

SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA ELECTROQUÍMICA DE REMOCIÓN DE METALES
PARA EL TRATAMIENTO DE LOS VERTIMIENTOS PROVENIENTES DE LA
INDUSTRIA DE CURTIEMBRES EN VILLAPINZÓN

LINA MARIA REY AVILA

PROYECTO INTEGRAL DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL

DIRECTOR
OSCAR LOMBANA CHARFUELAN
INGENIERO QUÍMICO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre del director

Firma del Director

Nombre

Firma del presidente Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Nombre

Firma del Jurado

Bogotá, D.C. agosto de 2022

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García Peña

Vicerrector Académico de Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada Garcia-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano Facultad de Ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora programa

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág
RESUMEN	9
INTRODUCCIÓN	10
1. OBJETIVOS	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivos específicos	12
2. ELECTROQUÍMICA	13
2.1 Aspectos económicos	13
2.2 Aspectos sociales	14
2.3 Aspectos ambientales	15
3. ELECTROCOAGULACIÓN	17
3.1 Variables críticas	18
3.1.1 <i>pH</i>	19
3.1.2 <i>Densidad de corriente</i>	20
3.1.3 <i>Material de los electrodos</i>	21
3.1.4 <i>Configuración</i>	23
3.1.5 <i>Tiempo</i>	24
3.2 Ventajas y desventajas	25
4. ELECTRO-FENTON	27
4.1 Variables críticas	28
4.1.1 <i>pH</i>	28
4.1.2 <i>Material de los electrodos</i>	29
4.1.3 <i>Temperatura</i>	30
4.1.4 <i>Concentración de reactivos</i>	30
4.1.5 <i>Densidad de corriente</i>	31
4.2 Ventajas y desventajas	31
5. ELECTRODIÁLISIS	33
5.1 Variables críticas	34

7.1.1 <i>Tipo de membrana</i>	34
7.1.2 <i>Corriente límite</i>	35
5.2 Ventajas y desventajas	36
6. INDUSTRIA CURTIEMBRE	37
6.1 Ribera	37
6.2 Curtido	39
6.3 Post-curtido y acabado	40
6.4 Industria curtiembre en villapinzón	43
6.4.1 <i>Marco legal</i>	44
6.4.2 <i>Matriz selección</i>	45
7. CONCLUSIONES	49
8. RECOMENDACIONES	50
9. BIBLIOGRAFÍA	51

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 <i>Celda de electrocoagulación</i>	17
Figura 2 <i>Remoción de Cr (VI) a diferentes densidades de corriente</i>	21
Figura 3 <i>Eficiencia de remoción con diferentes disposiciones de material</i>	23
Figura 4 <i>Configuración</i>	24
Figura 5 <i>Remoción de DQO Vs Tiempo</i>	25
Figura 6 <i>Celda de electro-fenton</i>	27
Figura 7 <i>Eficiencia de remoción de cromo VS tiempo con variación de pH</i>	28
Figura 8 <i>Eficiencia de remoción de cromo VS tiempo con variación de voltaje</i>	31
Figura 9 <i>Celda de electrodiálisis</i>	34
Figura 10 <i>Proceso de ribera</i>	38
Figura 11 <i>Proceso de curtido</i>	39
Figura 12 <i>Post-curtido y acabado</i>	40

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 <i>Resultados de laboratorio en efluentes tratados de la industria galvánica</i>	19
Tabla 2 <i>Reacciones involucradas en electrocoagulación</i>	22
Tabla 3 <i>Ventajas y desventajas de la electrocoagulación</i>	25
Tabla 4 <i>Ventajas y desventajas del electro-fenton</i>	31
Tabla 5 <i>Resultados de remoción de cromo a diferentes valores de voltaje</i>	36
Tabla 6 <i>Ventajas y desventajas de la electrodiálisis</i>	36
Tabla 7 <i>Carga contaminante típica en los efluentes de la industria curtiembre</i>	41
Tabla 8 <i>Caracterización de efluente proveniente de una empresa del sector curtiembre en Villapinzón</i>	43
Tabla 9 <i>Matriz Pugh</i>	46

RESUMEN

La industria curtiembre es uno de los sectores más contaminantes debido a la cantidad de sustancias químicas utilizadas en sus procesos, los volúmenes de agua requeridos en estos y los vertimientos inadecuados que pueden llegar a generar un impacto ambiental significativo a los cuerpos de agua. En Colombia, Villapinzón es uno de los municipios con más cantidad de empresas dedicadas a la producción de cuero, de las cuales menos del 70 % son legales, por ende, la cantidad de agua residual producida en este sector es preocupante dado que es allí donde se da el nacimiento del río Bogotá y la descarga de estas aguas genera alteraciones fisicoquímicas que pueden generar degradación ambiental. Entre los químicos utilizados se encuentran las sales de cromo como agentes curtientes las cuales logra frenar la descomposición o degradación de la piel y así transformarla en cuero mediante la estabilización de las fibras de colágeno con agentes curtientes, de este proceso y debido a que el cromo no se fija totalmente a la piel, se descargan aguas con concentraciones de cromo que puede ser tóxico para el ecosistema.

El siguiente documento presenta una recopilación de información enfocado en el tratamiento de aguas residuales industriales por medio de métodos electroquímicos que permitan un porcentaje de remoción de metales y posterior selección de la tecnología más adecuada aplicada a la industria curtiembre en el sector de Villapinzón. Las tecnologías que se escogieron fueron electrocoagulación, electrofenton y electrodiálisis dado que son las más comunes y las que mejores resultados presentan en la remoción de contaminantes aplicadas a diferentes industrias.

Se describen los fundamentos teóricos de cada tecnología, sus variables de mayor importancia según estudios de caso aplicados a diversos sectores industriales, principalmente los que incluyan en sus vertimientos sustancias complejas entre los que se encuentran metales pesados, y ventajas y desventajas. Finalmente, se obtuvo como resultado de la investigación y por medio de una evaluación multicriterio con ayuda de una matriz Pugh que, la tecnología electroquímica más adecuada para la remoción de metales pesados provenientes de las aguas residuales de la industria curtiembre es la electrocoagulación debido a que presenta ventajas en cuanto a eficiencia de remoción, costos y condiciones de operación en comparación con el electrofenton y la electrodiálisis

Palabras claves: Electroquímica, Electrocoagulación, Electrodiálisis, Electro-fenton, Curtiembres

INTRODUCCIÓN

El agua como una de las fuentes principales de vida es un recurso que con el pasar de los tiempos y por el acelerado crecimiento de la población se considera un motivo de preocupación dado el inadecuado manejo a nivel doméstico e industrial. La contaminación de agua, de suelos y del aire se deben principalmente a acciones antropogénicas. Según el informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos (2021, p.3), se estima que el 80% de las aguas residuales se vierten a las fuentes hídricas sin un tratamiento adecuado, además por la demanda de agua dulce y la relación que existe con el agua salada en el planeta, es necesario la implementación de tecnologías que permitan la descontaminación de estas corrientes, ya que de estas dependen diversos procesos vitales para la supervivencia de las especies y el equilibrio ambiental.

La industrialización y la sociedad de consumo son factores que aumentan la demanda de agua; sin embargo, después de su uso estas son desechadas muchas veces sin cumplir con los parámetros fisicoquímicos exigidos por la ley, provocando contaminación excesiva de las fuentes hídricas, que posteriormente provocará un déficit en el agua disponible para actividades económicas, ambientales y humanas. Asimismo, la contaminación y el calentamiento global tiene un impacto directo en el agua, puede provocar más sequías, problemas socioeconómicos y en la salud pública. La adecuada depuración o potabilización de aguas residuales aporta no solo a la sostenibilidad ambiental, sino al beneficio económico por medio de la reutilización del agua generada. (Rao, Y. et al., 2018)

Una de las industrias que generan una amplia gama de contaminantes en sus vertimientos es la industria curtiembre, entre los que se destacan metales pesados y otros compuestos tóxicos que pueden generar degradación ambiental, por ende, este documento busca encontrar una tecnología viable para la remoción de estos contaminantes difíciles de separar por procesos convencionales. Una alternativa viable para la remoción de contaminantes provenientes de las aguas residuales industriales lo provee la electroquímica, en donde por medio de reacciones asistidas por electricidad, se logra una remoción de contaminantes más eficiente. Además, los parámetros de operación hacen el proceso más económico al trabajar a condiciones ambiente, hay una disminución en los residuos generados y no se hace uso de reactivos químicos adicionales, lo que a su vez contribuye a la seguridad del personal. (Díaz, 2014, p.5)

Las reacciones que intervienen en el proceso son las comúnmente llamadas reacciones redox, en donde por medio de un diferencial de potencial se da un intercambio de electrones entre dos especies, una se reduce y la otra se oxida (Pavas, 2012, p.4), dichas reacciones ocurren dentro de una celda y son las que permiten la separación de los contaminantes presentes en el agua. Entre las ventajas de la electroquímica se encuentra la alta versatilidad, es decir, es posible aplicar estas tecnologías a diversas fuentes de contaminantes.

