.

En este trabajo de fin de grado se va a realizar un estudio de como la electrocoagulación es una herramienta clave en el tratamiento de aguas residuales que contienen iones metálicos. Por medio de un análisis detallado de las bases teóricas ,variables operativas y resultados experimentales. El objetivo no es solo explorar la efectividad del proceso sino también las posibles aplicaciones prácticas y aportes de su contribución a la gestión sostenible de los recursos hídricos. El marco establecido para la investigación no solo aborda el problema específico de los metales pesados en aguas residuales sino que también realiza una contribución al desarrollo continuo de tecnologías afines al medio ambiente para el tratamiento de aguas contaminadas.

1.2 Aguas residuales

Las aguas residuales son aquellas que se han visto afectadas negativamente por el impacto humano. Son aguas que carecen de valor inmediato para su uso o producción prevista debido a su calidad, cantidad o tiempo de disponibilidad. Se pueden clasificar en tres grandes familias según su origen [1]:

- **Aguas residuales urbanas:** generadas en entornos urbanos, pueden provenir tanto de viviendas como comercios e instituciones
- **Aguas residuales domésticas:** producidas por el ser humano en sus viviendas
- **Aguas residuales industriales:** provenientes de procesos industriales , en estas es donde se encuentran en mayor cantidad los metales pesados

Estas aguas también se pueden clasificar en función del grado de tratamiento al que van a ser expuestas y por su calidad[1] :

- **Aguas residuales crudas:** aquellas que no han sufrido ningún tratamiento o que han recibido un mínimo tratamiento
- **Aguas residuales tratadas:** estas han recibido al menos un proceso de tratamiento con el fin de eliminar contaminantes

- **Aguas residuales parcialmente tratadas:** son las que han experimentado algún tipo de tratamiento pero no cumplen con los requisitos de calidad del agua
- **Aguas residuales urbanas:** incluyen una mezcla de aguas industriales y domésticas
- **Aguas residuales agrícolas:** proceden de actividades agrícolas, contienen nutrientes y pesticidas

1.2.1 Efectos negativos de las aguas residuales

Los efectos negativos de las aguas residuales son diversos y pueden tener consecuencias significativas para el medio ambiente, la salud humana y la economía [2]. Los principales aparecen en la siguiente tabla

Mal olor y sabor	Dada la amplia gama de compuestos químicos presentes en los residuos líquidos, junto con la aparición de elementos resultantes de procesos de descomposición, especialmente aquellos derivados de la descomposición de la materia orgánica en ambientes anaeróbicos.
Toxicidad	Este fenómeno se manifiesta a través de la interacción de los residuos líquidos con la vida vegetal y animal en los cuerpos de agua, además de su composición, la cual es crucial en la fase receptora del recurso hídrico, es decir, durante su consumo o utilización. Este proceso también puede conducir a la acumulación de sustancias tóxicas, principalmente en la cadena alimentaria, lo que puede resultar en efectos letales, subletales, agudos, crónicos o acumulativos
Transmisores	Las aguas contaminadas por excreciones pueden desempeñar un papel crucial en la propagación de enfermedades, ya sea de forma directa o indirecta. Este fenómeno favorece el desarrollo de artrópodos o moluscos, que actúan como eslabones en las cadenas epidemiológicas. Además, los agentes infecciosos presentes pueden difundirse, creando vectores que entran en contacto con las aguas residuales

Efectos en el entorno	El vertido de aguas residuales en ríos, lagos y mares genera una percepción negativa en la población debido a las consecuencias visuales y ambientales que conlleva. Estos eventos de contaminación provocan alteraciones en el entorno natural, modificando el paisaje y deteriorando su estética, lo que se interpreta como la creación de ambientes poco acogedores. Además, la presencia de vertidos industriales puede afectar la transparencia del agua, alterando la penetración de la luz y resultando en cambios en el color de la superficie acuática. Este aspecto cobra una importancia particular en las zonas turísticas, donde se busca mantener altos estándares estéticos y sanitarios como parte de su atractivo.
Contaminación térmica	El vertido de aguas procedentes de procesos de refrigeración industrial, aumenta la temperatura del agua, teniendo un impacto directo en los organismo acuáticos
Eutrofización	un proceso natural que tiende a acelerarse debido a la actividad humana, especialmente a través de descargas ricas en fósforo y nitrógeno. Estos elementos orgánicos provienen principalmente de detergentes, excretas y residuos de pesticidas, destacando la escorrentía generada por actividades agrícolas como una fuente significativa de contaminación.
Efectos en las aguas subterráneas	Este problema se convierte en un desafío de gran magnitud, ya que suele ser difícil de detectar y prácticamente imposible de eliminar una vez que se ha identificado, dado que, cuando se detecta, la contaminación ya ha alcanzado proporciones significativas. Este escenario de impacto se debe a la infiltración de residuos líquidos, derivados principalmente de actividades humanas, especialmente en terrenos permeables

Tabla 1-1 Efectos negativos aguas residuales [2]

1.2.2 Principales contaminantes presentes en las aguas residuales

La organización mundial de la salud define agua contaminada como aquella que sufre cambios en su composición hasta quedar inutilizable. Esta agua es contaminada en mayor medida por la acción del ser humano [3]:

- **Calentamiento global:** produce una disminución de oxígeno en el agua debido a un aumento de la temperatura de esta provocado por las emisiones de CO₂
- **Deforestación:** la tala desmesurada de árboles puede agotar las fuentes hídricas y producen residuos orgánicos que son unas de las principales fuentes de bacterias
- **Actividades industriales agrícolas y ganaderas:** los vertidos de productos químicos procedentes de estos sectores son unas de las principales causas de la eutrofización del agua
- **Basuras y vertidos de aguas fecales:** los hogares son unas de las principales fuentes

Los principales contaminantes que nos podemos encontrar en las aguas residuales se muestran en la siguiente tabla:

CONTAMINANTE	PRINCIPALES FUENTES	EFFECTO EN EL AGUA
Materia orgánica	Restos de plantas , animales, Microorganismos y productos Orgánicos en descomposición	La descomposición de la materia orgánica consume oxígeno, afectando a la disponibilidad para otras especies.
Compuestos orgánicos Refractarios	Desechos industriales y productos domésticos	Afectan negativamente a la vida acuática debido a su toxicidad
Patógenos (virus y bacterias)	Desechos humanos	Afecta a la salud humana y al medio ambiente acuático
Nutrientes (nitrógeno y fósforo)	Fertilizantes agrícolas detergentes y desechos Industriales	Causan proliferación excesiva de algas y plantas acuáticas, provocando la eutrofización
Aceites y grasas	Fuentes industriales Domésticas y transporte	Afecta a la oxigenación del agua
Sustancias químicas Inorgánicas (sales, metales)	Actividades industriales y domésticas	Toxicidad
Sólidos	Todas las fuentes	Dañinos para la vida acuática
Metales pesados	Desechos industriales y Laboratorios químicos	Toxicidad

Tabla 1-2 Contaminantes, principales fuentes y efectos [4]

1.3 Convenios que regulan las aguas residuales

Las regulaciones sobre aguas residuales pueden variar significativamente entre países y regiones. Sin embargo, existen una serie de convenciones y acuerdos internacionales que proporcionan directrices y principios generales para la gestión global de aguas residuales. Algunos de los acuerdos más relevantes incluyen [5]:

- Objetivo de desarrollo sostenible (ODS)
- Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB)
- Directiva Marco del Agua de la Unión Europea

- d) Convenio de París sobre el Cambio Climático
- e) Protocolo de Agua de la Convención de Helsinki

Estos convenios son aplicados a nivel internacional y europeo, a continuación indicaré los principales convenios nacionales:

- a) Convenio de Albufeira
- b) Acuerdo de Toulouse
- c) Conferencia de Directores Iberoamericanos del Agua (CODIA)
- d) Convenio de Helsinki

En los siguientes apartados expondré un breve resumen de los convenios que afectan de forma más directa a nuestros territorios.

1.3.1 Convenio de Albufeira

España y Portugal comparten límites en cuatro cuencas hidrográficas internacionales: Miño-Limia, Duero, Tajo y Guadiana. La gestión de los recursos hídricos entre ambos países ha evolucionado a lo largo del tiempo, y alcanzó un hito importante con la firma del Acuerdo de Cooperación para la protección y uso sostenible de las aguas de las cuencas hidrográficas españolas, también conocido como Convenio de Albufeira, en 1998. Este acuerdo, ratificado en 2000, establece las bases para una gestión compartida de los recursos hídricos, garantizando su uso adecuado y sostenible. Además, el Protocolo de Evaluación del Régimen de Caudal de 2008 complementa este acuerdo al definir los caudales necesarios para mantener la salud de los recursos hídricos y satisfacer las necesidades presentes y futuras[6]

1.3.2 Acuerdo de Toulouse

Bajo el marco del Convenio de Helsinki y la Directiva Marco del Agua (DMA), España y Francia firmaron un acuerdo administrativo en febrero de 2006. Este acuerdo tiene como objetivo coordinar las acciones relacionadas con la gestión del agua en las cuencas compartidas por ambos países. Además, busca establecer una colaboración regular y continua en la aplicación de la DMA. Ambos países están comprometidos en implementar una gestión integrada y sostenible de los recursos hídricos que atraviesan sus fronteras[5]

1.3.3 Conferencia de Directores Iberoamericanos del Agua (CODIA)

La décima Cumbre Iberoamericana de Jefes de Estado y de Gobierno, celebrada en Panamá en noviembre de 2000, confió a España la organización del primer Foro de Ministros de Medio Ambiente, que tuvo lugar en La Toja, Pontevedra, en septiembre de 2001. En este contexto, se acordó crear la Conferencia de Directores Iberoamericanos del Agua (CODIA) para brindar apoyo técnico al Foro y facilitar la cooperación en temas relacionados con los recursos hídricos.

Desde su establecimiento, CODIA ha celebrado 15 conferencias, la más reciente en Panamá en noviembre de 2014. Estas conferencias reúnen a líderes políticos involucrados en la gestión de recursos hídricos de 22 países iberoamericanos, junto con representantes de diversas organizaciones industriales[7]

1.3.4 Convenio de Helsinki

El Convenio de Helsinki, también conocido como Convenio del Agua, fue creado el 17 de marzo de 1992 y comenzó a regir el 6 de octubre de 1996. España lo ratificó el 18 de febrero de 2000. Su principal objetivo es fortalecer las medidas a nivel local, nacional y regional para proteger y asegurar la cantidad y calidad de los recursos hídricos que cruzan fronteras, promoviendo su uso sostenible. Este convenio

establece la necesidad de que las partes involucradas celebren acuerdos específicos y establezcan instituciones para cumplir con sus responsabilidades en las aguas transfronterizas, lo que proporciona un marco legal sólido para la cooperación en recursos hídricos compartidos dentro de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE).

Como continuación de este Convenio, en 1999 se creó el Protocolo Agua y Salud, siendo el primer acuerdo internacional dedicado a la unificación de aspectos relacionados con la gestión del agua y la salud. La Secretaría de este Protocolo es compartida entre la Oficina Regional para Europa de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa [8].

1.4 Objetivos

Dada la experiencia del grupo de investigación en diversos trabajos de fin de grado relacionados con el tratamiento de aguas residuales, se ha decidido llevar a cabo un estudio enfocado en la electrocoagulación como método para eliminar metales pesados presentes en estas aguas. El objetivo principal de este trabajo es comprobar la eficiencia de la electrocoagulación mediante los siguientes objetivos específicos

1. Investigar y comprender los principios fundamentales de la electrocoagulación y su aplicación en el tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales pesados.
2. Evaluar la eficacia de la electrocoagulación como método de remoción de iones de metales pesados, centrándose específicamente en níquel, zinc y cobre, mediante experimentos a escala de laboratorio.
3. Caracterizar el proceso de electrocoagulación mediante la medición de parámetros clave como la variación de pH, la conductividad eléctrica y la temperatura durante el tratamiento.
4. Determinar la cinética de remoción de los iones de metales pesados y analizar la influencia de variables como el tiempo de tratamiento en la eficacia del proceso.
5. Comparar los resultados experimentales con los estándares y regulaciones ambientales para evaluar la idoneidad de la electrocoagulación como una tecnología de tratamiento viable y sostenible para aguas residuales contaminadas con metales pesados

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Metales pesados

el término "metal pesado" se puede definir de varias maneras, ya sea por su peso atómico, su densidad o su número atómico. En general, se refiere a elementos químicos con un peso atómico comprendido entre ciertos rangos, como el cobre, el zinc, el plomo y el mercurio. Estos metales pueden representar serios problemas ambientales debido a su tendencia a acumularse en los organismos vivos y aumentar su concentración a lo largo de la cadena alimentaria, lo que puede causar efectos tóxicos en la salud humana y el medio ambiente. La peligrosidad de los metales pesados radica en su incapacidad para degradarse químicamente o biológicamente, lo que puede provocar una serie de efectos adversos, tanto físicos como psicológicos, en los seres vivos[9].

Aunque es cierto que algunos metales son esenciales para el desarrollo de la vida, ya que desempeñan funciones vitales en los organismos vivos y son necesarios para mantener la salud y el funcionamiento adecuado del cuerpo. Algunos de estos metales esenciales incluyen[10]:

1. **Hierro (Fe):** Es crucial para la producción de hemoglobina, la proteína que transporta oxígeno en la sangre, y para varias enzimas involucradas en el metabolismo energético y la función inmunológica.
2. **Zinc (Zn):** Actúa como cofactor para numerosas enzimas y proteínas, desempeñando un papel importante en la síntesis de proteínas, el metabolismo celular y la función inmunológica.
3. **Cobre (Cu):** Es esencial para la formación de tejido conectivo, la síntesis de hemoglobina y la función del sistema nervioso central, además de actuar como cofactor en varias enzimas antioxidantes.
4. **Manganeso (Mn):** Participa en la formación de huesos y tejidos conectivos, así como en el metabolismo de los aminoácidos, los lípidos y los carbohidratos.
5. **Cromo (Cr):** Ayuda a regular los niveles de glucosa en sangre y promueve la sensibilidad a la insulina, lo que lo convierte en un mineral importante para el metabolismo de los carbohidratos.

Estos metales esenciales son necesarios para una variedad de funciones biológicas importantes, desde la producción de energía hasta la función cognitiva y la respuesta inmunitaria. Sin embargo, es crucial mantener un equilibrio adecuado en su ingesta, ya que tanto la deficiencia como el exceso de estos metales pueden tener efectos adversos en la salud[10]

A continuación expondré una tabla que representa la cantidad máxima permitida por legislación de estos metales en el agua[11]:

METAL	CANTIDAD(mg/L)
Cu	2
Ba	20
Cr	0,05
Mn	2
Ni	10
Zn	5
Cd	0,05
Fe	10
Hg	0,01
Pb	0,01

Tabla 2-1 Máxima concentración de metales permitidas en el agua (tomada de[11])

La toxicidad de un metal depende de diferentes factores como la forma química en la que se encuentre, la presencia de otros metales, las condiciones del organismo receptor y su concentración.

Uno de los casos más conocidos de acumulación de elementos tóxicos en la cadena alimenticia, a partir de sedimentos contaminados, ocurrió en los años 50 en la Bahía de Minamata (Japón) en donde intoxicaciones masivas por contaminación de mercurio ocasionaron más de mil muertes debido a un brote de enfermedad neurológica conocida como Minamata extendida al consumir pescado contaminado por este metal[12].

Otro caso fue el ocurrido en Flint, Michigan, donde en 2014 se descubrió que el agua potable estaba contaminada con altos niveles de plomo debido a la corrosión de las tuberías de plomo en el sistema de agua. Este desastre de salud pública ha afectado a miles de residentes, especialmente niños, y ha generado preocupación sobre la calidad del agua potable en otras comunidades de todo el país[13].

El caso más devastador según algunos expertos fue el ocurrido en la mina de Baia Mare, también conocido como derrame de cianuro de Baia Mare, ocurrió cuando una presa de relaves mineros colapsó el 30 de enero de 2000, liberando aproximadamente 100 toneladas de cianuro y metales pesados en varios ríos de la zona, incluido el río Tisza que es uno de los principales afluentes del Danubio.

Este derrame de cianuro y metales pesados provocó uno de los peores desastres ambientales en Europa y en el mundo. Los productos químicos tóxicos vertidos al río han envenenado la vida acuática y han afectado gravemente la salud de las personas en las zonas afectadas. La contaminación ha afectado a varios países de Europa del Este, incluidos Hungría, Serbia, Bulgaria y Rumania[14].

2.1.1 Principales fuentes de contaminación por metales

Las principales fuentes de contaminación por metales pesados pueden dividirse en varias categorías, que incluyen:

i) Procesos geológicos. Mineralización.

La minería es una fuente importante de contaminación por metales pesados, tanto en el aire como en el agua. La mineralización se refiere al proceso mediante el cual los metales contenidos en las rocas

y minerales se liberan y pueden ingresar al medio ambiente durante las operaciones mineras. Este proceso puede tener lugar de muchas maneras[15]:

- **Extracción y procesamiento:** Durante la extracción y el procesamiento de minerales, los metales pesados contenidos en el mineral pueden liberarse en forma de polvo, partículas finas o líquidos de aguas residuales. Esto puede ocurrir mediante voladuras, trituración, lavado y separación de minerales, así como mediante el tratamiento de aguas residuales mineras.

- **Lixiviación:** La lixiviación es un proceso utilizado para separar metales del mineral mediante el uso de productos químicos, como cianuro o ácido sulfúrico, para disolver los metales contenidos en el mineral. Si no se controlan adecuadamente, los productos químicos utilizados en el proceso de filtración pueden filtrarse al suelo y al agua subterránea, liberando metales pesados al medio ambiente.