Existen diversas técnicas electroquímicas; sin embargo, en este documento se hablará de las técnicas más relevantes implementadas en aguas residuales industriales como lo son la electrocoagulación, electro-fenton y electrodiálisis.

La electrocoagulación es una técnica que consiste en la generación de coagulante *in situ* a partir de dos placas de metal (electrodos) usualmente aluminio o hierro, conectadas entre sí y sumergidas en el agua residual, en donde por medio del diferencial de potencial se generan iones en disolución, los cuales permiten la desestabilización de moléculas, agrupación de estas y posterior separación. (Pavas, 2012, p.6)

Electro-fenton se fundamenta en la generación de agentes oxidantes de la materia. El reactivo fenton es una mezcla de peróxido de hidrógeno y sales ferrosas que dan lugar a la producción de radicales hidroxilos, dichos reactivos se generan dentro de la celda electrolítica lo que hace el proceso más eficiente comparándolo con el proceso fenton convencional. (Curo et al., 2020, p.7)

Y finalmente, la electrodiálisis es un proceso de separación que usa membranas selectivas que permite separar iones disueltos en una solución acuosa por medio de un campo eléctrico generado por dos electrodos conectados entre sí, dichas membranas se encuentran entre los electrodos y son las encargadas de permitir el intercambio aniónico y catiónico, es decir, una membrana permite el paso de iones con carga positiva y la otra permite el paso de iones con carga negativa, la diferencia de potencial permite que los iones se concentren en los extremos de la celda, de este modo, en los compartimentos intermedios se van disminuyendo la concentración de iones. (Nuñez et.al., 2018).

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general

Seleccionar la tecnología electroquímica de remoción de metales en el tratamiento de los vertimientos provenientes de la industria de curtiembres de Villapinzón.

1.2 Objetivos específicos

- Revisar el estado del arte de las tecnologías electroquímicas para la remoción de metales en diferentes vertimientos industriales.
- Establecer los principales aspectos técnicos, operativos y ambientales a considerar en la implementación de tecnologías electroquímicas para la remoción de metales en vertimientos según estudios de caso respecto a los contaminantes encontrados en las aguas residuales de curtiembres en Villapinzón.
- Desarrollar una matriz de decisión para la escogencia de la tecnología electroquímica para el tratamiento de vertimientos provenientes de la industria de curtiembres en Villapinzón.

2. ELECTROQUÍMICA

La electroquímica es una rama de la química que estudia las reacciones de oxido-reducción (Redox) asistidas por electricidad, así mismo, procesos, diseño de equipos y condiciones de operación en donde se vean involucradas dichas reacciones. Las técnicas electroquímicas a lo largo del tiempo se han empleado en diferentes aplicaciones industriales como: remediación de suelos, electrosíntesis, electrorefinado, tratamiento de efluentes líquidos y gaseosos, entre otros (Díaz, 2014, p.4).

En el tratamiento de efluentes líquidos como aguas residuales, las técnicas electroquímicas más utilizadas son la electrocoagulación, la electrooxidación y la electrodiálisis que, por su alta eficiencia en remoción de contaminantes, condiciones de operación, flexibilidad y bajo consumo de químicos adicionales, son alternativas económicamente viables para este propósito (Merma, et al, 2020, p.15165).

Las aguas residuales dependiendo de su uso previo pueden estar clasificadas como aguas residuales domésticas, industriales o agrícolas (Ruiz, 2017, p.32) , y pueden estar contaminadas con diversas sustancias que sin un adecuado tratamiento pueden impactar de manera negativa el ecosistema y a su vez repercutir en la salud de diversas especies incluidos los seres humanos, además de contribuir a la degradación ambiental; por ende, es necesario buscar alternativas que permitan un tratamiento de efluentes apropiado con el fin de disminuir la contaminación ambiental producida por el mal vertimiento de aguas residuales a las fuentes hídricas.

Para evaluar la viabilidad y efectividad de los procesos se tienen en cuenta factores económicos, sociales y ambientales.

2.1 Aspectos económicos

Los procesos electroquímicos aplicados al tratamiento de aguas residuales resultan viables económicamente teniendo en cuenta que son procesos que no requieren químicos adicionales, ya que las reacciones y separaciones se dan a partir de electricidad dentro de una celda electroquímica,

si bien es cierto que los electrodos pueden sufrir desgastes después de determinado tiempo, el cambio de este sigue siendo aún más económico que la adición de productos que faciliten la separación de contaminantes. Además, estos procesos presentan porcentajes de remoción relativamente altos lo que es una posibilidad de reaprovechamiento de los efluentes disminuyendo costos por servicios de agua adicional como por ejemplo, en el caso de Gutiérrez, et al. (2009) en donde proponen la reutilización de efluentes de industria textil teniendo en cuenta el elevado consumo de agua que requieren para sus procesos y que los tintes usados son difíciles de eliminar por métodos convencionales, implementan un tratamiento acoplado técnicas electroquímicas y un posterior tratamiento biológico que permita usar el efluente en los baños de lavado, incluso acoplado de manera adecuada los procesos, se podría potabilizar el agua en ciertos casos. El costo de operación del proceso depende del costo de la energía eléctrica del sector en donde se va a establecer la planta de tratamiento, es decir, que en algunos casos el proceso puede disminuir su viabilidad por el aumento en dichos costos; sin embargo, se puede estudiar la posibilidad de trabajar con energías renovables haciendo procesos autosostenibles por ejemplo con el aprovechamiento de la energía eólica o fotovoltaica, lo que implica un aprovechamiento de recursos y por ende una disminución de costos de operación. Otro factor importante es la recuperación de compuestos que pueden proporcionar un valor adicional a las industrias, esta y otras posibilidades hacen de estas técnicas una opción de tratamiento de aguas apta sin contar con el sencillo diseño y los relativamente económicos materiales de construcción, además de trabajar a condiciones ambientales, lo que puede disminuir costos en equipos.

2.2 Aspectos sociales

La buena calidad del agua no es un tema que solamente es importante en las industrias, como bien se sabe, de esta dependen muchos factores sociales como la salud pública y la seguridad alimentaria, por ejemplo como lo menciona la OMS (2019) diversas enfermedades pueden ser contraídas por el mal saneamiento de las aguas con las que se abastecen los hogares, debido a que en muchos casos esta no solo es usada en las labores de lavado y desinfección, sino para cocinar los alimentos e incluso directamente para beber. Muchas de estas aguas están contaminadas con metales pesados, productos químicos o microorganismos que con una exposición prolongada pueden generar enfermedades como diarrea, hepatitis, a largo plazo puede producir fallos en los

órganos e incluso cáncer lo que posteriormente puede conducir a la muerte. Debido a que en muchos casos las plantas que abastecen de este recurso a la población son tratadas de efluentes industriales, se debe asegurar que estas cumplan con todos los parámetros fisicoquímicos establecidos por la ley sin incurrir en aumentos elevados de costos de operación. Además, con el aumento acelerado de la población y el requerimiento de agua potable para abastecer a esta, es necesario buscar alternativas que permitan la potabilización de efluentes rápida y eficaz, en muchos casos con un adecuado acoplamiento de operaciones y procesos, las técnicas electroquímicas pueden constituir una alternativa viable para potabilizar aguas provenientes del sector urbano e industrial a bajo costo.

2.3 Aspectos ambientales

La degradación ambiental es un tema que nos concierne a todos y algunas veces no se le da la importancia que requiere. Las aguas residuales industriales y domésticas arrojadas a las fuentes hídricas sin un tratamiento adecuado pueden llegar a generar impactos negativos que pueden volverse irreversibles con el paso del tiempo.

Además, como lo dice la UNESCO en el informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos (2021, p.2) la disponibilidad del agua en los sistemas de agua subterráneas se están agotando y el estrés constante de los recursos hídricos en unos años puede constituir un motivo de preocupación para la población, por ende, aparte de generar un impacto económico, la reutilización de las aguas residuales genera una disminución en la captación directamente de las fuentes hídricas y un tratamiento adecuado puede minimizar las afectaciones medioambientales que actualmente causan contaminantes como metales pesados, aceites y grasas, compuestos orgánicos e inorgánicos que no son biodegradables, entre otros.

Ejemplificando lo anteriormente dicho, Rubí Juárez (2016) describe la problemática asociada al vertimiento de aguas residuales oleosas, entre los impactos ambientales se encuentran las películas de aceite que se forman sobre el agua impidiendo el paso de oxígeno afectando los seres vivos que puedan estar presentes en el medio y así mismo dificultando el paso de luz que evita que la fotosíntesis se dé adecuadamente. Otra problemática que puede afectar los medios es la

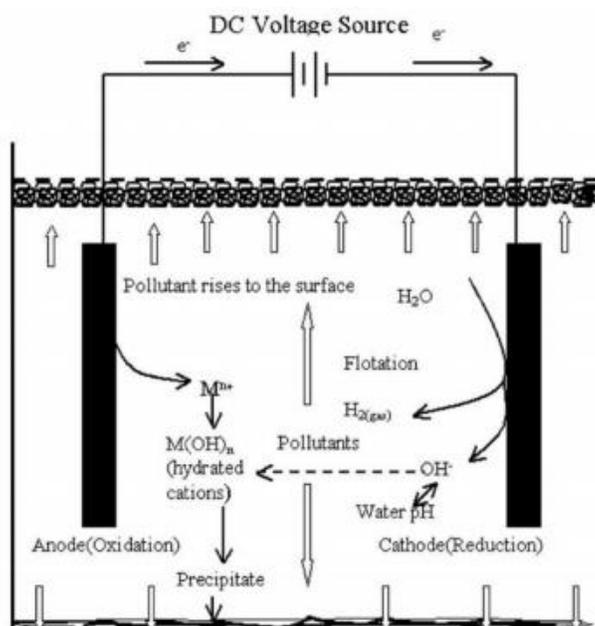
eutrofización o exceso de nutrientes lo que provoca un aumento en el crecimiento acelerado de plantas u organismos que consumen el oxígeno disuelto en el agua causando muerte de los peces, entre otros compuestos contaminantes que pueden aumentar la toxicidad de las corrientes hídricas y afectar negativamente la fauna y flora presente en los ecosistemas. Además, “el aumento de las temperaturas globales ha provocado el derretimiento de los glaciares y eventualmente reduciría los recursos generales de agua dulce, agravando la situación de escasez de agua” (Rao, et al, 2018) por esto, cualquier aporte a la minimización del impacto ambiental generado por las industrias puede ser de gran ayuda en un futuro.

3. ELECTROCOAGULACIÓN

La electrocoagulación es una técnica electroquímica que se caracteriza por su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales provenientes de diversos sectores, además de ser una tecnología segura y amigable con el medio ambiente (Ramcharan & Bissessur, 2017, p.184), la cual se fundamenta en la producción *in situ* de coagulantes por medio de reacciones asistidas por electricidad, estas reacciones se dan en una celda de electrocoagulación (Figura 1) a determinadas condiciones de pH, densidad de corriente, conductividad del efluente, entre otras y teniendo en cuenta parámetros de diseño como material de los electrodos y configuración de estos para lograr un porcentaje de remoción óptimo en un tiempo determinado.

Figura 1

Celda de electrocoagulación



Nota. Diagrama esquemático de una celda de electrocoagulación. Tomado de: Ruiz, P. (2017). Prototipo de una celda de electrocoagulación abastecida con energía fotovoltaica para tratamiento de aguas residuales en la industria minera [Trabajo de grado], Corporación Universitaria Minuto de Dios) https://repository.uniminuto.edu/bitstream/handle/10656/5304/TIND_RuizBelloPablo_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

En la **Figura 1** se muestra un esquema general de una celda de electrocoagulación que consta de dos electrodos conectados entre sí a una fuente de energía eléctrica y sumergidos en un medio acuoso (agua residual), en la cual se evidencian los productos de las reacciones involucradas y operaciones secundarias como precipitación y floculación. Las reacciones de oxido-reducción se basan en la transferencia de electrones, en el caso de la celda de electrocoagulación, la oxidación se da en el ánodo y la reducción en el cátodo (Arturi et al., 2019). Los electrodos generalmente están hechos de aluminio o hierro y dependiendo del material se producirán los coagulantes dentro de está por generación de iones metálicos y su posterior transformación en hidróxidos insolubles, finalmente, estos atrapan los contaminantes presentes en el agua y al tener una masa lo suficientemente pesada se separarán por precipitación, además, los gases producidos permiten que las burbujas asciendan arrastrando parte de los contaminantes y por flotación formarán una película sobre el agua que fácilmente podrá ser retirada (Correa et al., 2018, p.115), por ende, se considera una técnica viable para el tratamiento de aguas residuales que tiene diversas ventajas en cuanto a la eficiencia de remoción, disminución en costos por adición de productos químicos, disminución en la producción de lodos y la flexibilidad de las aplicaciones ya que estudios realizados por diversos autores afirman que la electrocoagulación permite un alto porcentaje de remoción de compuestos complejos que no son fácilmente separables por métodos convencionales como lo son: tintes generados en la industria textil, metales pesados en la industria curtiembre, fluidos de perforación en la industria petrolera, entre otros.

3.1 Variables críticas

Los parámetros de operación de un proceso están directamente relacionados con la eficiencia de este; por ende, es importante determinar las condiciones óptimas para que el proceso de como resultado mejores rendimientos. A continuación, se encuentra la influencia que tiene el pH, la densidad de corriente, el material de los electrodos, configuración y el tiempo de residencia en la electrocoagulación aplicada al tratamiento de aguas residuales.

3.1.1 pH

El pH es uno de los parámetros más influyentes debido a que afecta directamente la conductividad del medio acuoso, es decir, dependiendo de los iones que se encuentren en solución, la conductividad aumenta y se define la eficiencia de remoción. Además, las propiedades de los coagulantes varían dependiendo de este parámetro (Igwegbe, et al., 2021, p. 5). Igualmente, como lo expone Moussavi (2021, p.3) de este parámetro depende la generación de especies en la electrocoagulación y es importante determinar el pH óptimo para evitar la producción de compuestos que no aporten y en cambio puedan disminuir la eficiencia del proceso. Se encuentra que las condiciones de pH idóneas para favorecer la producción de coagulantes *in situ* se encuentran en medios ácidos cercanos al neutro teniendo en cuenta que a estas condiciones se favorece la producción de compuestos que contienen carga positiva los cuales son coagulantes más efectivos, por el contrario, a pH un poco más elevados se favorece la producción de compuestos con carga negativa los cuales no actúan como coagulantes. Como lo demuestra Vilela, et al. (2021) en su estudio Aplicación de la electrocoagulación en la eliminación de los metales pesados en los efluentes galvánicos en donde presenta los porcentajes de remoción de cromo, níquel, zinc y cobre a diferentes condiciones, se encuentra que a pH de 6 se logra una remoción de más del 85% y a medida que el pH aumenta, la eficiencia de remoción disminuye (Tabla 1).