- **Drenaje ácido de mina:** El drenaje ácido de mina es un problema común asociado con la extracción de sulfuros metálicos, como hierro, cobre y zinc. Cuando los minerales de azufre quedan expuestos al aire y al agua durante la minería, se produce un proceso de oxidación natural que libera ácido sulfúrico y metales pesados en el agua, provocando su acidificación y contaminación de metales.

- **Descargas de aguas minerales residuales:** Las aguas residuales generadas durante las operaciones mineras, pueden contener disueltos metálicos y otros productos químicos utilizados durante la extracción y procesamiento, los cuales pueden ser liberados al medio ambiente sin un tratamiento adecuado, contribuyendo a la contaminación del agua.

ii) Efluentes industriales

Existe un gran número de efluentes industriales que pueden conducir al enriquecimiento en metales pesados como pueden ser la minería, la fundición de metales, la fabricación de productos químicos y la fabricación de productos electrónicos. El caso de la Bahía de Minamata, en el que se produjo la acumulación de metil-mercurio en sedimentos es uno de los más conocidos. Además pueden liberarse al medio ambiente otros metales en la fabricación de fertilizantes, productos textiles o refinados de petróleo[16].

iii) Efluentes domésticos

Las aguas residuales domésticas, es decir, las aguas residuales generadas por actividades humanas en hogares y zonas urbanas, también pueden ser una fuente importante de contaminación por metales pesados en el medio ambiente. Aunque las aguas residuales domésticas suelen contener niveles más bajos de metales pesados que las aguas residuales industriales, aún pueden plantear riesgos para la calidad del agua y la salud humana si no se gestionan adecuadamente. A continuación se muestran algunas formas en que las aguas residuales domésticas pueden contribuir a la contaminación por metales pesados[17]:

- **Tuberías y plomería:** Las tuberías y accesorios de plomería en edificios antiguos pueden contener plomo, especialmente en los sistemas de agua potable. El plomo puede filtrarse de estas tuberías y contaminar el agua potable, especialmente cuando el agua está estancada o es corrosiva.

- **Productos de consumo:** El uso de productos de consumo que contienen metales pesados, como cosméticos, productos de cuidado personal, pinturas y productos de limpieza, puede provocar la liberación de metales en las aguas residuales domésticas al lavar o desechar estos productos.

- **Instalaciones de desechos:** Los vertederos de desechos domésticos pueden contener una variedad de productos y materiales que contienen metales pesados, como baterías, luces fluorescentes, productos electrónicos y equipos médicos. La lixiviación de metales pesados de estos desechos puede contaminar las aguas subterráneas y superficiales si no se gestiona adecuadamente.

- **Medicamentos:** La eliminación inadecuada de medicamentos no utilizados o caducados puede provocar la liberación de metales pesados contenidos en estos medicamentos a las aguas residuales

domésticas. Los metales pesados suelen estar presentes en formulaciones farmacéuticas como conservantes o ingredientes activos.

- **Sistemas sépticos:** En áreas sin sistemas de drenaje centralizados, se utilizan sistemas sépticos para tratar las aguas residuales domésticas. Si estos sistemas no se mantienen adecuadamente, pueden contribuir a la liberación de metales pesados en el suelo y las aguas subterráneas cercanas.

iv) Procedentes de áreas rurales

En las zonas rurales, diversas actividades agrícolas, ganaderas y domésticas pueden provocar contaminación por metales pesados. Algunos factores que destruyen los metales pesados en las zonas rurales incluyen[18]:

- **Uso de fertilizantes y pesticidas químicos:** Los fertilizantes y pesticidas químicos utilizados en la agricultura pueden contener metales pesados como cadmio, plomo y arsénico. Con el tiempo, estos metales pueden acumularse en el suelo, especialmente en áreas con alta humedad donde las aguas superficiales y subterráneas se ven afectadas por la lluvia.

- **Gestión de desechos agrícolas:** La gestión inadecuada de desechos agrícolas como estiércol y residuos de cultivos puede provocar la acumulación de metales pesados en el suelo y las aguas subterráneas, particularmente en los sistemas de producción animal.

- **Uso de aguas residuales para riego:** En algunas zonas rurales, el agua sin tratar se utiliza para el riego de cultivos. Si estas aguas residuales contienen metales pesados, contaminarán el suelo y los alimentos, afectando la salud humana y la seguridad alimentaria.

- **Minería:** En las zonas rurales donde se realiza la minería, la extracción y el procesamiento de minerales pueden liberar metales pesados al medio ambiente a través del drenaje ácido de la mina, los relaves y grandes cantidades de agua contaminada.

- **Vertederos:** Los desechos sólidos, incluidos los desechos domésticos y los desechos agrícolas, pueden contener elementos que contengan metales pesados, como baterías y productos químicos agrícolas. La extracción de metales pesados de estos desechos puede contaminar las aguas subterráneas cercanas.

- **Deposición en el aire:** En áreas rurales, los metales pesados también pueden liberarse a través del aire al suelo y al agua, especialmente cerca de áreas industriales o urbanas donde se generan emisiones.

A continuación expondré una tabla donde aparecerán los principales metales pesados , la fuente de donde provienen y sus efectos en la salud humana y animal[19].

elemento	fuentes	Efectos sobre la salud
Antimonio	industria	Toxicidad gastrointestinal, efectos respiratorios y cardiovasculares
Berilio	Carbón, industria	Enfermedades respiratorias
Bismuto	Carbón	Daña riñones e hígado
Cadmio	Carbón, tuberías de agua	Enfermedades cardiovasculares
Plomo	Escape de coches, pinturas	Daños cerebrales, en exceso provoca la muerte
Mercurio	Carbón ,aparatos eléctricos	muerte
Níquel	Productos químicos, humo tabaco	Efectos cancerígenos en los animales y en el hombre cuando se forma el carbonilo
Estaño	En la producción de hierro y acero	Afecta a los animales

Tabla 2-2 Metales, principales fuentes y efectos(tomada de [19])

2.2 Principales procesos para eliminar metales pesados de las aguas residuales

La presencia de metales pesados en las aguas residuales supone una grave amenaza para el medio ambiente y la salud humana debido a su toxicidad y persistencia en el medio ambiente. Para superar este problema, se han desarrollado varios métodos de tratamiento para eliminar o reducir la concentración de estos contaminantes en las aguas residuales.

A continuación, se describen algunos de los principales métodos para la eliminación de metales pesados, incluida la precipitación química, el intercambio iónico, la adsorción, la electrocoagulación, la filtración por membrana, la fitorremediación y la sedimentación. Cada uno de estos métodos tiene diferentes ventajas y desventajas, y la elección depende de factores como la naturaleza de los residuos, la disponibilidad de materiales y los requisitos de tratamiento.

El uso de estos métodos de tratamiento no solo ayuda a proteger el medio ambiente y la salud humana, sino que también promueve el uso de agua sostenible en el tratamiento de agua limpia. Sin embargo, es importante señalar que la elección del método de tratamiento adecuado también debe tener en cuenta evaluaciones técnicas, económicas y ambientales para poder gestionar adecuadamente el agua.

2.2.1 Precipitación química

La precipitación química es un proceso utilizado en el tratamiento de aguas residuales para eliminar contaminantes, incluidos los metales pesados, formando compuestos insolubles que se disuelven y separan del agua. Esto se debe a que cuando se añaden ciertos reactivos al agua residual se produce una reacción química que produce sólidos y líquidos.

Para eliminar metales pesados, se utilizan reactivos químicos que reaccionan con iones metálicos en agua para formar compuestos insolubles como sales, sulfuros o carbonatos metálicos. Estas sustancias fluyen como sólidos y pueden separarse del agua mediante métodos de filtración o sedimentación.

La eficacia de la precipitación química depende de muchos factores, incluido el pH del agua, las concentraciones de metales pesados, la relación estequiométrica entre los agentes liberadores químicos y los contaminantes, y la presencia de otras sustancias que interfieren con las reacciones químicas. .

La precipitación química es un método ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales industriales y municipales debido a su eficacia y relativa simplicidad. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este proceso puede generar lodos o residuos sólidos que deben ser adecuadamente gestionados y eliminados para evitar impactos ambientales adversos[20].

2.2.2 Intercambio iónico

El intercambio iónico es un proceso de tratamiento de aguas residuales que implica el uso de resinas de intercambio iónico para eliminar contaminantes, incluidos metales pesados, de una solución acuosa. Este método se basa en la capacidad de ciertos materiales, como resinas especialmente diseñadas, para intercambiar iones presentes en el agua por iones con carga opuesta presentes en la resina.

En el caso de la eliminación de metales pesados, las resinas de intercambio iónico están diseñadas con grupos funcionales que tienen una alta afinidad por los iones de metales pesados presentes en el agua. Cuando el agua pasa a través de estas resinas, la resina retendrá los iones metálicos, mientras que los iones neutros o menos tóxicos contenidos en la resina se liberarán en el agua.

El proceso de intercambio iónico puede ser reversible o irreversible, dependiendo de la naturaleza de la resina y de los contaminantes presentes en el agua. Cuando la capacidad de intercambio de una resina se agota, generalmente debido a la saturación de metales pesados, la resina debe regenerarse o reemplazarse para restaurar su capacidad de intercambio.

El intercambio iónico es un método eficaz para eliminar metales pesados en aguas residuales debido a su selectividad y alta capacidad de eliminación. Sin embargo, este proceso puede resultar costoso, especialmente en términos de reciclaje del plástico y eliminación de los residuos generados durante el procesamiento. Además, la eficiencia del intercambio iónico puede verse afectada por factores como el pH del agua, la concentración de contaminantes y la presencia de otros iones que compiten por los sitios de intercambio en la resina.[21]

2.2.3 Adsorción

La adsorción es un proceso en el que los contaminantes presentes en el agua, como los metales pesados, se adhieren a la superficie de un material sólido, llamado adsorbente, sin que se produzca una reacción química entre ellos. En este proceso, los contaminantes se acumulan en la superficie del adsorbente por la acción de fuerzas físicas, como las fuerzas de Van der Waals, interacciones electrostáticas y enlaces de hidrógeno[22].

En el caso de la eliminación de metales pesados, los adsorbentes más comúnmente utilizados incluyen el carbón activado, zeolitas, arcillas modificadas, perlas de sílice y materiales orgánicos como plantas o desechos lignocelulósicos e inorgánicos con alta capacidad de adsorción. Estos materiales tienen una estructura porosa que proporciona una gran área superficial y sitios de unión para los metales pesados presentes en el agua.

La adsorción es un método efectivo para la eliminación de metales pesados debido a su alta capacidad de remoción y su capacidad para operar en una amplia gama de condiciones de pH y temperatura. Además, este proceso se puede utilizar en aguas residuales industriales y municipales.

Sin embargo, es importante señalar que la eficiencia de la adsorción puede verse afectada por factores como la concentración de contaminantes en el agua, el tamaño de las partículas del adsorbente, la temperatura y la presencia de otros compuestos en el agua que pueden competir por los sitios de adsorción. Además, una vez que el adsorbente se satura con contaminantes, debe regenerarse o reemplazarse, lo que puede generar costos adicionales para el tratamiento del agua[23].

Los principales adsorbentes utilizados en este proceso son[21]:

- **Carbón activado:** es un adsorbente muy efectivo para la eliminación de diferentes componentes orgánicos e inorgánicos presentes en las aguas residuales, ya que consta de unas áreas superficiales porosas que van desde los 500 a los 1500 m²/g, también dispone de la presencia de un amplio espectro de superficie funcional que la hace accesible a diferentes reactivos.

- **Nanotubos de carbono:** surgen como un nuevo tipo de adsorbentes debido a su gran capacidad para la eliminación de diferentes contaminantes inorgánicos y orgánicos, y radionucleidos a partir de grandes volúmenes de aguas residuales.

2.2.4 Filtración con membranas

La filtración por membrana es un proceso de tratamiento de aguas residuales que implica el uso de membranas semipermeables para eliminar los contaminantes del agua, incluidos metales pesados, sólidos suspendidos, microorganismos y compuestos orgánicos. Estas membranas permiten selectivamente el paso de ciertos componentes del agua mientras retienen contaminantes no deseados[24].

Hay varios tipos de membranas utilizadas en este proceso, como microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa entre otras. que varían en el tamaño de los poros y la capacidad de retención de contaminantes[25].

- **La microfiltración:** retiene partículas sólidas suspendidas y microorganismos, pero permite el paso de solutos y moléculas más grandes.

- **La ultrafiltración:** retiene partículas más pequeñas que la microfiltración, incluidos algunos virus y macromoléculas.

- **La nanofiltración:** retiene iones y compuestos orgánicos de tamaño mediano, así como algunos metales pesados y contaminantes.

- **La ósmosis inversa:** es el método más selectivo porque retiene prácticamente todas las partículas e iones presentes en el agua, incluidos los metales pesados, las sales y los compuestos orgánicos.

- **La electrodiálisis:** se utiliza un campo eléctrico constante con el fin de eliminar metales pesados en aguas residuales con el uso de membranas permeables. Esta técnica tiene la capacidad de remover iones contaminantes cargados de hasta 0,0001 µm, mediante hojas o laminas porosas de resinas de intercambio iónico con una baja permeabilidad relativa para el agua.

La filtración por membrana ofrece varias ventajas, como una alta eficiencia de eliminación de contaminantes, un bajo consumo de productos químicos y la capacidad de operar a bajas presiones. Además, el proceso es adecuado para tratar aguas residuales de diversas fuentes, incluidas agua salobre y agua de mar.

Sin embargo, la filtración por membrana puede ser costosa en términos de inversión inicial y mantenimiento, especialmente para la ósmosis inversa, debido al alto consumo de energía y la necesidad de reemplazo de membrana. Además, el pretratamiento adecuado del agua, para evitar la contaminación de la membrana debido a sólidos suspendidos y bioincrustaciones, es fundamental para garantizar un funcionamiento eficiente y prolongar la vida útil de la membrana.

2.2.5 Coagulación y Floculación.

La coagulación-floculación es un proceso utilizado en el tratamiento de aguas residuales para eliminar contaminantes, incluidos metales pesados, partículas suspendidas y compuestos orgánicos. Implica la adición de productos químicos de coagulación seguida de floculación, en la que se forman grumos o grumos más grandes para facilitar la eliminación de contaminantes mediante sedimentación o filtración.

El proceso de coagulación implica agregar un coagulante, como sulfato de aluminio, cloruro férrico o cloruro de polialuminio, al agua residual. Estos coagulantes contrarrestan la carga de partículas

coloidales y contaminantes disueltos presentes en el agua, favoreciendo su aglomeración y formación de agregados de mayor tamaño.

Después de la coagulación, se realiza la floculación, en la que se agita suavemente el agua para facilitar la asociación de las partículas de coagulación y la formación de agregados más grandes y pesados. Esto se logra agregando un coagulante polimérico, como la poliacrilamida, que ayuda a unir y estabilizar los agregados suspendidos.

Una vez formados los grumos, el agua se somete a un proceso de sedimentación o filtración para separar los grumos del agua clara. En el caso de la sedimentación, los trozos más pesados se depositan en el fondo del tanque de sedimentación, mientras que en la filtración, los trozos son retenidos por un material filtrante, como arena o membrana, mientras el agua limpia pasa a través de ellos.

La coagulación-floculación es un proceso eficaz y ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales debido a su capacidad para eliminar una variedad de contaminantes y mejorar la claridad del agua. Sin embargo, es importante ajustar con precisión el coagulante y las dosis de coagulante, así como controlar los tiempos de mezcla y sedimentación para garantizar la eliminación efectiva de contaminantes y minimizar la formación de lodos. Además, la selección de coagulantes y coagulant apropiados debe considerar factores como el tipo y concentración de contaminantes presentes en el agua, así como las características del proceso de tratamiento[26].

2.2.6 Fitorremediación

La fitorremediación es un enfoque para el tratamiento de aguas residuales y suelos contaminados que utiliza plantas para eliminar, descomponer o revitalizar los contaminantes del medio ambiente. Este método aprovecha la capacidad natural de ciertas plantas, conocidas como plantas hiperacumuladoras o fitorestauradoras, para absorber y acumular metales pesados, compuestos orgánicos, nutrientes y otros contaminantes en sus tejidos.

El proceso de fitorremediación implica cultivar ciertas plantas en suelo o agua contaminados durante un período de tiempo. Durante el crecimiento de las plantas, los contaminantes se absorben a través de las raíces y se transportan a través del sistema radicular hasta las partes aéreas de la planta, donde se acumulan en los tejidos de la planta o se descargan a través de los estomas.

Las plantas utilizadas en fitorremediación se seleccionan por su tolerancia a altas concentraciones de contaminantes y su capacidad para acumular contaminantes en cantidades significativas. Algunos hiperacumuladores pueden almacenar metales pesados como arsénico, cadmio, cromo, plomo y mercurio en los tejidos en concentraciones mucho más altas que los no hiperacumuladores.

Una vez que los contaminantes se acumulan en el tejido vegetal, se pueden recolectar y eliminar de los sitios contaminados, lo que permite la eliminación controlada de contaminantes del medio ambiente. Dependiendo de la naturaleza y el alcance de la contaminación, este proceso puede requerir varias cosechas sucesivas para reducir significativamente los contaminantes en el suelo o el agua.

La fitorremediación ofrece múltiples ventajas, incluida una tecnología ambientalmente sostenible y de bajo costo, y la idoneidad para su uso en áreas contaminadas que son difíciles de tratar con métodos tradicionales. Sin embargo, este método puede tardar mucho en producir resultados significativos y puede no ser adecuado para todos los tipos de contaminación. Además, al implementar la fitorremediación, es importante considerar la posible redistribución de contaminantes ambientales y los posibles efectos negativos sobre la salud humana y los ecosistemas[27].