Tabla 1

Resultados de laboratorio en efluentes tratados de la industria galvánica

Muestra	pH	Voltaje (voltios)	dens. corriente (Amp/m ²)	% remoc. Cr	% remoc. Cu	% remoc. Ni	% remoc. Zn
M1	6	6	13	89.8%	92.5%	90.7%	86.8%
M2	6	6.5	15	94.0%	94.6%	94.8%	92.6%
M3	6	7	17	96.2%	96.4%	95.3%	96.5%
M4	6	7.5	19	96.8%	98.1%	96.6%	98.1%
M5	8	6	13	71.0%	89.4%	81.5%	84.7%

Tabla 1. (Continuación)

M6	8	6.5	15	88.3%	93.1%	91.7%	92.8%
M7	8	7	17	89.9%	93.6%	95.5%	94.6%
M8	8	7.5	19	93.6%	96.7%	96.3%	96.4%
M9	10	6	13	38.1%	80.1%	45.4%	49.8%
M10	10	6.5	15	47.6%	81.4%	62.4%	55.3%
M11	10	7	17	64.3%	84.0%	73.5%	61.8%
M12	10	7.5	19	71.4%	87.6%	79.3%	70.7%

Nota. Porcentajes de remoción de metales pesados en efluentes de la industria galvánica a diferentes condiciones. Tomado de: Vilela, E. L., & Rojas, V. A. (2021). Aplicación de la electrocoagulación en la eliminación de los metales pesados en los efluentes galvánicos. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 24(48), 109-115.

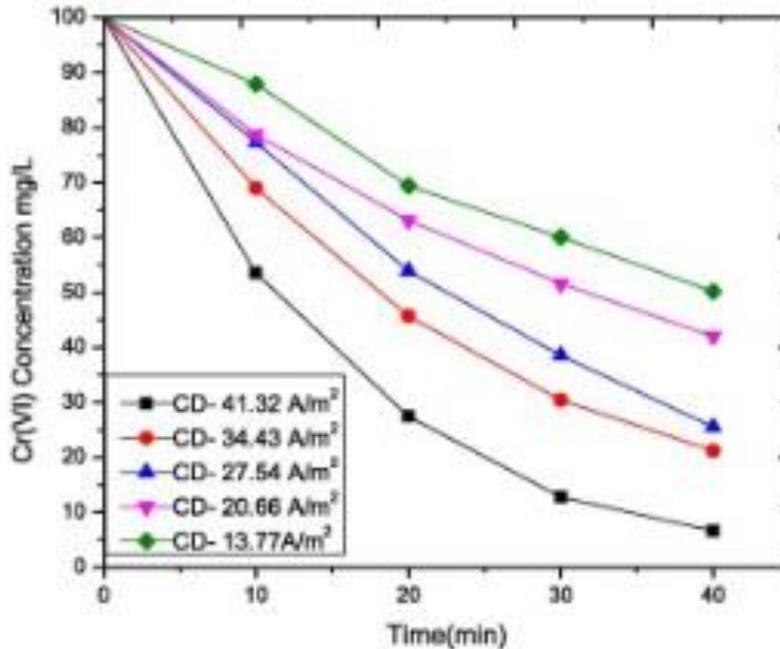
3.1.2 Densidad de corriente

La densidad de corriente es un parámetro que está asociado con la producción de coagulante, en general el porcentaje de remoción aumenta conforme aumenta la densidad de corriente debido a que según la ley de Faraday “la cantidad de cualquier elemento (radical o grupo de elementos) liberada ya sea en el cátodo o en el ánodo durante la electrólisis, es proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa la solución” (Pérez, 2016, p. 28), es decir, que la disociación del ánodo de sacrificio y por consiguiente la dosificación del coagulante está directamente relacionada con la densidad de corriente aplicada a la celda electroquímica. Además, contribuye a la formación de burbujas lo que a su vez ayuda a aumentar la separación de contaminantes por flotación.

Esto, demostrado por diversos autores entre los que se encuentran Sunil et al. (2020, p. 7038), quienes realizan un estudio de remoción de cromo (IV) mediante metodología de superficie de respuesta en donde aplica densidades de corriente de 13.77 A/m², 20.66 A/m², 27.54 A/m², 34.43 A/m² y 41.32 A/m², y encuentra que a medida que aumenta esta variable, el porcentaje de remoción es más alto como se muestra a continuación (**Figura 2**)

Figura 2

Remoción de Cr (VI) a diferentes densidades de corriente



Nota. Evaluación del cambio en la concentración de cromo (VI) a diferentes valores de densidad de corriente. Tomado de: Sunil R. Patel, Sachin P. Parikh. (2020). Statistical optimizing of electrocoagulation process for the removal of Cr (VI) using response surface methodology and kinetic study, Arabian Journal of Chemistry. 13 (9),7032-7044.

3.1.3 *Material de los electrodos*

La electrocoagulación es un proceso que consiste en la disolución de electrodos metálicos en un medio acuoso por medio de la aplicación de una corriente eléctrica para posteriormente formar hidróxidos metálicos que permitan desestabilizar moléculas y permitir su separación por precipitación o flotación (Cruz, et al., 2019, p. 3); por ende, el metal usado definirá los coagulantes formados durante el proceso y por ende la eficiencia de este, por tal motivo el material de los electrodos es un parámetro de diseño que determina las reacciones que se verán involucradas dentro de la celda y así mismo determinarán el rendimiento de la electrocoagulación. Según diversos estudios los materiales más usados en esta técnica de separación son el aluminio y el hierro por su costo, disponibilidad y eficiencia de remoción de los complejos formados. A continuación, se presentan las reacciones que se dan a cabo al interior de la celda electroquímica para los dos materiales mencionados anteriormente (**Tabla 2**) y su influencia en el proceso.

Tabla 2*Reacciones involucradas en electrocoagulación*

Electrodo de aluminio	Electrodo de hierro
Ánodo: $Al_{(s)} \rightarrow Al_{(aq)}^{3+} + 3e^{-}$ $Al_{(aq)}^{3+} + 3OH_{(aq)}^{-} \rightarrow Al(OH)_{3(s)}$	Ánodo: $Fe_{(s)} \rightarrow Fe_{(aq)}^{2+} + 2e^{-}$ $Fe_{(aq)}^{2+} + 2OH_{(aq)}^{-} \rightarrow Fe(OH)_{2(s)}$
Cátodo: $3H_2O_{(l)} + 3e^{-} \rightarrow \frac{3}{2}H_{2(g)} + 3OH^{-}$	Cátodo: $2H_2O_{(l)} + 2e^{-} \rightarrow H_{2(g)} + 2OH_{(aq)}^{-}$

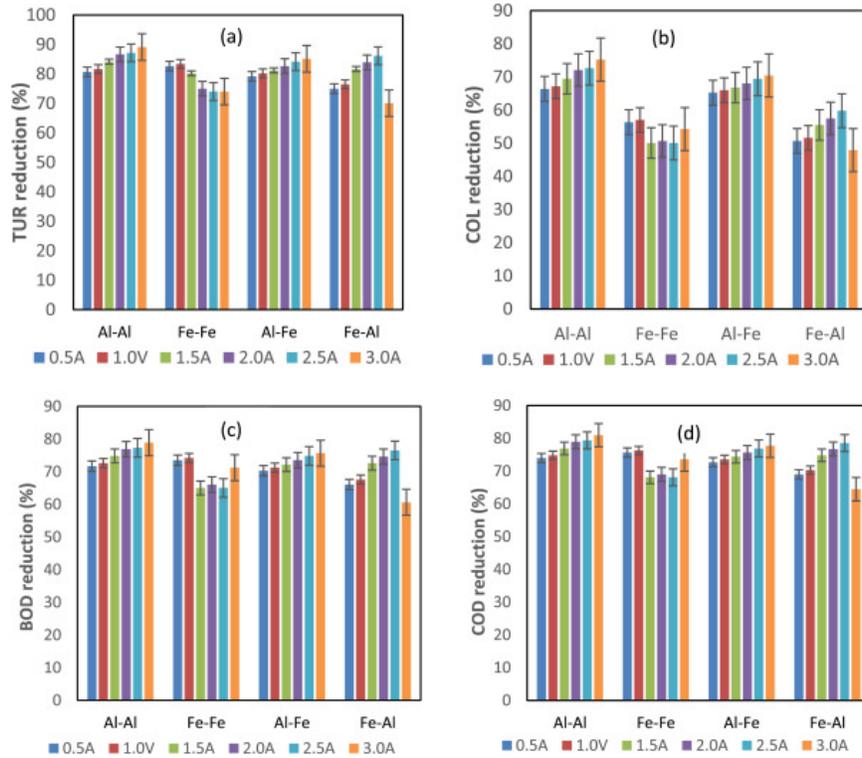
Nota. Reacciones en el ánodo y cátodo según el material de los electrodos. Tomada de: Igwegbe, C. A., Onukwuli, O. D., Ighalo, J. O., & Umembamalu, C. J. (2021). Electrocoagulation-flocculation of aquaculture effluent using hybrid iron and aluminium electrodes: A comparative study. *Chemical Engineering Journal Advances*, 6, 100107.