2.3 Electrocoagulación

El tratamiento de aguas residuales contaminadas con metales pesados ha sido probado con diferentes tipos de metodologías, que incluyen fenómenos biotecnológicos, de intercambio iónico, adsorción, ultrafiltración, ósmosis inversa y precipitación química.

En alguno de estos métodos se han visualizado una serie de problemas en su aplicación ya que presentan ciertas limitaciones en el momento de extracción de estos metales de los lodos obtenidos en procesos industriales, concretamente en el proceso de separación de los contaminantes en la etapa sólida.

Por otro lado, la microfiltración, ultrafiltración y la ósmosis inversa no son muy viables para las pequeñas empresas ya que el consto del proceso es muy elevado al igual que ocurre con el intercambio iónico donde las resinas presentan precios altos.

Aquí es donde aparece el papel de la electrocoagulación dónde se utilizan los principios de la electroquímica, coagulación y flotación o precipitación, los contaminantes del agua son eliminados mediante el uso de electrodos (cátodos y ánodos) ya que por la aplicación de un potencial de energía se genera un coagulante, el cual realiza la coagulación in situ, este proceso tiene una gran eficacia en la eliminación de metales pesados disminuyendo la formación de residuos secundarios provocando un menor impacto ambiental.

El proceso de electrocoagulación esta sufriendo una gran cantidad de investigaciones ya que las publicaciones sobre este método han aumentado de forma considerable en las últimas décadas.

A continuación aparece un gráfico haciendo referencia a este considerable aumento

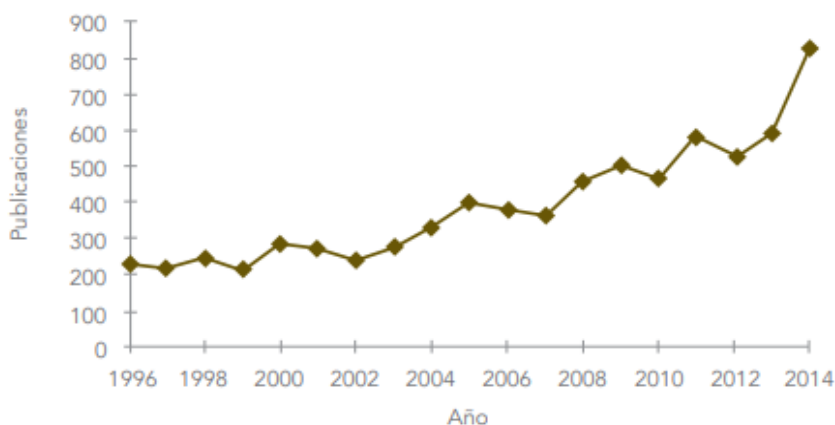


Figura 2-1 Aumento de publicaciones sobre electrocoagulación(tomada de[28])

Dado la semejanza de este método con la coagulación es importante tener en cuenta que la electrocoagulación es mucho más eficaz ya que los cationes producidos tienen mayores porcentajes de remoción frente a sustancias químicas clásicas como el sulfato de aluminio o hierro.

Además del uso de equipos pequeños es posible tener costos altos de funcionamiento, automatización y menor generación de residuos y sales, también cabe la posibilidad de crear equipos propios para llevarlo a cabo en el laboratorio.

Este tipo de tecnología requiere el uso de un reactor de electrocoagulación, es decir una celda electrolítica cuyos elementos conductores de corriente (cátodos y ánodos) son introducidos en el agua a tratar la cual tiene los contaminantes y metales a eliminar. Los reactores se pueden encontrar en modo continuo o discontinuo.

El funcionamiento de este reactor depende de una fuente externa de energía eléctrica para que se produzcan las reacciones electroquímicas debido al flujo de electrones entre los electrodos metálicos y los compuestos presentes en el efluente, produciendo procesos de reducción en el cátodo (conversión de los protones del agua en hidrógeno), y los de oxidación en el ánodo, que origina iones metálicos y oxígeno, este último procede de la hidrólisis del agua. Cuando esto sucede, los contaminantes originan componentes de carácter hidrofóbico que se precipitan o flotan haciendo más sencilla su remoción por algún método de separación secundario.

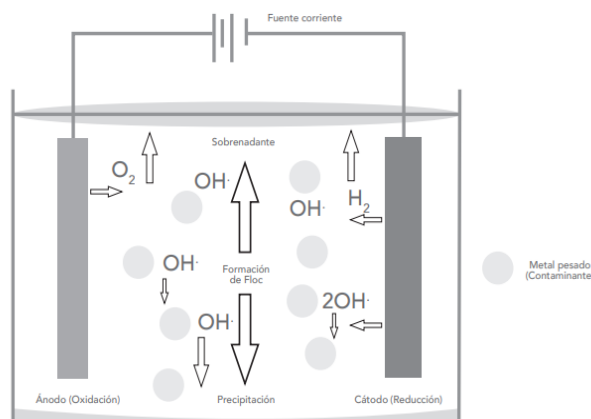


Figura 2-2 Mecanismo de electrocoagulación en agua contaminada con un metal pesado (tomada de [28])

Las diferentes especies coaguladas e hidróxidos metálicos puede ser formadas como resultado de la presencia de iones metálicos con un pH apropiado que da lugar a la desestabilización, precipitación y eliminación de los metales pesados.

Los metales pesados más estudiados son: arsénico, hierro, níquel, cobre, zinc, plomo, cadmio, mercurio entre otros, siendo los electrodos más comunes en los procesos de electrocoagulación aluminio (Al^{3+}) y hierro (Fe^{2+}), en los cuales se han visto que presentan grandes porcentajes de remoción [28].

2.3.1 Procesos físico-químicos que intervienen

En los reactores de electrocoagulación, se producen diferentes procesos electroquímicos y físico-químicos que permiten la eliminación de contaminantes y de metales pesados, de las aguas residuales. Estos procesos incluyen [29]:

Ionización de los electrodos

Al aplicar una corriente eléctrica al reactor, los electrodos (generalmente de hierro o aluminio) se ionizan. En el electrodo anódico (positivo), se produce la oxidación, expulsando iones de metal y formando iones de hidrógeno. En el electrodo catódico (negativo), se produce la reducción, liberando hidroxilos y generando iones de hidróxido.

Formación de especies químicas activas

La corriente eléctrica da lugar a la liberación de iones metálicos (Fe^{2+} o Al^{3+}) del electrodo anódico y la generación de hidroxilos metálicos ($\text{Fe}(\text{OH})_3$ o $\text{Al}(\text{OH})_3$) en el electrodo catódico. Estos elementos químicos son muy reactivos por lo que tienen el papel de coagulantes y floculantes para agarrar partículas y contaminantes en suspensión.

Coagulación-Floculación	Los hidróxidos metálicos resultantes reaccionan con los contaminantes presentes en el agua, y con los metales pesados, dando lugar a floculantes no solubles. Estos floculantes atrapan las partículas y los contaminantes disueltos en el agua, originando flóculos de mayor tamaño para aumentar la facilidad de separación del agua
Adsorción y precipitación	Además de la coagulación y la floculación, los metales pesados pueden ser adsorbidos o precipitados en los floculantes originados en el proceso de electrocoagulación. Esto permite suprimir de forma eficiente los metales pesados del agua tratada, ya sea atrapándolos en la matriz del flóculo o precipitándolos como compuestos no solubles.
Separación de sólidos y líquidos	Cuando se originan los flóculos, el agua tratada sufre un proceso de sedimentación o flotación para separar los sólidos (flóculos cargados con contaminantes) del líquido claro, obteniendo finalmente un efluente tratado con una alta reducción de la concentración de metales pesados.

Tabla 2-3 Procesos físico-químicos que intervienen(tomada de[29])

2.3.2 Factores que afectan a la electrocoagulación

son muchos los factores que afectan a este proceso pero los principales son[30]:

pH	El pH afecta a la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal con el fin de formar hidróxido y cambia durante el proceso de electrocoagulación debido a su dependencia al material del que este hecho los electrodos y del pH inicial del agua a tratar , en aguas residuales donde la acidez es alta el pH aumenta y en aguas alcalinas este se ve reducido. Las mejores remociones las obtenemos con pH cercanos a 7
Densidad de la corriente	El suministro de corriente al sistema determina la cantidad de iones Al^{3+} y Fe^{2+} que expulsan los electrodos, cuanto mayor es la densidad de la corriente mejor es la eficiencia de la remoción y mayor el consumo de energía, pero un exceso de densidad de corriente daría lugar a una disminución de la eficacia
Conductividad	Su incremento provoca un aumento de la densidad de corriente, además la adición de algunos electrolitos como NaCl o $CaCl_2$ dan lugar a un incremento de la conductividad del agua residual.
Temperatura	Los efectos de la temperatura en este proceso han sido poco estudiados, pero si se ha demostrado que la eficiencia del proceso se hace máxima a unos 60°C, a partir de esa temperatura se produce una considerable disminución de la eficiencia

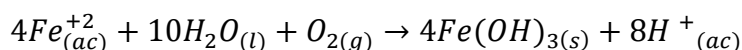
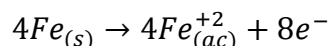
Tabla 2-3 Factores que afectan a la electrocoagulación (tomada de[30])

2.3.3 Reacciones químicas que intervienen

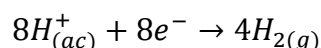
Los materiales mas empleados a la hora del desarrollo de los electrodos son el hierro y el aluminio, según el tipo de contaminantes metálicos ocurrirán diferentes tipos de reacciones, a continuación expondré las que se producen por los electrodos[29].

- Formación del hidróxido férrico

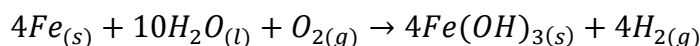
En el ánodo ocurren las siguientes reacciones:



En el cátodo:

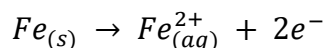


Reacción global:

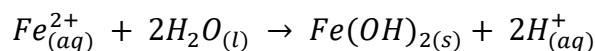


- Formación de hidróxido ferroso:

Primero se produce la oxidación del hierro, es decir el hierro metálico se oxida a iones de hierro ferroso (Fe^{2+}) bajo la acción de la corriente eléctrica:



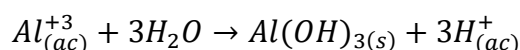
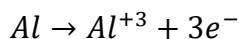
Segundo se produce la reacción con el agua, los iones de hierro ferroso reaccionan con las moléculas de agua de la solución para generar hidróxido ferroso y expulsar iones de hidrógeno:



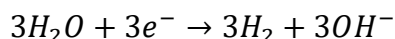
Estas reacciones dan lugar a la formación de hidróxido ferroso ($Fe(OH)_2$) en el ánodo. El hidróxido ferroso es un compuesto químico insoluble que se precipita en forma de sólido gelatinoso, lo que favorece al proceso de coagulación y floculación al atrapar partículas y contaminantes presentes en el agua tratada. Los iones de hidrógeno liberados en la segunda reacción pueden favorecer a reducir el pH del medio, lo que también puede influir en la coagulación y la precipitación de contaminantes.

Tras la formación de los hidróxidos de hierro los coloides se aglomeran, sobre todo aquellos con carga negativa y posteriormente otras partículas de contaminantes interactúan con estos aglomerados, siendo removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas.

Cuando el aluminio actúa como ánodo, ocurren las siguientes reacciones:



Mientras en el cátodo ocurre la siguiente reacción:



Los iones OH^{-} en combinación con los Al^{3+} reaccionan para dar lugar a diferentes especies monoméricas y poliméricas que por procesos de precipitación forman $Al(OH)_3$, como podemos ver en la reacción del ánodo, esta sustancia es amorfa y gelatinosa, la cual tiene un gran área superficial con propiedades absorbentes, siendo esencial en los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes[30].

2.3.4 Diseño y tipo de reactores mas utilizados

El diseño de reactores es un proceso esencial al construir un reactor, y su objetivo principal es convertir los reactivos en productos de la manera más eficiente posible. Cuando se planifica un proceso que involucra una reacción química, es crucial determinar el tipo y tamaño del reactor, así como las condiciones de operación más adecuadas para lograr el objetivo deseado.

Inicialmente, el diseño de reactores se puede clasificar en dos categorías principales: reactor tipo Batch y reactor de sistema continuo. Después de esta primera etapa de selección, se pueden considerar dos tipos de reactores específicos para la electrocoagulación: los reactores de solo coagulación y los reactores de coagulación y flotación.

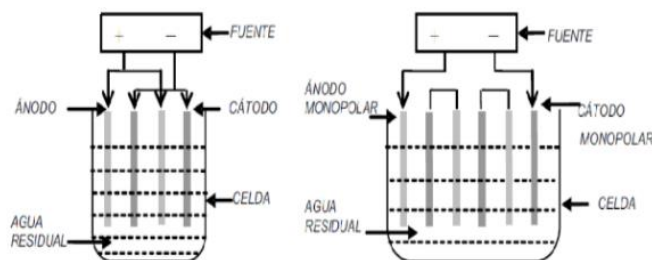


Figura 2-3 Reactor tipo batch (tomada de[29])

Los reactores de solo coagulación son aquellos que no aprovechan la electrocoagulación para generar burbujas que separen los agregados (flóculos) del contaminante por flotación. Por otro lado, los reactores de coagulación y flotación hacen uso de las burbujas generadas durante la electrocoagulación para facilitar la flotación de los agregados del contaminante.

Al seleccionar un reactor para la electrocoagulación, se deben tomar en cuenta tres decisiones clave. Primero, se decide si el reactor será tipo batch o continuo. Luego, se evalúa el desempeño generado por las burbujas electrolíticas. Finalmente, se eligen los métodos de separación, que pueden incluir centrifugación, filtración o clarificación.

La siguiente figura proporciona una clasificación visual del diseño de reactores para el proceso de electrocoagulación[29].

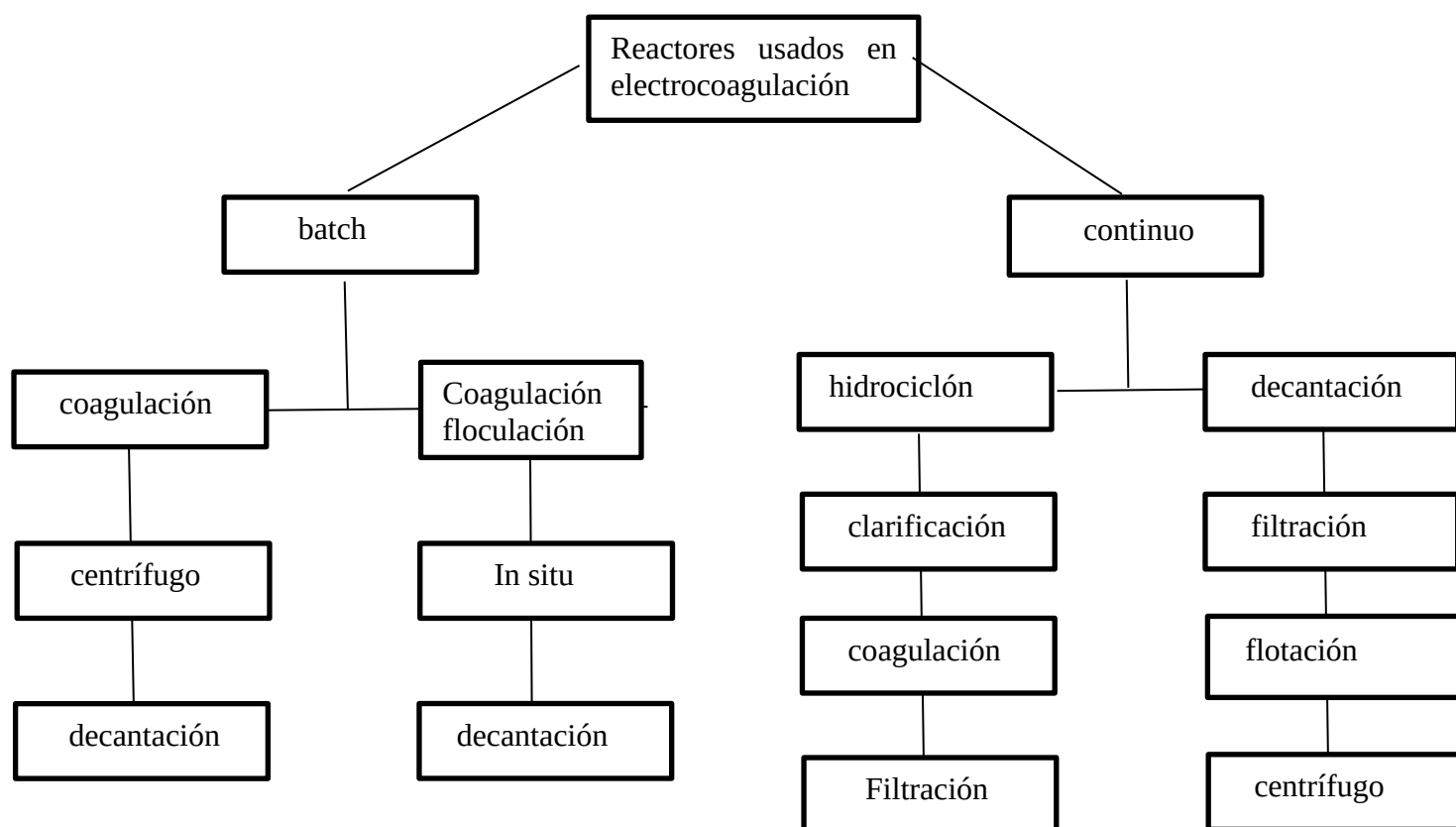


Figura 2-4 Tipos de reactores y métodos de separación

2.3.5 Ventajas y desventajas de la electrocoagulación

La electrocoagulación presenta una serie de ventajas e inconvenientes en comparación con otros métodos, sobre todo en el marco de eliminación de metales pesados.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Bajo costo	Es necesario llevar a cabo un mantenimiento de los electrodos
Equipos simples y fácil operación	Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, depende del material del electrodo de sacrificio utilizado.
No requiere almacenamiento ni productos químicos	Puede ser un tratamiento de alto coste en países donde el costo de energía eléctrica es elevado.
Se producen lodos más compactos y de menor cantidad, por lo que hay menos problemas con su disposición	El óxido generado en el ánodo puede formar una capa que evite el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso.
Se generan flóculos de mayor tamaño que los producidos en la coagulación y poseen menos agua ligada	
Gran efectividad en la remoción de diferentes contaminantes	
Purificación del agua permitiendo su reciclaje	
La corriente eléctrica permite el movimiento de las partículas mas pequeñas, favoreciendo la coagulación	
El agua tratada por electrocoagulación tiene menor cantidad de sólidos disueltos que las tratadas con productos químicos, disminuyendo los costes de los tratamientos de estos efluentes si son reusados.	
Se producen 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.	

Tabla 2-4 Ventajas y desventajas de la electrocoagulación (tomada de[30])

2.3.6 Principales aplicaciones de la electrocoagulación

La electrocoagulación, un proceso químico con múltiples aplicaciones, es ampliamente utilizado en diversas áreas en la actualidad. A continuación, se enumerarán las principales aplicaciones de este proceso[31]:

- **Tratamiento de aguas residuales:** La electrocoagulación se ha empleado con éxito en la remoción de diversos tipos de aguas residuales. En muchos casos, se combina esta técnica con la flotación promovida por electrólisis, conocida como electroflotación, con el objetivo de aumentar la eficiencia en la eliminación de contaminantes. Esta combinación se lleva a cabo ya sea en una sola celda o en celdas consecutivas.

Una de las aplicaciones más destacadas y extendidas de la electrocoagulación es su uso en el tratamiento de aguas residuales generadas por la industria de galvanoplastia y electroplateado metálico. Este proceso tiene como objetivo principal la eliminación de metales solubles presentes en las descargas industriales, contribuyendo así a reducir la contaminación ambiental producida por estas industrias altamente contaminantes.

- **Potabilización del agua:** La electrocoagulación ofrece varias ventajas en el tratamiento del agua para consumo humano, entre las que se incluyen su eficacia en la eliminación de una amplia gama de contaminantes, su bajo costo operativo y su capacidad para funcionar como una alternativa sostenible a los métodos convencionales de potabilización del agua. Además, este método es altamente adaptable y puede ser implementado en diferentes escalas, desde sistemas de tratamiento a pequeña escala para comunidades rurales hasta plantas de potabilización de agua a gran escala para abastecer a áreas urbanas densamente pobladas

- **Efluentes industriales:** La electrocoagulación es empleada en diferentes ramas de la industria, tales como la metalúrgica, la mecánica, alimentaria, textil. Estas industrias generan una variedad de efluentes contaminados con compuestos orgánicos, metales pesados, colorantes y otros contaminantes. La electrocoagulación ofrece una solución eficaz para tratar estos efluentes y reducir su carga contaminante antes de su descarga al medio ambiente.

- **Remediación de suelos contaminados:** La remediación de suelos contaminados es crucial para restaurar la calidad del suelo y prevenir la contaminación del agua subterránea. La electrocoagulación ha surgido como una técnica efectiva en este proceso, especialmente en la eliminación de contaminantes como metales pesados, hidrocarburos y otros compuestos tóxicos.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Metodología

El presente estudio se centra en la evaluación experimental del proceso de electrocoagulación para la remoción de metales pesados del agua. Este proceso se ha convertido en una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas contaminadas debido a su eficacia y bajo impacto ambiental. En esta investigación, se llevaron a cabo dos partes experimentales con el objetivo de comprender mejor los efectos de la electrocoagulación en la remoción de metales en diferentes condiciones.

En la primera parte del experimento, se contaminó agua en vasos de precipitados con cada metal por separado en diferentes periodos de tiempo, desde los 5 minutos hasta los 30 minutos para observar cómo variaba la tasa de remoción de los metales y determinar la eficiencia del proceso

En la segunda parte del experimento, se diseñó una celda experimental para la contaminación controlada del agua con la presencia de tres metales diferentes. Posteriormente, el agua contaminada fue sometida a tratamientos durante diferentes períodos de tiempo y se varió el pH del medio para evaluar su impacto en la remoción de metales. Este enfoque permitió investigar cómo factores como la presencia simultánea de varios metales y el ajuste del pH pueden influir en la eficacia del proceso de remoción

3.1.1 Flujo de trabajo

A continuación expondré un diagrama de flujo dónde reflejaré cada uno de los pasos que se siguen para llevar a cabo este experimento y que tenga un sentido lógico para facilitar su entendimiento

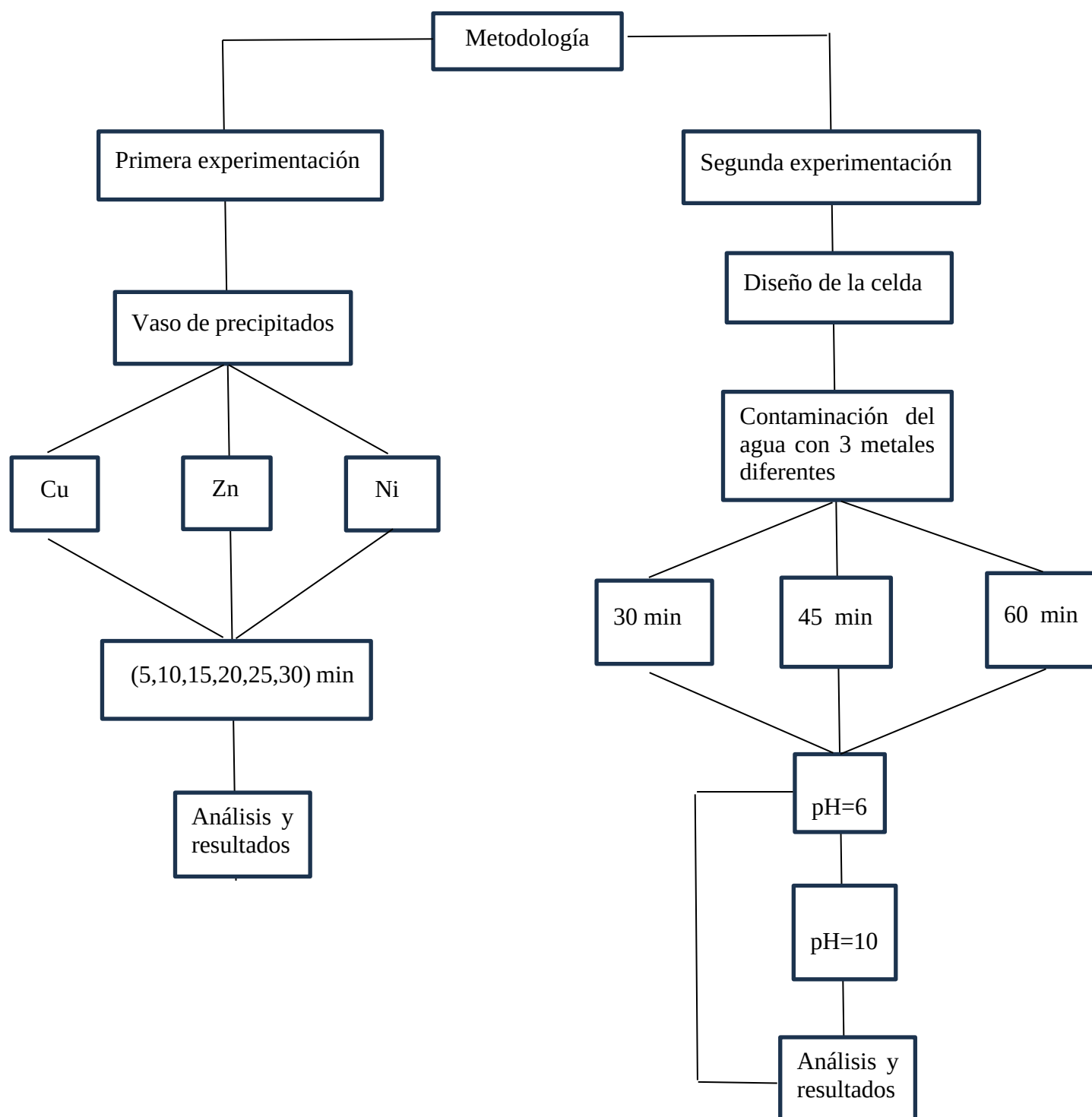


Figura 3-1 Flujo de trabajo

3.1.2 Diseño de la celda

Para la construcción de la celda de electrocoagulación, se consideraron varios factores importantes que influyen en la eficiencia y el funcionamiento del proceso. Aquí se detallan estos factores:

- **Material de la celda:** Se optó por utilizar una caja de plástico debido a su bajo costo, facilidad de obtención y su naturaleza aislante, lo que garantiza que no interfiera en el proceso de electrocoagulación.

- **Dimensiones de la celda:** La cubeta seleccionada tiene unas dimensiones de 33x19x10 cm, lo que resulta en un volumen total de 5 litros. Sin embargo, se decidió llenar la celda solo hasta los 4 litros, ya que durante el proceso de electrocoagulación se forman sólidos suspendidos que ocupan espacio adicional.

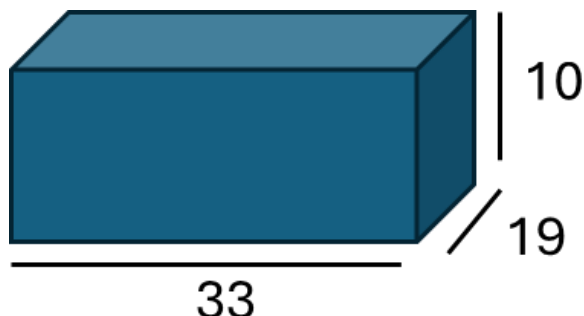


Figura 3-2 Cubeta utilizada

- **Material y dimensiones de los electrodos:** Los electrodos elegidos son de aluminio y acero, con dimensiones de 7x15 cm y un espesor despreciable. Estos materiales son comunes y ofrecen buenas propiedades conductoras para facilitar el proceso electroquímico.

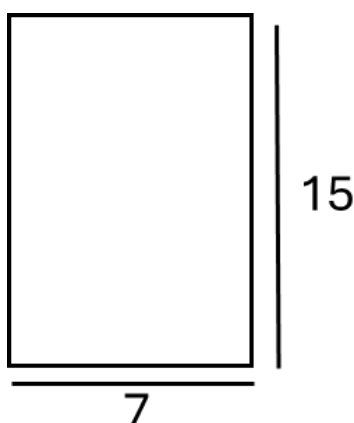


Figura 3-3 Electrodos usados

- **Disposición de los electrodos:** Se dispusieron seis electrodos en la celda, teniendo en cuenta las dimensiones de la caja. Estos electrodos se colocaron de forma alterna según su material y en parejas, con un espacio de 5 cm entre los electrodos de la misma pareja y de 10 cm entre parejas adyacentes. Además, se fijaron los electrodos a un corcho rígido para mantenerlos estables durante el proceso. Esta configuración de la celda y los electrodos se diseñó cuidadosamente para maximizar la eficiencia de la electrocoagulación y garantizar un proceso de tratamiento de aguas residuales efectivo y controlado.

- **Fuente de alimentación:** se utiliza una fuente de alimentación eléctrica AC/DC TPR3003, regulada con una capacidad máxima de salida de 30 amperios y un rango de voltaje ajustable entre 0 y 30 voltios. Esto permitió controlar la cantidad de corriente eléctrica suministrada a los electrodos durante el proceso de electrocoagulación.

- **Medidor de pH, temperatura, conductividad:** Durante el experimento, se empleó un instrumento de monitoreo y control para supervisar las condiciones del proceso. Se utilizó un medidor de pH digital para monitorear y ajustar el pH de la solución en tiempo real. Además, se midió la conductividad eléctrica del agua antes y después del tratamiento electroquímico para evaluar la eficiencia del proceso. Estos instrumentos se integraron en un sistema de control automatizado que

permitía ajustar las condiciones del proceso según fuera necesario para optimizar la eficiencia de la electrocoagulación.



Figura 3-4 Medidor pH, temperatura y conductividad

3.1.3 Construcción del montaje completo

la celda se construyó mediante un arreglo monopolar en paralelo, para que la corriente eléctrica se reparta por todos los electrodos.

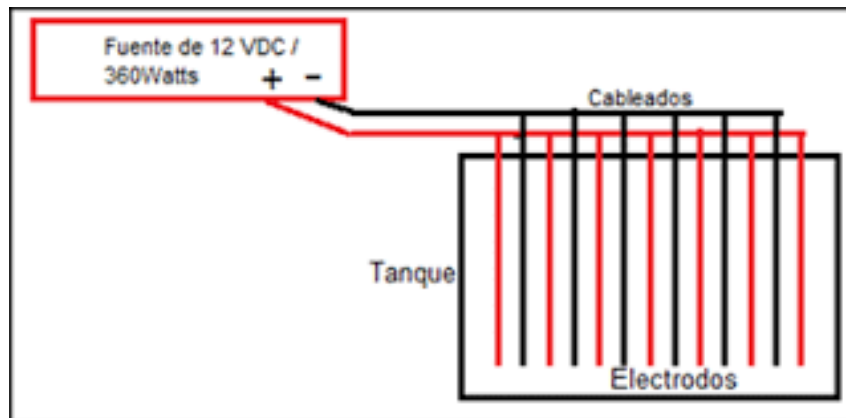


Figura 3-5 Configuración monopolar en paralelo (tomada de[32])

A continuación en la siguiente imagen se puede observar como quedó el montaje para la primera parte de nuestra experimento:

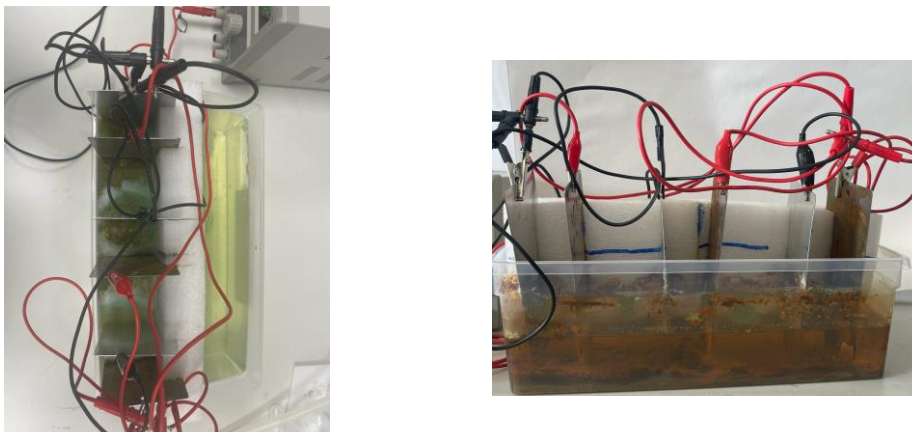


Figura 3-6 Montaje de la celda final

3.2 Contaminación del agua

Se comenzó con la preparación de los 4 litros de agua desionizada. Para garantizar la pureza del agua y minimizar la presencia de impurezas, se optó por el uso de agua desionizada, la cual se caracteriza por tener una concentración muy baja de iones y contaminantes.

Los 4 litros de agua desionizada fueron cuidadosamente medidos y vertidos en un matraz volumétrico de alta precisión. Este matraz proporcionó una capacidad suficiente para contener toda la cantidad de agua necesaria para la contaminación con los compuestos químicos. Los metales usados para contaminar el agua son el cobre, níquel y zinc pero estos no se consiguieron de forma pura por lo que se utilizaron compuestos químicos que contienen estos metales, a continuación describiré en profundidad cada uno de ellos y sus características mas importantes.

3.2.1 Cloruro de cobre (II) dihidratado

El cloruro de cobre (II) es un compuesto químico que consiste en los iones cobre(II) (Cu^{2+}) y cloruro (Cl^-). Se presenta como un sólido cristalino de color azul verdoso en su forma anhidra. Es ampliamente utilizado en diversas aplicaciones industriales y químicas debido a sus propiedades únicas. Cuando el cloruro de cobre(II) se disuelve en agua, forma una solución acuosa de color azul verdoso, principalmente debido a la presencia del ion cobre(II). Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta solución puede ser corrosiva y tóxica en concentraciones elevadas, lo que requiere precaución durante su manipulación.

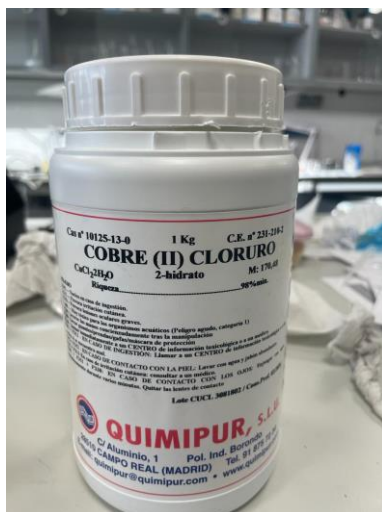


Figura 3-7 cobre(II) cloruro hidratado

En el contexto de la contaminación del agua, la presencia de cloruro de cobre(II) puede representar un riesgo para los organismos acuáticos y el ecosistema en general debido a la toxicidad del ion cobre(II). Por lo tanto, al contaminar el agua con cloruro de cobre(II), es fundamental asegurarse de utilizar concentraciones adecuadas y llevar a cabo un tratamiento adecuado del agua contaminada para mitigar cualquier impacto negativo en el medio ambiente[32].