Como se mencionó anteriormente, por las ventajas que tienen, los materiales más usados en las técnicas electroquímicas son el aluminio y el hierro; sin embargo, se debe tener en cuenta que su eficiencia también se ve afectada por los contaminantes presentes en el agua. Los electrodos pueden estar dispuestos de diferentes maneras, por ejemplo: ánodo y cátodo de hierro, ánodo y cátodo de aluminio o una combinación de ellos.

Como se muestra en la **Figura 3** para agua residual provenientes del sector acuicultor, se realiza el análisis de eficiencia según la disposición de esta y se encuentra que la mejor combinación de material de electrodo teniendo en cuenta la eficiencia de remoción en los 4 parámetros se da utilizando ánodo y cátodo de aluminio (Igwegbe, et al., 2021, p. 5), aunque cabe aclarar que la eficiencia de la remoción de contaminantes es específica para cada proceso dependiendo de los compuestos presentes en esta.

Figura 3

Eficiencia de remoción con diferentes disposiciones de material



Nota. Evaluación de parámetros con diferentes combinaciones de materiales de electrodos. Tomado de: Igwegbe, C. A., Onukwuli, O. D., Ighalo, J. O., & Umembamalu, C. J. (2021). Electrocoagulation-flocculation of aquaculture effluent using hybrid iron and aluminium electrodes: A comparative study. *Chemical Engineering Journal Advances*, 6, 100107.

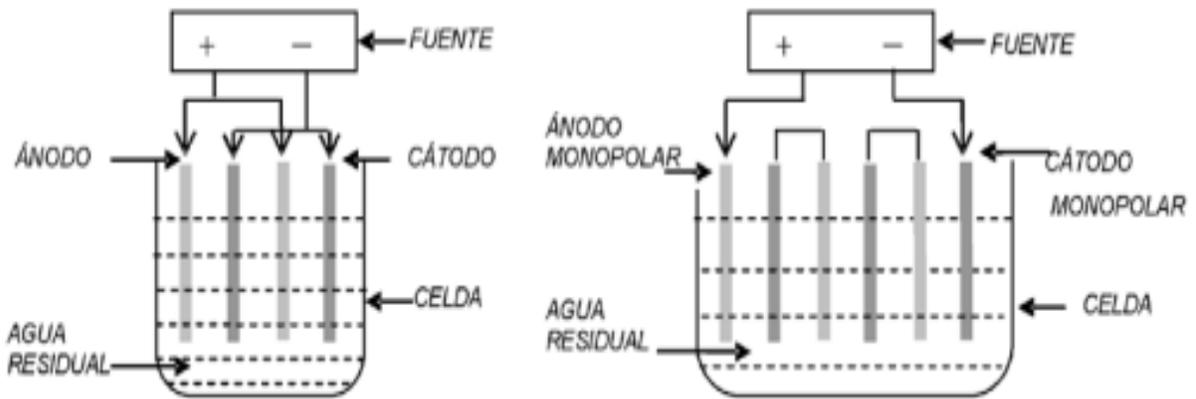
3.1.4 Configuración

El número de placas presentes en la celda influye en la dosificación del coagulante, a mayor número de placas, mayor cantidad de iones metálicos en el medio. Además, la configuración del electrodo también es un parámetro influyente en el proceso. En general las configuraciones pueden ser monopolar y bipolar. En el estudio realizado por Khaled, et al.(2019) para la remoción del cadmio se encontró que con una configuración bipolar se aumenta la eficiencia; sin embargo, se aumentan a su vez los costos debido a que el consumo de energía eléctrica en comparación con los de la configuración monopolar son altos en gran medida, esto puede explicar por qué en la mayoría de casos estudiados se encontró que trabajan con una configuración monopolar, ya que la

diferencia en eficiencia no supera el 5% y los consumos de energía son más del triple . La diferencia en las configuraciones radica en la conexión: la configuración monopolar trabaja conectada en paralelo y la configuración bipolar se encuentra conectada en serie como se muestra en la **Figura 4**.

Figura 4

a) *Configuración monopolar*, b) *Configuración bipolar*



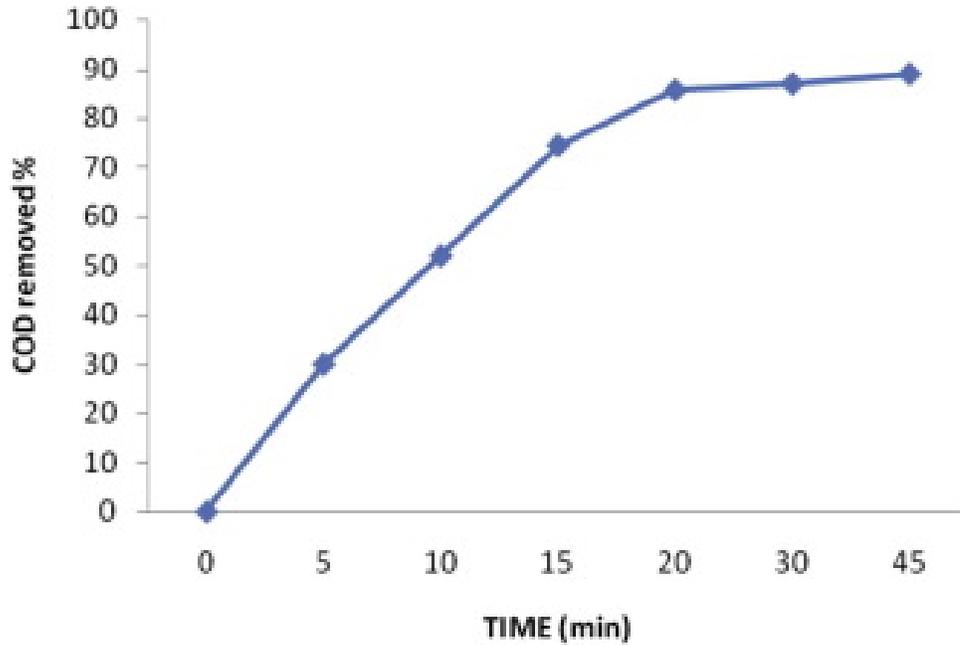
Nota. Tipos de celdas de electrocoagulación Tomado de: Restrepo, A., Arango, A., Garces, L. (2006). La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Producción + Limpia. 1. (2)

3.1.5 *Tiempo*

El tiempo de operación influye directamente en la producción del coagulante, a mayor tiempo en el proceso la remoción de contaminantes tiende a aumentar; sin embargo, después de un punto la diferencia en la eficiencia es insignificante y provocaría un aumento en los costos por energía eléctrica como se observa en la **Figura 5** en donde Elnenay, et al. (2017, p.3) realiza el estudio para un agua asociada con actividades del sector petrolero . Este parámetro puede ser específico para cada proceso debido que las aguas residuales pueden tener diferente carga contaminante comparada con otras, en caso de que se presente mayor carga contaminante el proceso requerirá más iones metálicos; por ende, más tiempo de operación (Hernández, et al., 2019, p.61). Además de los contaminantes presentes en el agua, los materiales de los electrodos y la densidad de corriente aplicada a la celda también son parámetros que influyen en el tiempo del proceso.