3.2.2 Sulfato de zinc heptahidratado

El sulfato de zinc heptahidratado es una sal inorgánica que se encuentra en forma de cristales blancos o polvo. Su fórmula química es $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, lo que indica que cada molécula de sulfato de zinc está combinada con siete moléculas de agua. Este compuesto es altamente soluble en agua y se utiliza en una variedad de aplicaciones industriales y químicas. En cuanto a sus características importantes, el sulfato de zinc heptahidratado presenta una alta solubilidad en agua, liberando iones de zinc (Zn^{2+}) y iones de sulfato (SO_4^{2-}) en la solución acuosa. Es utilizado en numerosas aplicaciones industriales y químicas,

como la fabricación de productos químicos, la galvanización, la producción de pigmentos, medicamentos y suplementos nutricionales para la agricultura.

Desde el punto de vista de la toxicidad, es fundamental tener precaución al manipular el sulfato de zinc, ya que puede ser tóxico en concentraciones elevadas. La ingestión o inhalación de grandes cantidades puede causar irritación gastrointestinal y otros efectos adversos para la salud. Por ello, es necesario manejarlo con cuidado y seguir las medidas de seguridad adecuadas.

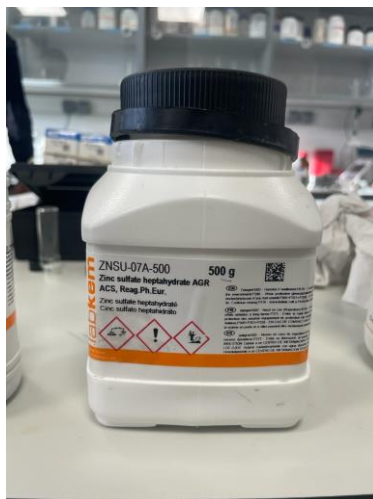


Figura 3-8 Sulfato de zinc heptahidratado

En el contexto de la contaminación del agua, el sulfato de zinc heptahidratado puede representar una fuente de contaminación química. Por lo tanto, es esencial manipularlo y disponer de él de manera responsable para evitar cualquier impacto negativo en el medio ambiente y en la salud humana[33].

3.2.3 Nitrato de níquel (II) hexahidratado

El nitrato de níquel(II) hexahidratado es una sal inorgánica que se presenta en forma de cristales verdes o en polvo. Su fórmula química es $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, lo que indica que cada molécula de nitrato de níquel(II) está combinada con seis moléculas de agua. Este compuesto es soluble en agua y se utiliza en diversas aplicaciones industriales y químicas. En cuanto a sus características importantes, el nitrato de níquel(II) hexahidratado presenta una buena solubilidad en agua, lo que significa que se disuelve fácilmente en soluciones acuosas. Se utiliza en la fabricación de productos químicos, en la industria galvanoplastia, en la producción de catalizadores y en la síntesis de compuestos orgánicos.

Es importante tener en cuenta que el nitrato de níquel(II) hexahidratado puede ser tóxico en altas concentraciones y debe manejarse con cuidado. La exposición prolongada o la inhalación de polvo de nitrato de níquel pueden causar irritación en la piel, los ojos y las vías respiratorias. Por lo que se recomienda utilizar equipo de protección personal, como guantes y gafas de seguridad, al manipularlo. En el contexto de la contaminación del agua, el nitrato de níquel(II) hexahidratado puede representar una fuente de contaminación química. Por lo tanto, es esencial manipularlo y disponer de él de manera adecuada para evitar cualquier impacto negativo en el medio ambiente y en la salud humana.

En el contexto de la contaminación del agua, el nitrato de níquel(II) hexahidratado puede representar una fuente de contaminación química. Por lo tanto, es esencial manipularlo y disponer de él de manera adecuada para evitar cualquier impacto negativo en el medio ambiente y en la salud humana[34].



Figura 3-9 Nitrato de níquel (II) hexahidratado

3.2.4 Concentración inicial de los contaminantes

Se optó por tomar una cantidad de metal como referencia para cada uno de los contaminantes que se utilizarían en el experimento: nitrato de níquel(II) hexahidratado, sulfato de zinc heptahidratado y cloruro de cobre(II).

Cada cantidad de metal de referencia obtenida de estudios realizados previamente se seleccionó cuidadosamente y se determinó con precisión, utilizando técnicas de pesaje de alta precisión. Estas cantidades de metal se consideraron como referencia estándar para cada contaminante, asegurando que la cantidad introducida en el agua de muestra fuera precisa y controlada. [35]

Una vez establecidas las cantidades de metal de referencia para cada contaminante, se procedió a calcular la cantidad necesaria de cada uno que debía ser introducida en el agua de muestra. Este cálculo se realizó teniendo en cuenta la concentración deseada en la muestra final y el volumen total de agua disponible para el experimento. Se aplicaron principios de estequiometría y relaciones de proporcionalidad para ajustar las cantidades de contaminantes según las proporciones establecidas por las cantidades de metal de referencia.

A continuación se muestran las concentraciones de metal puro usadas :

Metal puro	Concentración (g/L)
Cu	125,788
Ni	204,03
Zn	42,297

Tabla 3-1 Concentraciones de referencia de cada uno de los metales (tomada de[35])

Para la realización correcta de los cálculo estequiométricos se tienen en cuenta los siguientes datos:

- **Masa molar de cada compuesto:** Se determinó la masa molar de cada uno de los compuestos químicos utilizados como referencia para la contaminación del agua. Esto incluye el nitrato de níquel(II) hexahidratado, el sulfato de zinc heptahidratado y el cloruro de cobre(II). La masa molar es crucial para convertir las cantidades de sustancia en masa y viceversa, lo que facilita los cálculos estequiométricos.

Compuesto	Masa molar
Cloruro de cobre (II) 2-hidrato	170,48
Sulfato de zinc heptahidratado	285,58
Nitrato de níquel (II) hexahidratado	288,81

Tabla 3-2 Masa molar de los compuestos

• **Volumen de agua de muestra:** Se conoció el volumen total de agua que se utilizó como muestra en nuestros dos experimentos, para el primero un litro y para el segundo 4 litros . Estos dato fueron fundamentales para calcular las concentraciones finales de los contaminantes en la solución de agua, ya que proporciona el volumen en el que se diluirán los compuestos.

• **Masa molar de cada metal:** Estas masas molares son esenciales para calcular las cantidades exactas de cada metal que se deben agregar al agua de muestra durante el experimento.

Metal	Masa molar (g/mol)
Cu	63,55
Ni	56,69
Zn	65,38

Tabla 3-3 Masa molar de cada metal

Una vez teniendo estos datos se pasaron a realizar los cálculos correspondientes para obtener las cantidades apropiadas para la primera experimentación es decir en un litro de agua.

- Cloruro de cobre (II) 2-hidratado

$$125,788 \frac{mg}{L} \times \frac{1L}{1L} \times \frac{170,48g/mol}{63,55g/mol} \times \frac{1g}{1000mg} = 0,337g$$

- Sulfato de zinc heptahidratado

$$42,297 \frac{mg}{L} \times \frac{1L}{1L} \times \frac{285,58g/mol}{65,38g/mol} \times \frac{1g}{1000mg} = 0,1845g$$

- Nitrato de níquel (II) hexahidratado

$$204,03 \frac{mg}{L} \times \frac{1L}{1L} \times \frac{288,81g/mol}{56,69g/mol} \times \frac{1g}{1000mg} = 1,03g$$

Y para la segunda experimentación :

- Cloruro (II) de cobre 2-hidrato

$$125,788 \frac{mg}{L} \times \frac{4L}{1L} \times \frac{170,48g/mol}{63,55g/mol} \times \frac{1g}{1000mg} = 1,349g$$

- Sulfato de zinc heptahidratado

$$42,297 \frac{mg}{L} \times \frac{4L}{1L} \times \frac{285,58g/mol}{65,38g/mol} \times \frac{1g}{1000mg} = 0,738g$$

- Nitrato de níquel (II) hexahidratado

$$204,03 \frac{mg}{L} \times \frac{4L}{1L} \times \frac{288,81g/mol}{56,69g/mol} \times \frac{1g}{1000mg} = 4,15g$$

Una vez que hemos realizado los cálculos necesarios, procedemos a la preparación de nuestra muestra. En primer lugar, preparamos nuestro matraz con el agua desionizada, asegurándonos de utilizar un recipiente limpio y adecuado para contener la muestra.

Luego, con cuidado y precisión, introducimos las cantidades calculadas de los compuestos previamente determinados. Siguiendo los pasos detallados en nuestros cálculos, agregamos el cloruro de cobre(II), el sulfato de zinc y el nitrato de níquel hexahidratado al matraz.

Una vez que todos los compuestos están en el matraz, procedemos a agitar la solución vigorosamente. Esta etapa es crucial para garantizar una mezcla homogénea y eficaz, asegurándonos de que todos los compuestos estén completamente disueltos en el agua desionizada.

Con nuestra muestra lista y bien mezclada, la transferimos cuidadosamente a la caja de plástico que servirá como nuestra celda para el proceso de electrocoagulación. Este paso marca el inicio de nuestra experimentación, donde pondremos a prueba la eficacia de este método en la eliminación de iones de metales pesados en aguas residuales.

3.3 Inicio de la primera experimentación

La primera etapa de nuestro experimento consistió en la contaminación de un litro de agua desionizada en un vaso de precipitado, con la particularidad de que se llevó a cabo tres veces, una vez con cada metal por separado. Para lograr esto, se colocaron dos electrodos en el vaso de precipitado y se estableció un montaje en serie. Posteriormente, se conectó la fuente de alimentación a una intensidad de 0,4 amperios y un voltaje de 60 voltios, y se mantuvo el proceso en funcionamiento durante un período de 30 minutos.

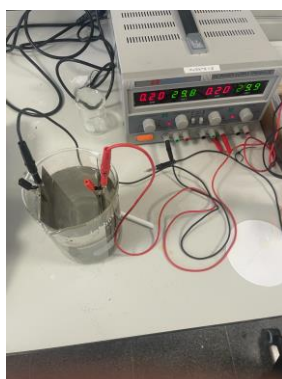


Figura 3-10 Montaje primera experimentación

Al finalizar el tiempo establecido, se extrajeron muestras de cada vaso de precipitado y se sometieron a un proceso de filtración para eliminar cualquier precipitado o partícula sólida presente en la solución. Posteriormente, las muestras filtradas se transfirieron a tubos de muestra, tanto las muestras iniciales como las tratadas, con el objetivo de realizar un análisis comparativo entre ambas.

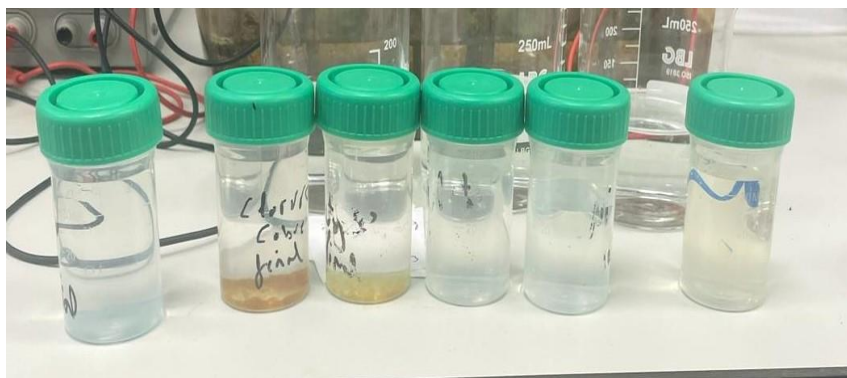


Figura 3-11 Muestras de cada uno de los metales

A continuación, nuestro objetivo es determinar las concentraciones finales de cada muestra tratada y así evaluar las tasas de remoción y la eficiencia del proceso de electrocoagulación. Para lograr esto, llevamos a cabo mediciones de absorbancia utilizando el espectrofotómetro Lambda XLS.

Una vez obtenidas las mediciones de absorbancia para cada muestra tratada, procedimos a construir una curva de calibración utilizando las diferentes absorbancias obtenidas. La curva de calibración nos proporcionará una relación entre la absorbancia medida y la concentración conocida de los compuestos presentes en las muestras.

Con la curva de calibración establecida, podremos determinar las concentraciones finales de los iones de metales pesados en cada muestra tratada. Estas concentraciones nos permitirán evaluar la efectividad del proceso de electrocoagulación en la remoción de los contaminantes metálicos presentes en las aguas residuales.

El uso del espectrofotómetro Lambda XLS y la construcción de la curva de calibración nos proporcionarán resultados precisos y confiables, permitiéndonos obtener una comprensión detallada de los cambios en las concentraciones de los compuestos a lo largo del proceso de tratamiento.

Para llevar a cabo este análisis, empleamos el mismo enfoque utilizado en el experimento anterior. Utilizamos el espectrofotómetro para medir la absorbancia de cada muestra y determinar las concentraciones finales de los metales presentes en ellas. Estas concentraciones finales fueron luego comparadas con las concentraciones iniciales de los metales en las muestras sin tratar, lo que nos permitió calcular las tasas de remoción y evaluar la eficiencia del proceso de electrocoagulación para cada metal por separado.

El uso del espectrofotómetro nos proporcionó resultados precisos y confiables, permitiéndonos obtener una comprensión detallada de los cambios en las concentraciones de los metales a lo largo del proceso de tratamiento. Estos datos serán analizados en conjunto con los obtenidos en la primera parte del experimento, permitiéndonos comparar la eficacia del proceso de electrocoagulación en el tratamiento de aguas contaminadas con una mezcla de metales versus la contaminación con cada metal por separado. Los resultados de este análisis serán presentados en el siguiente apartado, proporcionando una evaluación completa de los hallazgos de nuestro estudio.

Después de obtener los resultados a los 30 minutos, se procedió a realizar pruebas adicionales a intervalos más cortos de tiempo, específicamente a los 5, 10, 15, 20 y 25 minutos. El objetivo era examinar cómo variaba la tasa de remoción en función del tiempo y evaluar si existían diferencias significativas en la eficacia del proceso a medida que se reducía el tiempo de tratamiento.

3.4 Inicio de la segunda experimentación

Una vez que la muestra de agua contaminada fue cuidadosamente transferida a la cubeta, procedimos a implementar el diseño experimental previamente planificado. Para iniciar el proceso de electrocoagulación, conectamos la fuente de alimentación, ajustando el voltaje total a aproximadamente 45V y la intensidad de corriente a 0,4A. Esta configuración se logró mediante la disposición de electrodos monopolar en paralelo, una técnica seleccionada específicamente para nuestro experimento.

Antes de iniciar el proceso de electrocoagulación, llevamos a cabo mediciones fundamentales de pH, conductividad en la muestra y de la temperatura. Estos parámetros son críticos para comprender la evolución del proceso y garantizar la eficacia de la eliminación de contaminantes metálicos. Una vez registrados los valores iniciales de pH, conductividad y temperatura, reflejados en la tabla, comenzamos con el proceso de electrocoagulación.

Decidimos llevar a cabo el proceso a diferentes intervalos de tiempo: 30 minutos, 45 minutos y 60 minutos. Esta variación temporal nos permitió evaluar la eficacia del método en diferentes momentos y comprender mejor su capacidad para eliminar los iones de metales pesados de la muestra. A medida que avanzaba el proceso de electrocoagulación, observamos cómo se acumulaban partículas en la superficie del agua, provenientes de los electrodos. Este fenómeno es un indicador visual del progreso del proceso, y nos proporciona información valiosa sobre la eficiencia de la coagulación y la precipitación de los contaminantes metálicos.

Al cumplirse cada uno de los tiempos específicos establecidos durante el proceso de electrocoagulación, procedimos a extraer muestras de la solución tratada. Estas muestras fueron cuidadosamente recogidas utilizando herramientas esterilizadas para evitar la contaminación y mantener la integridad de los datos obtenidos. Una vez obtenidas las muestras, llevamos a cabo mediciones adicionales de conductividad para evaluar los cambios en la conductividad de la muestra en comparación con los valores iniciales.

Posteriormente, sometimos estas muestras a un riguroso proceso de filtración utilizando los equipos y materiales disponibles en el laboratorio. El filtrado es una etapa crucial en nuestro procedimiento experimental, ya que nos permite separar las partículas sólidas y los contaminantes presentes en la muestra tratada. Para ello, empleamos filtros de alta calidad y precisión, asegurándonos de obtener muestras limpias y libres de impurezas para su posterior análisis.

pH	Conductividad(ms)	Temperatura
6	1,3	25
6,2	1	27
6,3	0,8	28
6,5	0,6	29

Tabla 3-4 Valor de pH ,conductividad y temperatura obtenidos al principio, a los 30 minutos ,45 minutos y 60 minutos

Los cambios observados en el pH, la conductividad y la temperatura durante el proceso de electrocoagulación pueden atribuirse a una serie de factores interrelacionados. En primer lugar, el aumento en el pH puede ser resultado de la generación de hidróxidos metálicos durante la reacción de electrocoagulación. A medida que los iones metálicos son liberados de los electrodos y se combinan con iones hidroxilo en la solución, se produce un aumento en la concentración de hidróxidos metálicos, lo que eleva el pH de la solución.

La disminución en la conductividad, por otro lado, se debe a la remoción de iones disueltos y la formación de compuestos insolubles durante el proceso de electrocoagulación. A medida que los iones

metálicos son coagulados y precipitados fuera de la solución, la cantidad de iones disueltos disminuye, lo que resulta en una disminución en la conductividad de la solución.

En cuanto a la temperatura, los cambios pueden deberse a varias razones. Por un lado, la energía eléctrica suministrada durante el proceso de electrocoagulación puede generar calor, elevando la temperatura de la solución. Además, las condiciones ambientales del laboratorio, como la temperatura ambiente, pueden influir en la temperatura de la solución. Variaciones en la temperatura pueden afectar la velocidad de las reacciones químicas involucradas en el proceso de electrocoagulación, así como la solubilidad de los compuestos en la solución, lo que a su vez puede influir en los valores de pH y conductividad observados.

En resumen, los cambios en el pH, la conductividad y la temperatura durante el proceso de electrocoagulación son el resultado de una combinación de factores, incluida la generación de hidróxidos metálicos, la remoción de iones disueltos y la influencia de la energía eléctrica suministrada y las condiciones ambientales del laboratorio. Estos cambios son indicativos del progreso del proceso y proporcionan información valiosa sobre la eficacia y el rendimiento del método de electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales contaminadas.

Para determinar nuestras concentraciones finales, empleamos el mismo enfoque utilizado en el experimento anterior. Utilizamos el espectrofotómetro para medir la absorbancia de cada muestra y determinar las concentraciones finales de los metales presentes en ellas. Estas concentraciones finales fueron luego comparadas con las concentraciones iniciales de los metales en las muestras sin tratar, lo que nos permitió calcular las tasas de remoción y evaluar la eficiencia del proceso de electrocoagulación para cada metal por separado.

El uso del espectrofotómetro nos proporcionó resultados precisos y confiables, permitiéndonos obtener una comprensión detallada de los cambios en las concentraciones de los metales a lo largo del proceso de tratamiento. Estos datos serán analizados en conjunto con los obtenidos en la primera parte del experimento, permitiéndonos comparar la eficacia del proceso de electrocoagulación en el tratamiento de aguas contaminadas con una mezcla de metales versus la contaminación con cada metal por separado. Los resultados de este análisis serán presentados en el siguiente apartado, proporcionando una evaluación completa de los hallazgos de nuestro estudio.

Después de recolectar muestras a los 30, 45 y 60 minutos para analizar la evolución de la tasa de remoción en relación con el tiempo, decidimos explorar el efecto de variar el pH en nuestro proceso. Para ello, introdujimos hidróxido de potasio con el objetivo de aumentar el pH hasta alcanzar un valor de 10.

4. RESULTADOS/VALIDACIÓN/ PRUEBAS

4.1 resultado de los experimentos

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos de los experimentos realizados, junto con su interpretación detallada. Estos resultados son cruciales para comprender la eficacia y el impacto de los métodos de electrocoagulación empleados en la remoción de metales pesados del agua. Además, se realiza un análisis exhaustivo de los datos recopilados para identificar tendencias significativas y relaciones entre las variables estudiadas.

Los resultados y su interpretación proporcionarán una base sólida para extraer conclusiones fundamentadas sobre la eficacia del proceso de electrocoagulación en la remoción de metales pesados. Además, servirán como punto de partida para proponer recomendaciones y líneas de trabajo futuras, con el objetivo de mejorar y optimizar el proceso en términos de eficiencia y aplicabilidad práctica.

4.2 Concentraciones finales

Es importante tener en cuenta que para la obtención de estas concentraciones es necesario el conocimiento de la absorbancia de cada una de las muestras con el fin de construir nuestra recta de calibrado para cada contaminante a continuación explicaré que es la absorbancia y porqués es tan importante su conocimiento

4.2.1 Absorbancia

La absorbancia se refiere a la medida de la cantidad de luz absorbida por una solución en relación con la longitud de onda de la luz incidente. Se calcula utilizando la ley de Beer-Lambert, que establece una relación entre la absorbancia, la concentración de la muestra y la longitud de la trayectoria de la luz a través de la solución. Este parámetro es fundamental en la espectrofotometría, una técnica comúnmente empleada en la química analítica para cuantificar la concentración de sustancias en una muestra[36].

La ley de Beer-Lambert se representa mediante la siguiente fórmula:

$$A = \varepsilon * c * l$$

Dónde:

A= absorbancia de la solución

ε = coeficiente de absorción molar del soluto

C=concentraci on de soluto

l= longitud del camino óptico a través de la solución

En el contexto de la electrocoagulación, la medición precisa de la absorbancia de las muestras tratadas es crucial para estimar con exactitud las concentraciones de los metales pesados presentes en el agua. Para llevar a cabo estas mediciones, utilizaremos el espectrofotómetro Lambda XLS, disponible en el laboratorio. Este instrumento nos permitirá obtener datos precisos sobre la absorbancia de nuestras muestras y, por ende, calcular las concentraciones de los metales pesados con alta precisión.

El espectrofotómetro Lambda XLS ofrece diversos modos de uso, adaptados a las necesidades específicas de cada experimento. En función del tipo de análisis que se esté llevando a cabo, se seleccionará el modo más adecuado para obtener mediciones precisas y confiables.

En nuestra primera experimentación, optamos por emplear el modo 1 del espectrofotómetro Lambda XLS(longitud de onda simple). Este modo se basa en la longitud de onda simple y resulta ideal cuando las muestras contienen un único metal específico cuya absorbancia deseamos determinar con precisión

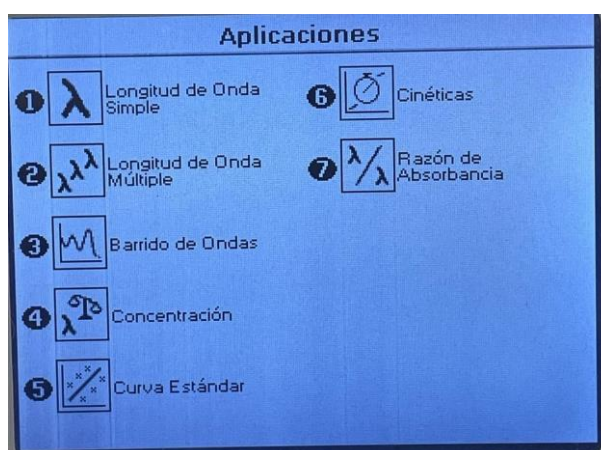


Figura 4-1 Diferentes modos del Lambda XLS

En la segunda experimentación, se empleó el modo 2 del espectrofotómetro Lambda XLS(longitud onda múltiple), el cual consiste en ondas múltiples. Este modo es especialmente útil cuando se desean analizar múltiples metales presentes en una muestra y se necesita conocer su absorbancia individual. Dado que nuestro objetivo era determinar la absorbancia de varios metales pesados en nuestras muestras tratadas mediante electrocoagulación, este modo nos proporcionó la capacidad de realizar mediciones específicas para cada metal.

Para determinar la absorbancia de un metal en solución, es esencial considerar las longitudes de onda específicas a las cuales los metales presentes en la muestra absorben la luz. En nuestro caso, hemos identificado las siguientes longitudes de onda asociadas con los metales utilizados:

Metal	Longitud de onda(nm)
Cu	324
Zn	214
Ni	375

Tabla 4-1 Longitudes de onda de cada metal (obtenida de[37])

Una vez introducidas estas longitudes de onda características de los metales presentes en la muestra, se procede a realizar mediciones de absorbancia.

4.2.2 Recta de calibrado

Para construir la curva de calibración, primero tomamos una muestra madre de contaminante y la diluimos para obtener una serie de soluciones estándar con concentraciones conocidas. En este caso, partimos de una muestra de 5 ml de agua contaminada y la diluimos hasta alcanzar un volumen final de 50 ml. Repetimos este proceso con diferentes volúmenes (10, 20, 30, 40 y 50) de muestra madre para obtener una variedad de concentraciones conocidas.

Luego, medimos la absorbancia de cada una de estas soluciones estándar utilizando un espectrofotómetro. Con los valores de absorbancia y las concentraciones conocidas, podemos construir una curva de calibración graficando la concentración en el eje x y la absorbancia en el eje y. Esta curva nos permitirá determinar las concentraciones de las muestras desconocidas basadas en sus medidas de absorbancia.

Para representar esta recta en forma de ecuación, podemos utilizar la ecuación de la recta, que es de la forma:

$$y = mx + b$$

Dónde:

- y = absorbancia
- m = pendiente de la recta
- x = concentración
- b = ordenada en el origen

4.2.3 Tasa de remoción

La tasa de remoción es un parámetro crítico en la evaluación de la eficacia de eliminación de contaminantes en este proceso, se calcula mediante la comparación de las concentraciones iniciales y finales del contaminante de interés.

Para determinar esta tasa usamos la siguiente fórmula:

$$\text{tasa de remoción}(\%) = \frac{Ci - Cf}{Ci} \times 100$$

Donde *Ci* representa la concentración inicial del contaminante y *Cf* la concentración final del mismo después del tratamiento. La tasa de remoción se expresa como un porcentaje y proporciona una medida cuantitativa de la eficacia del proceso de tratamiento.

Un alto valor de la tasa de remoción indica una significativa reducción en la concentración del contaminante, lo que refleja una mayor eficiencia en la eliminación del mismo. Por otro lado, una tasa de remoción más baja podría indicar la necesidad de ajustes o mejoras en el proceso de tratamiento.

4.3. Resultados primera experimentación

En nuestra segunda experimentación, la cual fue detalladamente descrita previamente, se llevaron a cabo una serie de medidas de absorbancia para las muestras analizadas. Estos valores de absorbancia se registraron meticulosamente y se presentan en la siguiente tabla

Metal	Muestra pretratamiento	Muestra postratamiento
Cu	1,15	0,044
Ni	0,609	0,161
Zn	0,746	0,127

Tabla 4-2 Muestras pretratamiento y postratamiento

Tras la obtención de los valores de absorbancia correspondientes a las muestras analizadas en nuestra segunda experimentación, procedimos a llevar a cabo la construcción de la recta de calibrado siguiendo el procedimiento previamente explicado. Los valores de absorbancia resultantes se detallan a continuación:

- recta de calibrado del zinc

Agua desionizada	Contaminante	absorbancia
40	0,0365	0,208
30	0,0736	0,322
20	0,1104	0,461
10	0,1472	0,588
0	0,184	0,746

Tabla 4-3 Recta calibrado zinc

Ahora ya disponemos de 5 valores de absorbancia para determinar la recta de calibración

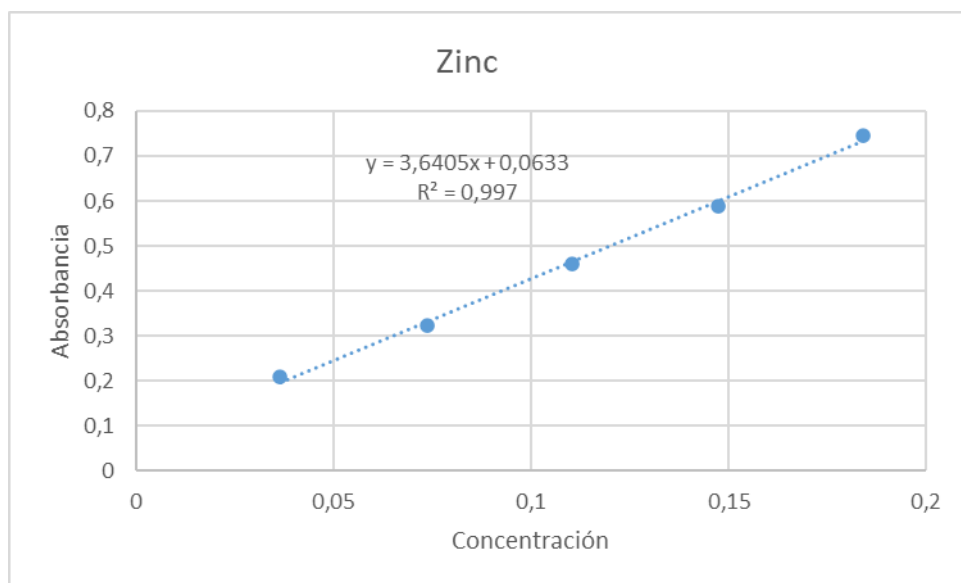


Figura 4-2 Recta de calibrado del Zinc

Como podemos ver en la imagen obtenemos una recta de calibración $y = 3,6405x + 0,0633$

A partir de aquí podemos obtener el valor de la concentración de la muestra descontaminada ya que conocemos su absorbancia (0,027), despejando de la fórmula donde y es la absorbancia y x el volumen,

$$x = \frac{0,127 - 0,0633}{3,6405} = 0,01749 \frac{g}{l}$$

Como podemos apreciar la concentración resultante es muy pequeña por lo que podemos intuir que el proceso ha sido bastante eficaz, esto será demostrado a continuación mediante la obtención de la tasa de remoción:

$$tasa\ de\ remoción(\%) = \frac{0,1845 - 0,01749}{0,1845} \times 100 = 90,51\%$$

Con base en la tasa de remoción obtenida, se puede inferir que el proceso de electrocoagulación aplicado al níquel durante 30 minutos ha sido altamente efectivo. Una alta tasa de remoción indica una eficiente eliminación del níquel de la solución tratada.

- Recta de calibrado del cobre

Agua desionizada	Contaminante	Absorbancia
40	0,0674	0,03
30	0,1348	0,12
20	0,2022	0,21
10	0,2696	0,34
0	0,337	0,45

Tabla 4-4 Recta calibrado cobre

Realizamos la recta de calibrado

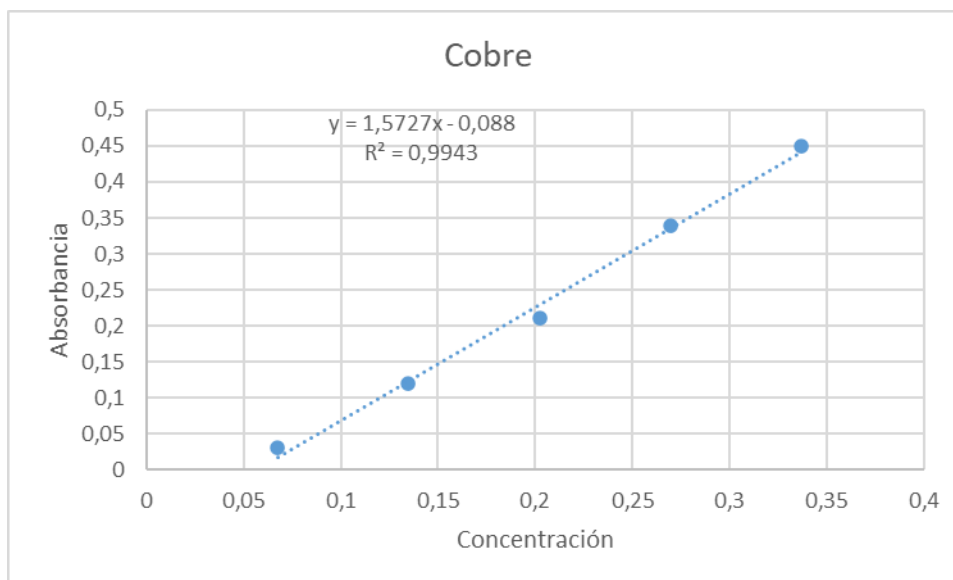


Figura 4-3 Recta de calibrado del Cobre

Obtenemos la siguiente ecuación de la recta $y = 1,5727x - 0,088$ sabiendo que la absorbancia final es de 0,195 despejamos la x para obtener la concentración

$$x = \frac{0,015 + 0,088}{1,5727} = 0,0654 \frac{g}{l}$$

A continuación comprobamos su eficacia mediante la obtención de la tasa de remoción

$$tasa\ de\ remoción\ (\%) = \frac{0,337 - 0,06549}{0,337} \times 100 = 80,5\%$$

Como el proceso anterior podemos ver que el proceso tiene una alta tasa de remoción.

- Recta de calibrado níquel

Agua desionizada	Concentración	Absorbancia
40	0,206	0,05
30	0,412	0,1
20	0,618	0,19
10	0,824	0,33
0	1,03	0,4

Tabla 4-5 Recta calibrado níquel

A partir de los datos anteriores se construye la siguiente recta de calibrado:

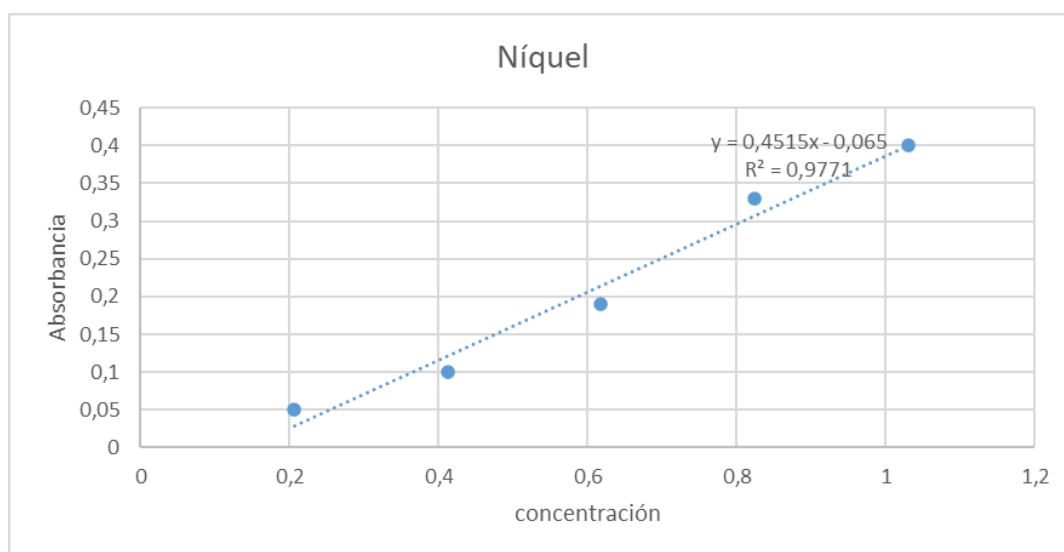


Figura 4-4 Recta de calibrado del Níquel

Como podemos observar la ecuación de la recta $y = 0,4515x - 0,065$, despejamos x y obtenemos el valor de la concentración dado que conocemos la absorbancia de la muestra final tratada

$$x = \frac{0,05 + 0,0654}{0,4515} = 0,256 \frac{g}{l}$$

Calculamos la tasa de remoción:

$$Tasa\ de\ remoción(\%) = \frac{1,03 - 0,256}{1,03} \times 100 = 75\%$$

Una vez que disponemos de las tres concentraciones finales y tasas de remoción mostradas en la siguiente tabla.