Figura 5

Remoción de DQO Vs Tiempo



Nota. comportamiento del porcentaje de remoción de DQO a lo largo del tiempo. Tomado de: Elnenay, A. M. H., Nassef, E., Malash, G. F., & Magid, M. H. A. (2017). Treatment of drilling fluids wastewater by electrocoagulation. Egyptian Journal of Petroleum, 26(1), 203-208.

3.2 Ventajas y desventajas

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se determinaron factores técnicos positivos y negativos que pueden llegar a afectar el proceso los cuales se presentan en la **Tabla 3**

Tabla 3

Ventajas y desventajas de la electrocoagulación

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Posibilidad de automatizar y adaptar el proceso a áreas en donde no haya acceso a electricidad por medio de paneles solares	Debido a la disolución del ánodo de sacrificio es necesaria su reposición con regularidad
No requiere uso de productos químicos adicionales	Los lodos contienen alta concentración del material usado como electrodo de sacrificio

Tabla 4 (Continuación)

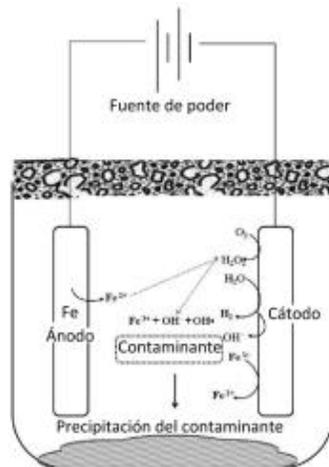
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Hay generación de burbujas lo que facilita la remoción de contaminantes en la superficie	Dependiendo de la región en la cual se implemente el proceso pueden aumentar los costos debido al costo de la energía eléctrica
Remueve una amplia gama de contaminantes	Puede haber formación de una película de óxido en el ánodo lo cual disminuye la eficiencia del proceso
Por su fácil instalación, no requiere obras civiles importantes	
Menor producción de lodos	
Los costos de operación son menores en comparación a convencionales	
Equipos simples y de fácil operación	

Nota. Adaptado de: Camargo, P. (2015). Remoción de metales pesados presentes en aguas residuales a través del proceso de electrocoagulación. Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales. Universidad Militar Nueva Granada. <https://acortar.link/LbBtPy> & Arango, A., Restrepo, A., Garces, L. (2006). La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. Producción + Limpia.. 1 (2);

4. ELECTRO-FENTON

El electro-fenton es un tipo de proceso de oxidación avanzada que consiste en la reacción del reactivo fenton ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{Fe}^{2+}$) en una celda electrolítica para dar lugar a la generación de radicales hidroxilos altamente oxidantes. La implementación de la electroquímica en el proceso fenton se basa, como se muestra en la **Figura 6**, en la electrogeneración *in situ* de los reactivos involucrados, esto se logra conduciendo corriente eléctrica a través de dos electrodos conectados entre sí y sumergidos en una solución a pH ácido (Díaz, 2014, p.199). El proceso se puede dar por medio de la generación de H_2O_2 y adición externa de Fe^{2+} , generación de Fe^{2+} y adición de H_2O_2 , o incluso la generación de ambos reactivos dentro de la celda. Esto permite el tratamiento de aguas residuales industriales que contengan sustancias complejas y difíciles de separar por medio de tecnologías convencionales, la eficiencia de remoción de estas está dada por variables críticas entre las que se encuentran el pH, densidad de corriente, temperatura, tiempo, concentración de reactivos y oxígeno presente. (Curo, 2020, p.8) Al igual que las demás tecnologías electroquímicas, esta permite trabajar en condiciones ambiente lo que hace el proceso más económico.

Figura 6
Celda de electro-fenton



Nota. Diagrama esquemático de una celda de electro-fenton. Tomado de: Díaz, C. E. B. (2014). Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales. Reverte.

4.1 Variables críticas

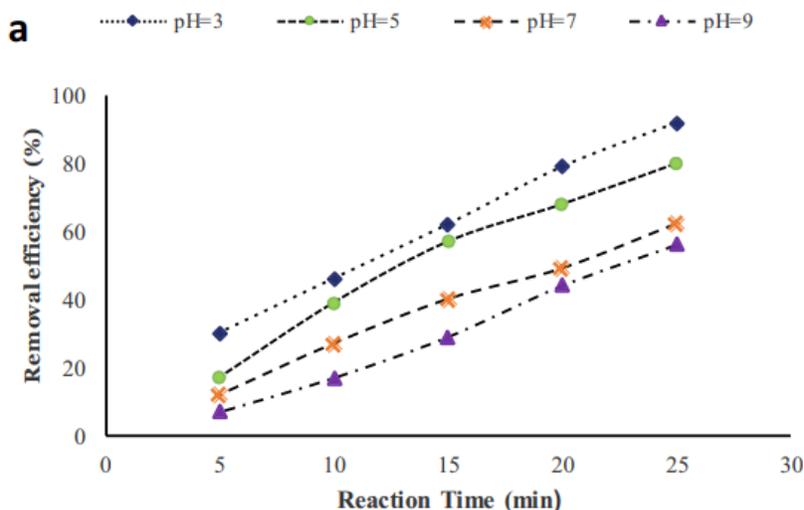
La tasa de remoción de contaminantes depende de los parámetros a los cuales funciona la celda electroquímica. A continuación, se presentan las variables más influyentes en la eficiencia del proceso

4.1.1 pH

El pH de la solución es uno de los parámetros de control más importantes en el proceso. Diversos autores afirman que para obtener un porcentaje de remoción óptimo la solución debe tener un pH ácido cercano a 3, ya que de lo contrario se producirían resultados indeseables como descomposición del peróxido de hidrógeno, reducción de la concentración de Fe^{+2} y por consiguiente menor generación de radicales hidroxilos (Curo, 2020, p.8; Díaz 2014, p.197). Esto se puede evidenciar en el estudio realizado por Rahmani, et al. (2015, p.422) en donde estudia la remoción de cromo (IV) de una solución acuosa por medio de electro-fenton, dicho autor analiza el efecto de algunos parámetros de importancia para el proceso entre los que se encuentran el pH, realiza el experimento a valores de pH inicial igual a 3, 5, 7 y 9, y como se muestra en la **Figura 7** la eficiencia disminuye a medida que el pH aumenta y comprueba que el valor óptimo se encuentra en $\text{pH} = 3$.

Figura 7

Eficiencia de remoción de cromo VS tiempo con variación de pH

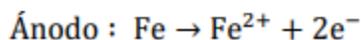
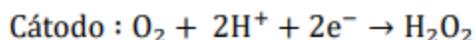


Nota. Evaluación de la eficiencia de remoción de cromo a diferentes valores de pH. Tomado de: Rahmani, A. reza, Hossieni, E., & Poormohammadi, A. (2015). Removal of Chromium (VI) from Aqueous Solution Using Electro-Fenton Process. *Environmental Processes*, 2(2), 419–428. doi:10.1007/s40710-015-0068-4

4.1.2 Material de los electrodos

Existen diversos materiales usados en procesos electrolíticos. Específicamente como lo menciona Brillas, et al. (2009, p.6579) para el electrofenton, los materiales usualmente empleados para el cátodo son grafito, carbón vítreo reticulado (RVC), fibra de carbón activado, entre otros, esto, debido a que el carbono presenta ventajas comparado con el uso de otros cátodos como baja actividad catalítica en la descomposición del peróxido de hidrógeno, buena estabilidad, conductividad y resistencia química. Para el ánodo se emplea grafito, hierro, platino, acero inoxidable, diamante dopado con boro, entre otros, sin embargo, una forma para lograr la electrogeneración del reactivo fenton y por ende hacer el proceso más seguro al evitar el uso de reactivos químicos adicionales, es usar el hierro como material anódico para que, por medio de disolución de este, se libere *in situ* iones Fe^{2+} y cátodo de carbón vítreo o grafito teniendo en cuenta las características de estos. (Díaz, 2014, p.199)

Como se muestra en la **Figura 6** y como lo explica Cuero (2020, p.6), las principales reacciones que se dan en el proceso son:

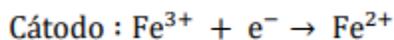


En primer lugar, se evidencia la producción de los reactivos involucrados en el proceso fenton. Como se mencionó anteriormente, el Fe^{2+} puede ser generado dentro de la celda en caso de utilizar el ánodo de hierro por disolución de este, adicionalmente en el cátodo por reducción del oxígeno se produce peróxido de hidrógeno.