Metal	Concentración final(g/L)	Tasas de remoción(%)
Zn	0,01749	90,51
Cu	0,0654	80,5
Ni	1,2	75

Tabla 4-6 Concentración final y tasa de remoción de cada metal

Los resultados obtenidos demostraron una alta eficiencia del tratamiento para el tiempo de 30 min. Para evaluar cómo variaba la eficacia en función del tiempo, se realizaron pruebas a intervalos más cortos, específicamente a los 5, 10, 15, 20 y 25 minutos de tratamiento. Esto nos permitió observar cómo el tiempo de tratamiento afectaba la tasa de remoción de manera más detallada.

- Zinc

Tiempo	Absorbancia	Concentración	Tasa de remoción(%)
0	0,746	0,184	0
5	0,73	0,1831	0,4
10	0,65	0,1611	12,44
15	0,43	0,1007	45,27
20	0,32	0,07	62
25	0,22	0,043	76,6
30	0,127	0,01749	90,5

Tabla 4-7 Absorbancia , concentración final y tasa de remoción del Zinc

- Cobre

Tiempo	Absorbancia	concentración	Tasa de remoción(%)
0	0,45	0,337	0
5	0,4	0,31	8
10	0,31	0,253	25
15	0,23	0,2022	40
20	0,145	0,148	56
25	0,1	0,119	64
30	0,015	0,065	81

Tabla 4-8 Absorbancia , concentración final y tasa de remoción del Cobre

- Níquel

Tiempo	Absorbancia	Concentración	Tasa de remoción(%)
0	0,4	1,03	0
5	0,32	0.8531	17
10	0,256	0.7109	31
15	0,21	0.6082	41
20	0,16	0.4989	52
25	0,11	0.3873	63
30	0,05	0,256	75

Tabla 4-9 Absorbancia , concentración final y tasa de remoción del Níquel

El análisis de la tasa de remoción resalta la mayor eficacia del zinc, evidenciada por una tasa de remoción más rápida a partir de los 15 minutos en comparación con los otros metales. Sin embargo, es importante destacar que se introdujo inicialmente una cantidad considerablemente mayor de níquel en comparación con los otros metales. Esta disparidad en la cantidad inicial resulta en una mayor molaridad para el níquel, lo que puede influir en la tasa de remoción observada para cada metal. Es crucial considerar este factor al interpretar los resultados y al comparar la eficacia de remoción entre los diferentes metales.

A continuación, se exhibirá un gráfico que ilustra la relación entre la tasa de remoción y el tiempo transcurrido durante el proceso de tratamiento

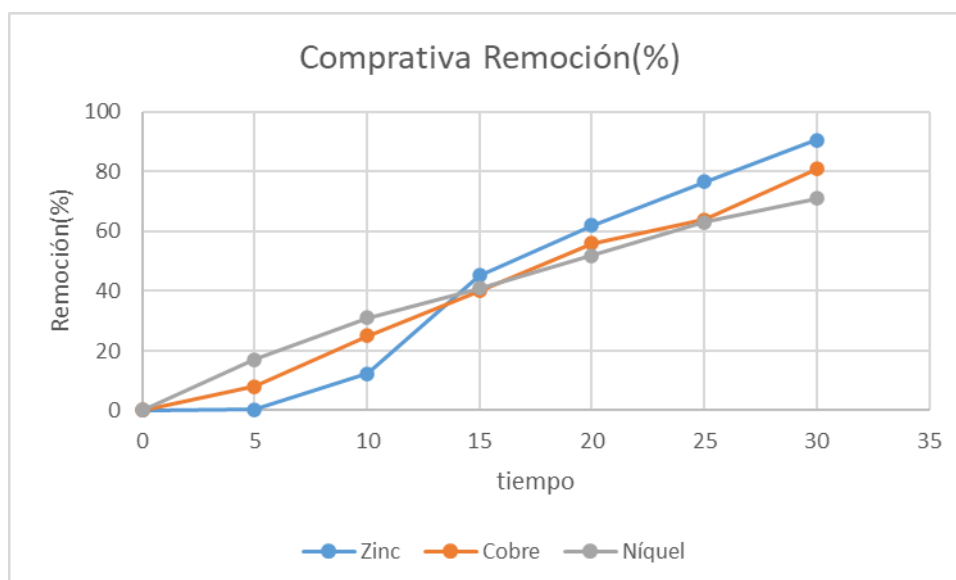


Figura 4-5 Comparativa de remoción de los 3 metales

4.4 Resultados segunda experimentación

Siguiendo el contexto de la primera experimentación, previamente descrito, se integraron las longitudes de onda mencionadas. A continuación, se presenta una tabla que muestra las absorbancias obtenidas para las tres muestras diferentes recogidas a los 30, 45 y 60 minutos.

Tiempo	Zn	Cu	Ni
30	0,49	0,4	0,261
45	0,36	0,25	0,123
60	0,134	0,09	0,05

Tabla 4-10 Absorbancia de cada metal

Después de obtener las absorbancias, procedimos a calcular las concentraciones finales utilizando las rectas de calibrado que fueron previamente calculadas

Tiempo	Zn	Cu	Ni
30	0,117	0,31	2,91
45	0,081	0,21	1,67
60	0,0195	0,113	1,2

Tabla 4-11 Concentraciones de cada metal

Calculadas las concentraciones, procedemos a determinar la tasa de remoción. Esta evaluación nos permite medir la eficacia del tratamiento en la eliminación de los contaminantes, considerando la variación de la concentración inicial respecto a la primera experimentación.

Tiempo	Zn	Cu	Ni
30	90	58	30
45	93	72	60
60	98	85	71

Tabla 4-12 Tasas de remoción de cada metal

La siguiente gráfica proporciona una comparación visual de las tasas de remoción del Zn Cu y Ni. Se destaca que el zinc exhibe una tasa de remoción notablemente mayor en comparación con los otros metales evaluados. Por otro lado, se observa que el níquel presenta una tasa de remoción más baja en relación con los demás metales, lo que sugiere que su eliminación puede requerir un mayor tiempo o esfuerzo en el proceso de tratamiento

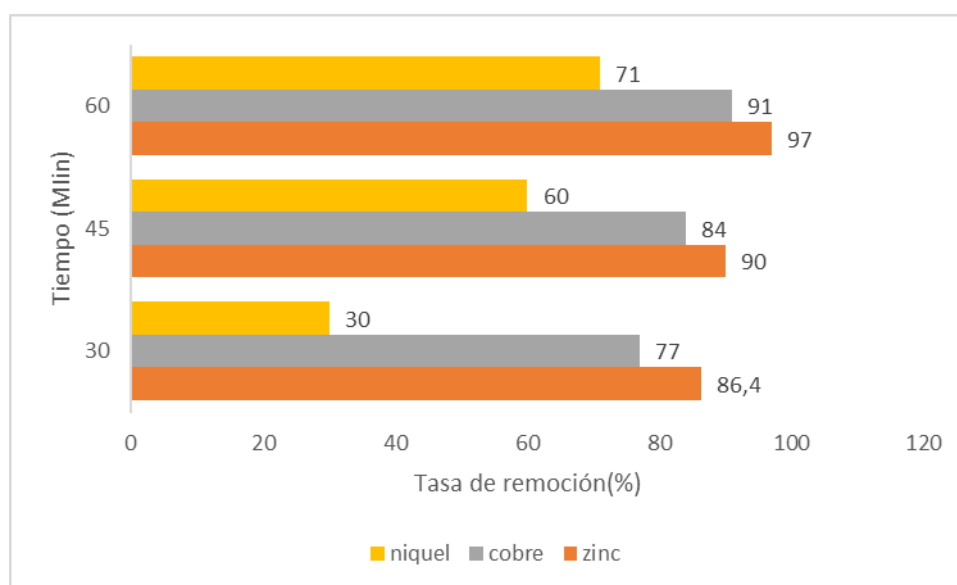


Figura 4-6 Tasa de remoción de los 3 metales a la vez

Al analizar el gráfico, podemos observar que el proceso muestra una alta efectividad a partir de los 30 minutos, con excepción del níquel. Se destaca que, a los 60 minutos, se alcanza prácticamente una tasa de remoción del 100% para el zinc y el cobre, mientras que para el níquel se requiere un tiempo de tratamiento ligeramente mayor, superando la hora, para alcanzar las tasas de remoción óptimas.

Tras obtener los resultados mencionados anteriormente, se decidió llevar a cabo una serie de experimentos adicionales para explorar el efecto del pH en la tasa de remoción de los metales pesados mediante electrocoagulación. Inicialmente, el pH del medio era de 6, y con el objetivo de aumentarlo, se empleó carbonato de potasio. Gracias a este reactivo, se logró incrementar el pH hasta alcanzar un valor de 10.

Una vez alcanzado el pH deseado, se procedió a aplicar el mismo método utilizado anteriormente, es decir, el tratamiento del agua en tres intervalos de tiempo (30, 45 y 60 minutos). A continuación, se presentan los resultados de absorbancia obtenidos en cada uno de estos intervalos de tiempo

Tiempo	Zn	Cu	Ni
30	0,7	0,53	0,32
45	0,63	0,32	0,24
60	0,45	0,13	0,123

Tabla 4-13 Absorbancia de cada metal

A continuación se muestran las concentraciones calculadas:

Tiempo	Zn	Cu	Ni
30	0,152	0.3929	3.4375
45	0,146	0.2594	2.7232
60	0,104	0.1387	1.6786

Tabla 4-14 Concentraciones de cada metal

A partir de las concentraciones podemos calcular las tasa de remoción:

Tiempo	Zn	Cu	Ni
30	88	47	17
45	89	64	34
60	92	80	59

Tabla 4-15 Tasas de remoción de cada metal

A continuación mostrare un gráfico representando las nuevas tasas de remoción para el pH 10

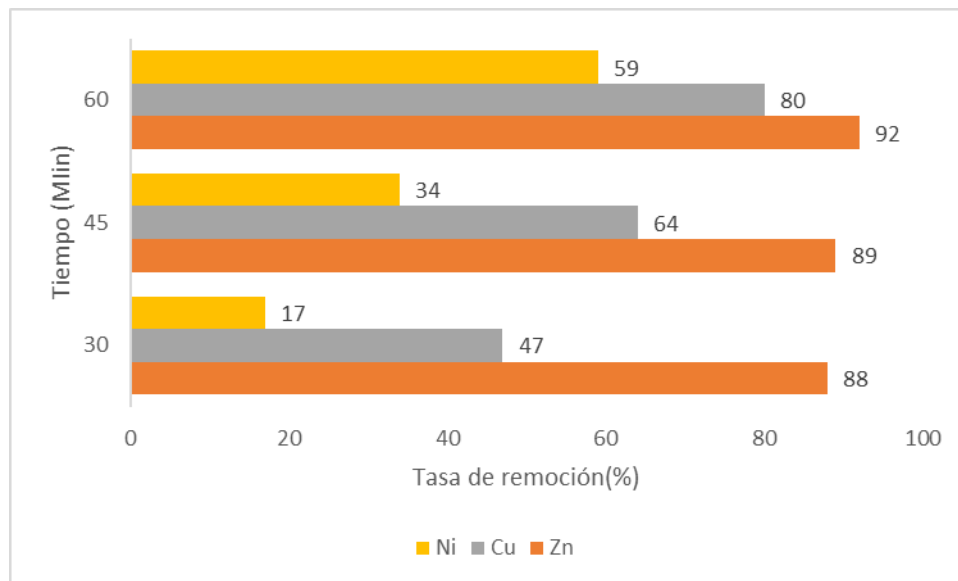


Figura 4-7 Tasa de remoción de los 3 metales a la vez a pH 10

Haciendo una comparativa, podemos ver como el pH del medio afecta a la tasa de remoción

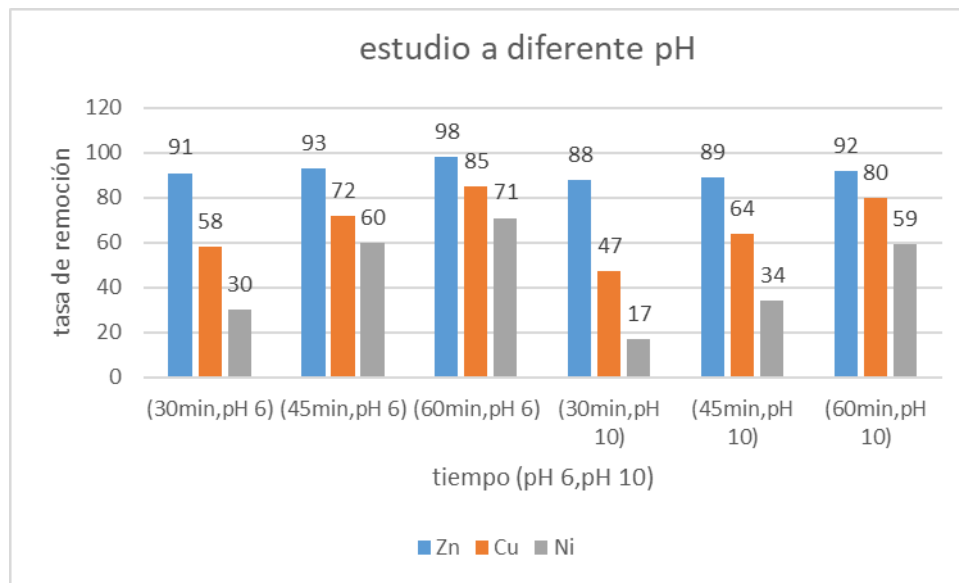


Figura 4-8 Comparativa de tasa de remoción a diferente pH

Se aprecia como el aumento de pH del medio provoca una peor tasa de remoción esto puede ser debido a diferentes factores como:

- **Solubilidad de los metales:** A pH más altos, algunos metales pueden estar más solubilizados en el agua, lo que dificulta su remoción mediante procesos de electrocoagulación.
- **Formación de especies químicas:** A diferentes valores de pH, los metales pueden formar diferentes especies químicas en solución, algunas de las cuales pueden ser más difíciles de remover que otras.
- **Condiciones electroquímicas:** El pH del agua puede afectar las condiciones electroquímicas en la celda de electrocoagulación, lo que a su vez puede influir en la eficacia del proceso.
- **Interacción con otros componentes del agua:** A diferentes pH, los metales pueden interactuar de manera diferente con otros componentes del agua, como iones o compuestos orgánicos, lo que puede afectar su capacidad de ser removidos por electrocoagulación.

4.5 Comparativa ambos experimentos

Tras analizar los resultados de los dos experimentos (tratamiento simultáneo de tres metales y tratamiento de cada metal por separado), se observa que los tiempos requeridos para alcanzar la óptima tasa de remoción difieren entre ambos. Con el fin de visualizar estas diferencias de manera más clara, se presentará una gráfica comparativa de las tasas de remoción en los dos experimentos en el intervalo de tiempo estudiado de 30 minutos

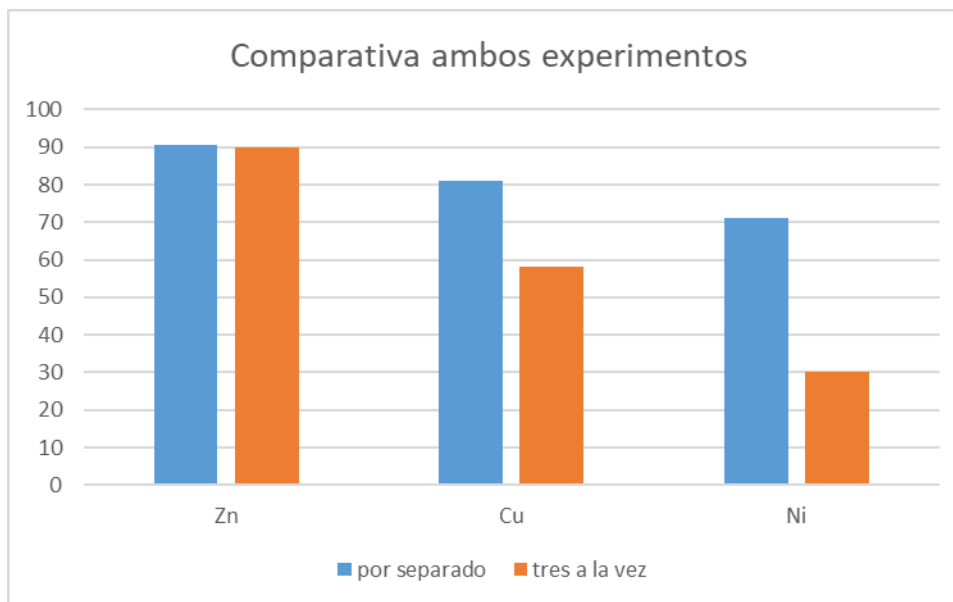


Figura 4-9 Comparativa tasa de remoción entre las 2 experimentaciones

Se observa que las tasas de remoción en el experimento donde se tratan los metales por separado son notablemente mayores en comparación con el tratamiento simultáneo de los tres metales. Esta diferencia es especialmente evidente en el caso del níquel, donde se registra una diferencia del 40% entre ambos procesos.

Esta discrepancia ya fue evidente en cada uno de los experimentos individuales, donde las tasas de remoción del níquel se mostraron notablemente diferentes respecto a las de los otros metales. Esto sugiere una variabilidad significativa en la respuesta del níquel al proceso de tratamiento, lo cual es crucial tener en cuenta al evaluar la eficacia del tratamiento para este metal en particular

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones en base a los objetivos propuestos

Tras llevar a cabo las diversas experiencias propuestas y realizar su consiguiente análisis y discusión, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1) **Eficacia de la electrocoagulación:** Se ha demostrado que la electrocoagulación es una técnica efectiva para la eliminación de metales pesados en aguas residuales. Los resultados obtenidos muestran una alta tasa de remoción de contaminantes, lo que confirma la eficacia de este proceso en la purificación del agua.

2) **Tiempo de tratamiento:** Se observa una relación directa entre el tiempo de tratamiento y la eficacia de remoción de metales pesados. A medida que aumenta el tiempo de tratamiento, se alcanzan mayores tasas de remoción, lo que indica la importancia de considerar este factor al diseñar procesos de tratamiento de aguas residuales.

3) **Influencia del pH:** Se observa que el pH del agua afecta significativamente la eficiencia de la electrocoagulación. En general, se encontró que a pH más bajos, la tasa de remoción de metales pesados es más alta, aunque esta tendencia puede variar dependiendo del metal y las condiciones específicas del experimento.

4) **Diferencias entre metales:** Se han identificado diferencias significativas en la remoción de distintos metales pesados. Algunos metales, como el zinc, muestran una mayor susceptibilidad a ser eliminados mediante electrocoagulación en comparación con otros, como el níquel, lo que destaca la importancia de considerar las características específicas de cada metal al diseñar estrategias de tratamiento.

5.2 líneas futuras

De cara al futuro se puede mejorar

1) **Influencia de la conductividad:** Un aspecto importante que quedó pendiente de estudio fue la influencia de la conductividad en el proceso de electrocoagulación. La conductividad del agua puede afectar significativamente la eficiencia y la velocidad de remoción de contaminantes mediante electrocoagulación. Sin embargo, debido a limitaciones en la precisión de nuestra fuente de alimentación, no pudimos ajustar los voltajes de manera adecuada para explorar cómo varía el proceso en función de la conductividad del agua. Esta área de investigación ofrece oportunidades interesantes para futuros estudios, ya que comprender mejor la relación entre la conductividad del agua y la eficacia de la electrocoagulación puede conducir a mejoras significativas en el diseño y la operación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales.

2) **Caracterización de productos secundarios:** Además de la remoción de metales pesados, sería beneficioso investigar y caracterizar los productos secundarios generados durante el proceso de electrocoagulación. Esto incluye identificar y cuantificar subproductos como lodos, gases y compuestos orgánicos, así como evaluar su toxicidad y su potencial impacto ambiental.

3) **Investigación sobre escalabilidad y aplicabilidad a gran escala:** Aunque los resultados obtenidos en el laboratorio son prometedores, es fundamental investigar la escalabilidad y la aplicabilidad de la electrocoagulación a gran escala. Esto implica realizar estudios piloto y ensayos a escala real en plantas de tratamiento de aguas residuales para evaluar la eficacia y la eficiencia del proceso en condiciones prácticas. Además, se deben abordar los desafíos técnicos y logísticos asociados

con la implementación a gran escala, como el manejo de grandes volúmenes de agua, la gestión de residuos y la integración con infraestructuras existentes.

4) **Mejora del diseño de la celda de electrocoagulación:** Investigar y desarrollar diseños de celdas de electrocoagulación más eficientes y escalables. Esto puede incluir la optimización de la geometría de la celda, la distribución y disposición de los electrodos, así como el desarrollo de sistemas de recirculación y mezcla para mejorar la homogeneidad del proceso y maximizar la interacción entre el agua y los electrodos.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] redaccion iAgua, «¿Qué son las aguas residuales?», iAgua. Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iagua.es/respuestas/que-son-aguas-residuales>
- [2] institutodelaguaes, «Aguas Residuales: Consecuencias y Efectos Negativos en el Medio Ambiente y la Salud Humana», Instituto del Agua. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/consecuencias-de-las-aguas-residualesaguas-residuales/>
- [3] I. CORPORATIVA, «La contaminación del agua: cómo no poner en peligro nuestra fuente de vida», Iberdrola. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contaminacion-del-agua>
- [4] «Los 8 principales contaminantes del agua», Fundación Aquae. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/los-residuos-que-mas-contaminan-el-agua/>
- [5] «Convenios internacionales», Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/gl/agua/temas/convenios-acuerdos-internacionales/otros-convenios-internacionales.html>
- [6] «Convenio de Albufeira». Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cadc-albufeira.eu/es.html>
- [7] «Quiénes somos», CODIA. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://codia.info/quienes-somos/>
- [8] «Convenio de Helsinki: prevención de la contaminación en cursos de agua transfronterizos y lagos internacionales | EUR-Lex». Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/ES/legal-content/summary/helsinki-convention-preventing-pollution-in-international-watercourses-and-lakes.html>
- [9] «Metales pesados», Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales_pesados.html
- [10] D. R. Heredia, «Metales pesados y salud», *Correo Científico Méd.*, vol. 25, n.º 4, Art. n.º 4, nov. 2021, Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://revcocmed.sld.cu/index.php/cocmed/article/view/3702>
- [11] E. de comunicación Aconsa, «Metales pesados en el agua potable: ¿deben preocuparnos? ¿se pueden minimizar?», Aconsa. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://aconsa-lab.com/metales-pesados-en-el-agua-potable/>
- [12] A. Carvajal, «La Historia Del Desastre En Minamata», Innova. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.innovaambiental.com.co/la-historia-del-desastre-en-minamata/>
- [13] «Flint, el pueblo de EE.UU. en emergencia por envenenamiento con plomo», BBC News Mundo. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/12/151216_internacional_flint_michigan_emergencia_contaminacion_agua_plomo_ppb
- [14] «Mil toneladas de peces muertos: los motivos del mayor desastre de la minería europea», infobae. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.infobae.com/economia/rse/2017/06/27/mil-toneladas-de-peces-muertos-los-motivos-del-mayor-desastre-de-la-mineria-europea/>
- [15] J. Lillo, «Impactos de la minería en el medio natural».

- [16] Redacción, «Qué son efluentes industriales», Grupo Vento BLOG. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://evaporadoresindustriales.grupovento.com/que-son-efluentes-industriales/>
- [17] R. M. Galvín, «Contaminantes emergentes y metales pesados en aguas residuales: un caso de estudio», 2016.
- [18] «AyT BUAP - Los metales pesados en la historia de la humanidad»,. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.aytbuap.mx/aytbuap-727/los-metales-pesados-en-la-historia-de-la-humanidad>
- [19] G. Nordberg, «METALES: PROPIEDADES QUIMICAS Y TOXICIDAD».
- [20] «¿Qué es la precipitación química?», Ceupe. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-precipitacion-quimica.html>
- [21] D. I. Caviedes Rubio, R. A. Muñoz Calderón, A. Perdomo Gualtero, D. Rodríguez Acosta, y I. J. Sandoval Rojas, «Tratamientos para la Remoción de Metales Pesados Comúnmente Presentes en Aguas Residuales Industriales. Una Revisión», *Ing. Región*, vol. 13, n.º 3, p. 73, sep. 2015, doi: 10.25054/22161325.710.
- [22] institutodelaguaes, «Adsorción: Tratamiento Eficaz para la Purificación de Aguas Residuales», Instituto del Agua. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/adsorcion-tratamiento-de-aguas-residualesaguas-residuales-2/>
- [23] D. C. Ramos, «Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética», *Ingeniería*, vol. 23, n.º 3, pp. 252-273, 2018.
- [24] «¿Qué es la filtración por membrana?» Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/separacion/membranas/que-es-filtracion-por-membrana/>
- [25] «Diferencias entre microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa - AEDyR». Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://aedyr.com/diferencias-microfiltracion-ultrafiltracion-nanofiltracion-osmosis-inversa/>
- [26] A. Ibanez, «El mecanismo de coagulación y floculación», Nihon Kasetu Europe | Monitoring & Water Clarification. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://nihonkasetu.com/es/el-mecanismo-de-coagulacion-y-floculacion/>
- [27] «¿Qué es la fitorremediación?», phy2sudoe. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.phytosudoe.eu/el-proyecto/que-es-la-fitorremediacion/>
- [28] G. E. Acosta Niño, C. A. Coy Barrera, A. Bourdón García, y E. Cuervo Lumbaque, «La Electrocoagulación como un Tratamiento Eficiente para la Remoción de Metales Pesados Presentes en Aguas Residuales», *Rev. Fac. Cienc. Básicas*, vol. 9, n.º 2, p. 306, dic. 2013, doi: 10.18359/rfcb.389.
- [29] J. S. H. Florez y S. M. Roa, «EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ELECTROCOAGULACIÓN PARA DISMINUIR LA CARGA CONTAMINANTE A ESCALA DE LABORATORIO».
- [30] «Electrocoagulación: ventajas y desventajas para procesos industriales». Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos99/electrocoagulacion-ventajas-y-desventajas-para-procesos-industriales/electrocoagulacion-ventajas-y-desventajas-para-procesos-industriales>
- [31] A. P. R. Mejía, Á. A. Ruiz, y L. F. G. Giraldo, «La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas», vol. 1, n.º 2, 2006.
- [32] www.instijlmedia.nl, «Cloruro de cobre (II)», Laboratorium Discounter. Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.laboratoriumdiscounter.nl/es/quimicos/a-z/k/cloruro-de-cobre-ii/?source=facebook>
- [33] «Sulfato De Zinc | Química Industrial». Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://quimicaindustrial.cl/producto/sulfato-de-zinc-heptahidratado/>

- [34] «Nitrato de níquel(II) hexahidrato, 98 %, Thermo Scientific Chemicals | Fisher Scientific». Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.fishersci.es/shop/products/nickel-ii-nitrate-hexahydrate-98-thermo-scientific/11408740>
- [35] E. León Vilela y V. Aramburú Rojas, «Aplicación de la electrocoagulación en la eliminación de los metales pesados en los efluentes galvánicos», *Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal. Cienc. Geográficas*, vol. 24, n.º 48, pp. 109-115, dic. 2021, doi: 10.15381/iigeo.v24i48.19828.
- [36] «Qué es la absorbancia, medición de absorbancia, ensayos de absorbancia | Molecular Devices». Accedido: 28 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.moleculardevices.com/technology/absorbance>
- [37] K. Rahn-Chique, N. Carrión, y M. Murillo, «Determinación de cobre, magnesio y zinc en leucocitos mononucleares mediante espectrometría de absorción atómica con llama», *Investig. Clínica*, vol. 53, n.º 4, pp. 342-352, dic. 2012.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

1. Implicaciones sociales y ambientales

El tratamiento de las aguas residuales es un objetivo fundamental en la gestión ambiental y la salud pública. Las técnicas de tratamiento de aguas residuales y remediación de suelos contaminados, como las que aborda este trabajo de fin de grado, desempeñan un papel crucial en la consecución de este objetivo. Al implementar y perfeccionar estas técnicas, se pueden eliminar o reducir significativamente los contaminantes presentes en el agua y el suelo, lo que se traduce en una mejora palpable en la calidad del agua disponible para las comunidades locales.

Este impacto positivo se refleja directamente en la salud y el bienestar de las personas que dependen del suministro de agua para beber, cocinar y otras necesidades básicas. Al reducir los niveles de contaminantes peligrosos, como metales pesados, productos químicos tóxicos y patógenos, se disminuyen los riesgos de enfermedades relacionadas con el agua y se promueve un entorno más saludable para las comunidades locales.

Además, la mejora en la calidad del agua beneficia al medio ambiente en su conjunto. La reducción de la contaminación en los cuerpos de agua y los suelos contribuye a la conservación de los ecosistemas acuáticos y terrestres, preservando la biodiversidad y los servicios ecológicos que proporcionan. Esto incluye la protección de hábitats acuáticos, la preservación de especies en peligro de extinción y la restauración de ecosistemas degradados.

2. Implicaciones económicas

En primer lugar, la implementación de técnicas más eficientes y rentables para el tratamiento de aguas residuales y la remediación de suelos contaminados puede conducir a ahorros sustanciales para las industrias y los gobiernos locales. Al mejorar la eficiencia de los procesos de tratamiento, se reducen los costos operativos y de mantenimiento asociados, lo que a su vez puede traducirse en una mayor rentabilidad para las empresas y una menor carga financiera para los municipios y entidades gubernamentales.

Además, la mejora en la calidad del agua puede tener efectos positivos en la economía en general. Un suministro de agua más limpio y seguro puede estimular el desarrollo económico al promover la inversión en infraestructura, el turismo y otras actividades relacionadas con el agua. Las comunidades

que cuentan con recursos hídricos de alta calidad son más atractivas para los inversores y los residentes, lo que puede impulsar el crecimiento económico a largo plazo y mejorar la calidad de vida de sus habitantes.

Por otro lado, también es importante considerar los costos asociados con la contaminación del agua y la falta de tratamiento adecuado. La contaminación hídrica puede tener efectos devastadores en la salud humana, la agricultura, la pesca y otros sectores económicos. Los brotes de enfermedades transmitidas por el agua, la pérdida de productividad agrícola debido a la contaminación del suelo y el agua, y la disminución de los ingresos derivados del turismo son solo algunos ejemplos de los impactos económicos negativos de la mala calidad del agua.

En el marco de este estudio, se llevó a cabo un análisis económico detallado para determinar el presupuesto necesario para la ejecución de la parte experimental del trabajo de fin de grado (TFG). Este análisis incluyó todos los costos asociados con la adquisición de materiales, equipos, productos químicos, así como los gastos relacionados con la realización de pruebas y experimentos.

Primero determinaremos cual fue el costo energético para la primera y segunda experimentación

$$\text{costo energético} = E * \text{costo de energía}$$

El costo de la energía actualmente en España es de 0,0631€/kWh.

Para calcular la energía consumida usaremos la siguiente fórmula:

$$E = \frac{V * I * T}{V_{EfR}}$$

Dónde

E= energía consumida

V= voltaje empleado por la fuente

I= intensidad de la fuente

T= tiempo de electrocoagulación

V_{EFR}= volumen efectivo de la celda

Energía consumida primera experimentación:

$$E = \frac{60 * 0,4 * 2,65}{1} = 63,6 \frac{kWh}{L}$$

Energía segunda experimentación:

$$E = \frac{60 * 0,4 * 2}{5} = 9,6 \frac{kWh}{L}$$

Una vez tenemos estos datos ya podemos calcular el costo energético medio de ambos experimentos por litro de agua

- Primera experimentación

$$\text{Costo energético} = 63,6 * 0,0631 = 4€/L$$

- Segunda experimentación

$$\text{Costo energético} = 9,6 * 0,0631 = 0,6€/L$$

Teniendo en cuenta el costo energético por litro de agua tratada podemos determinar el precio total de cada experimentación

- Primera experimentación

$$4 \frac{€}{L} * 1L = 4€$$

- Segunda experimentación

$$0,6 \frac{€}{L} * 4L = 2,4€$$

En cuanto al coste del material empleado solamente tendré en cuenta la cubeta y los electrodos ya que el resto del material empleado ya se encontraba a nuestra disposición en el laboratorio

Elemento	Coste (€)
Cubeta	4
electrodos	10
Costo energético	6,4
total	20,4

Tabla A1-1 Coste total

Es importante destacar que este análisis económico proporciona una visión clara de los costos asociados con la investigación realizada, permitiendo una gestión eficiente de los recursos y una planificación adecuada para futuros proyectos de investigación. Además, sirve como referencia para evaluar la viabilidad económica de implementar las técnicas y métodos propuestos en entornos industriales o comerciales en el futuro

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Reflexiones éticas y sociales sobre el tratamiento de aguas residuales y como afecta al medio ambiente:

El tratamiento de aguas residuales es un área crucial que tiene importantes implicaciones éticas y sociales, así como impactos significativos en el medio ambiente. Algunas reflexiones éticas y sociales sobre este tema podrían incluir:

1. **Equidad en el acceso al agua limpia:** Es importante considerar cómo el tratamiento de aguas residuales afecta a comunidades desfavorecidas o marginadas que pueden carecer de acceso a agua limpia y segura. Las decisiones sobre cómo asignar recursos para el tratamiento de aguas residuales deben ser equitativas y considerar las necesidades de todos los sectores de la sociedad.

2. **Impacto en la salud pública:** El tratamiento inadecuado de aguas residuales puede representar riesgos para la salud pública al contaminar fuentes de agua potable y aumentar la propagación de enfermedades transmitidas por el agua. Garantizar un tratamiento adecuado de las aguas residuales es fundamental para proteger la salud y el bienestar de las comunidades.

3. **Conservación del medio ambiente:** El vertido de aguas residuales sin tratar puede tener graves impactos ambientales, incluida la contaminación de ríos, lagos y océanos, y la degradación de los ecosistemas acuáticos. El tratamiento adecuado de las aguas residuales es esencial para reducir estos impactos y proteger la biodiversidad y los recursos naturales.

4. **Responsabilidad corporativa:** Las empresas y las industrias que generan grandes cantidades de aguas residuales tienen la responsabilidad ética y social de tratar adecuadamente sus efluentes para minimizar su impacto en el medio ambiente y la comunidad circundante. Esto puede incluir la implementación de tecnologías de tratamiento avanzadas y la adopción de prácticas de producción más sostenibles.

5. **Educación y concienciación:** Fomentar la educación y la conciencia pública sobre la importancia del tratamiento de aguas residuales y sus implicaciones para la salud y el medio ambiente es fundamental. Las campañas de sensibilización pueden ayudar a promover prácticas de gestión del agua más responsables y alentar la participación ciudadana en la protección de los recursos hídricos.