En segundo lugar, se da la producción del radical hidroxilo por reacción del ion Fe^{2+} y el peróxido de hidrógeno como se muestra en la siguiente ecuación.



Por otro lado, como se muestra a continuación, en el cátodo también se da la regeneración del Fe^{3+} por la reducción de este en Fe^{2+} lo que permite una reacción en cadena y por ende mayor eficiencia en el proceso



4.1.3 Temperatura

En general la temperatura puede ser un factor determinante en la eficiencia de los procesos, en este caso, encontramos que, aunque al aumentar la temperatura hay un aumento en la transferencia de masa, esto podría provocar un efecto negativo en el sistema teniendo en cuenta que habría una disminución del oxígeno disuelto y por ende menor generación de peróxido de hidrógeno, a su vez, la degradación de este compuesto se facilita a medida que aumenta la temperatura. Por ende, diversos autores afirman que la temperatura óptima para lograr una eficiencia considerable es a temperaturas ambiente con un rango de 20°C a 30°C , sin embargo, cabe aclarar que la temperatura óptima del proceso puede ser específica para cada contaminante a remover (Nidheesh, et al., 2012, p.7)

4.1.4 Concentración de reactivos

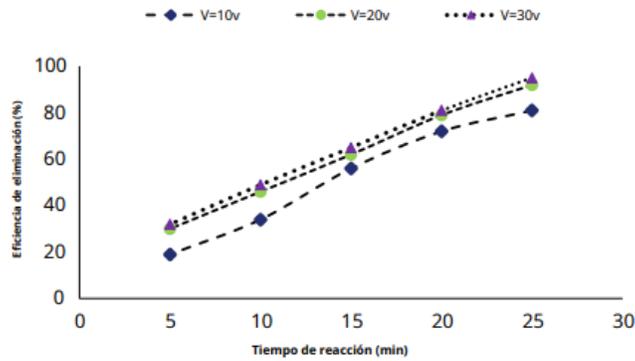
La concentración de reactivos es un parámetro determinante en la eficiencia del proceso debido a que está directamente relacionada con la producción de radicales hidroxilos. La concentración de peróxido de hidrógeno depende de los contaminantes presentes en el agua residual y su naturaleza, por ende, esta se determina mediante ensayos experimentales. A su vez, la concentración de oxígeno es un factor importante teniendo en cuenta que este es el precursor del H_2O_2 , si se mantiene la solución saturada de oxígeno, la producción de peróxido va a ser máxima, por el contrario, si la concentración de oxígeno es baja se debe estudiar la posibilidad de añadir externamente el reactivo para alcanzar una eficiencia razonable. Por otro lado, la concentración inicial de hierro también determina el alcance de la reacción fenton y en consecuencia la degradación de los contaminantes presentes; sin embargo, existe un límite en el que ocurren reacciones secundarias que pueden provocar precipitación. (Moreira, et al., 2017, p.226)

4.1.5 Densidad de corriente

La densidad de corriente es una variable crítica debido a que la electrogeneración de los reactivos y por ende la tasa producción de radicales hidroxilos se ve influenciada por el voltaje aplicado a la celda. A mayor voltaje, mayor eficiencia en el proceso; sin embargo, cuando la densidad de corriente es muy alta, la concentración elevada de reactivos y los productos pueden ser consumidos en reacciones secundarias que pueden ser negativas para el proceso (Abad, 2013, p.45). Por otro lado, como se muestra en el estudio de Rahmani, et al. (2015, p.423), el tiempo de reacción también influye en el proceso, a mayor tiempo, mayor % de remoción de contaminantes (**Figura 8**)

Figura 8

Eficiencia de remoción de cromo VS tiempo con variación de voltaje



Nota. Evaluación de la eficiencia de remoción de cromo a diferentes valores de voltaje aplicado. Tomado de: Rahmani, A. reza, Hossieni, E., & Poormohammadi, A. (2015). Removal of Chromium (VI) from Aqueous Solution Using Electro-Fenton Process. Environmental Processes, 2(2), 419–428. doi:10.1007/s40710-015-0068-4

4.2 Ventajas y desventajas

Tabla 5

Ventajas y desventajas del electro-fenton

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Disminución de riesgo por transporte, almacenamiento y manipulación de reactivos	Necesidad de operar a pH de 3

Tabla 4 (Continuación)

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Regeneración continua de Fe ⁺²	Suministro continuo de o ₂
Menor producción de lodos	
Capaz de tratar agua de origen industrial que posean sustancias orgánicas con baja biodegradabilidad	

Nota. Tomado de: Brillas, E., Sirés, I., & Oturan, M. A. (2009). Electro-Fenton Process and Related Electrochemical Technologies Based on Fenton's Reaction Chemistry. *Chemical Reviews*, 109(12), 6570–6631. doi:10.1021/cr900136g

5. ELECTRODIÁLISIS

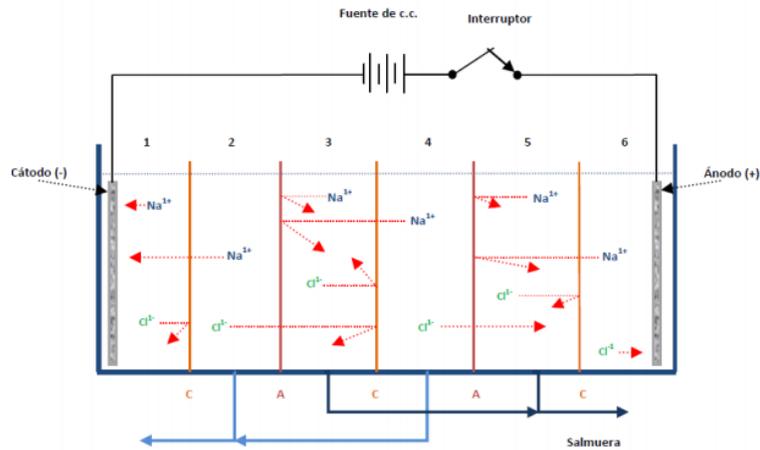
La electrodiálisis es una técnica electroquímica de separación por medio de membranas de intercambio iónico que se dividen en membranas de intercambio catiónico las cuales permiten el paso de compuestos con cargas positivas y membranas de intercambio aniónico que permiten el paso de compuestos con carga negativas, además de estas, la celda cuenta con dos electrodos conectados a la corriente eléctrica ubicados a cada extremo, lo que permite que los aniones y cationes migren hacia los extremos según la carga que posean, generalmente las membranas se encuentran intercaladas para generar regiones concentradas y diluidas (Mohammadi, 2021, p.2). La selectividad de las membranas se da debido a los grupos funcionales presentes en ellas, los cuales contienen una carga eléctrica fija que permite el paso de cargas opuestas a ella y la repulsión de cargas iguales a esta (Núñez, et al.,2018)

Como lo menciona Cegarra (2014, p.100), las celdas de electrocoagulación son formadas de varias unidades básicas de electrodiálisis o compartimentos como se muestra en la **Figura 9**, en este ejemplo se evidencia como el ion cloruro es atraído por el ánodo y el ion de sodio es atraído por el cátodo; sin embargo, llegan a un punto en donde se encuentran con una barrera que les impide el paso por la selectividad que poseen hacia determinada carga iónica, permitiendo que se formen regiones ricas en electrolito y regiones pobres en este .

La electrodiálisis puede dividirse en electrodiálisis directa el cual corresponde al explicado anteriormente y electrodiálisis inversa en donde el principio de funcionamiento es el mismo, sino que, en periodos de tiempo determinados se cambia la polaridad de los electrodos con el fin de evitar incrustaciones y disminución en la eficiencia del proceso (Lopez, 2005, p.26). A su vez, el proceso puede trabajar de forma continua o por lotes; cada caso presenta ventajas con respecto a lo otro y dependerá de cómo se requiera el sistema. Por ejemplo, trabajar en lotes permite que se obtengan regiones mucho más definidas; sin embargo, esto podría incrementar los gastos en plantas a gran escala. Por otro lado, manejar el proceso de forma continua a diferencia de por lotes permitiría trabajar con volúmenes de agua más grandes, pero puede generar menor porcentaje de recuperación; sin embargo, se podría estudiar la posibilidad de trabajar con más de

un módulo de electrodiálisis conectado en serie que permita recircular la región concentrada para así aumentar dicho porcentaje (Medina, 2007, p.25)

Figura 9
Celda de electrodiálisis



Nota. Esquema de una celada de electrodiálisis. Tomado de: Cegarra, S. (2014). Electrodiálisis reversible para la obtención de agua regenerada a partir de efluentes industriales depurados [Trabajo de grado]. Universidad Politecnica de Cartagena. <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4466/tfg357.pdf;jsessionid=2A98BB984C32ABC2594270EA89B34D19?sequence=1>

5.1 Variables críticas

5.1.1 Tipo de membrana

La importancia del proceso radica principalmente en el tipo de membrana implementada en la celda electroquímica. Una membrana de intercambio iónico es básicamente una película polimérica que como se mencionó anteriormente permite el paso de ciertas sustancias dependiendo de la selectividad de esta, “los grupos intercambiadores más usuales en las membranas comerciales son: sulfonato, $-\text{SO}_3^-$ y carboxilato, $-\text{COO}^-$ en las membranas de intercambio catiónico y amonio cuaternario, $-\text{NR}_3^+$, o amina terciaria, $-\text{NR}_2^+$ en las membranas de intercambio aniónico” (Medina, 2007, p. 26). Además, también pueden estar divididas según

su estructura dependiendo si su composición es uniforme al largo de la membrana (homogénea) o posee más de un material en su estructura (heterogénea), las membranas bipolares son una combinación entre membrana de intercambio catiónico y membrana de intercambio aniónico, lo que permite trabajar con una sola membrana y aunque el costo es mayor comparado con las membranas de intercambio iónico convencionales, esta podría traducirse en menores costos de diseño (Monserrat, 2015, p.26).

Una adecuada selección de la membrana puede asegurar la eficacia del proceso de electrodiálisis, sin embargo, también se debe tener en cuenta el tratamiento que debe ser aplicado para mantener la eficiencia de la membrana sabiendo que, esta es susceptible a ensuciamiento o envenenamiento por sustancias que se incrustan y no permiten el adecuado paso de iones al interior de esta, lo que además de disminuir el porcentaje de remoción, puede traducirse en gastos por aumento en el consumo eléctrico. (Miño, 2005, p.23)

5.1.2 Corriente límite

“La densidad de corriente límite es la densidad de corriente en la cual la concentración del ion en la superficie de la membrana de intercambio aniónico y/ catiónico tiende a cero” (López, 2005, p. 36) esto debido a que se produce hidrólisis del agua por lo que en la membrana de intercambio catiónico se transportan iones H^+ y por la membrana de intercambio aniónico se transportan OH^- , es decir, que la fuerza de la diferencia de potencial es compensada por la cantidad de iones que llegan a la superficie de la membrana lo que genera una disminución en la eficacia del proceso. En general, el porcentaje de remoción aumenta conforme aumenta la densidad de corriente, sin embargo, si se sobrepasa el valor de la corriente límite, este se ve afectado de manera negativa. Núñez, et al. (2018) estudia la electrodiálisis para remoción de cromo (VI) y cromo total de un agua residual generada en una curtiembre ubicada en Perú, cabe aclarar que no son los únicos compuestos que se presentan en las aguas residuales; sin embargo, se destacan por ser tóxicos y cancerígenos, el experimento lo llevó a cabo con una celda electroquímica de 4 membranas de intercambio iónico, electrodos de titanio y un voltaje máximo de 30V.

Tabla 6*Resultados de remoción de cromo a diferentes valores de voltaje*

N° de prueba	Tiempo de tratamiento (h)	Voltaje aplicado	Porcentaje de extracción (%)	
			Cr (VI)	Cr total
1	60	80% I_{lim}	>72.22	98.13
2	36	100% I_{lim}	>72.22	96.95
3	29	120% I_{lim}	66.66	94.73

Nota. Porcentaje de remoción de cromo hexavalente y cromo total de una muestra de agua residual proveniente de una industria curtiembre. Tomado de: Núñez, A. P., Angeles, F. T., Pichihua, P. M., & Acosta, G. Y. (2018). Remoción de cromo de efluentes de la industria curtiembre mediante electrodiálisis. *Industrial data*, 21(1), 27-34.

Como se muestra en la **Tabla 6** se realiza el estudio a 80%, 100% y 120% de la densidad de corriente límite y aunque los porcentajes de remoción de cromo son aceptables, se puede notar que el mejor resultado se logra a 80% de la corriente límite.

5.2 Ventajas y desventajas

Tabla 7*Ventajas y desventajas de la electrodiálisis*

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alta eficiencia de separación de iones cargados positiva y negativamente	Alto consumo de energía
Puede manejar bajas concentraciones de metales	Generación de corrientes secundarias
Baja presión de operación	Baja selectividad
No se requieren regeneradores químicos por lo que no existen reacciones dentro de la celda	Costos asociados a envenenamiento e incrustación de membranas de intercambio iónico
Fácil escalado	

Nota. Adaptado de: Jan-Max Arana Juve, Frederick Munk S. Christensen, Yong Wang, Zongsu Wei, *Electrodialysis for metal removal and recovery: A review*, *Chemical Engineering Journal*, 435(2), 2022.

6. INDUSTRIA CURTIEMBRE

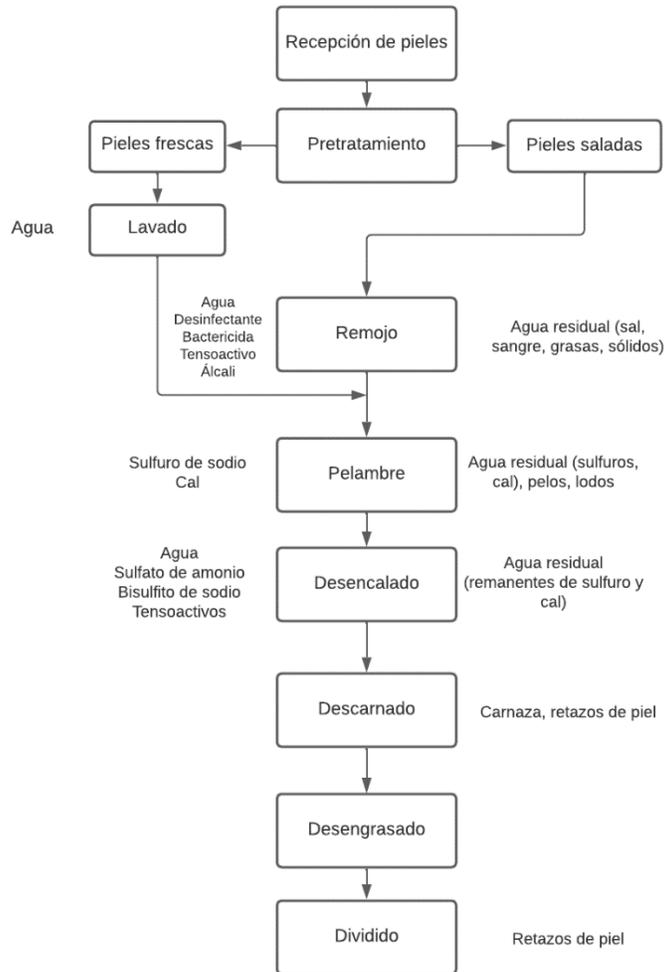
La industria curtiembre se encarga de convertir las pieles de animales en cuero, este proceso se lleva a cabo en 3 etapas principales: ribera, curtido y post-curtido y acabado, y de cada uno de estos se produce un efluente que contiene alta carga contaminante (Montenegro, et al., 2019).

6.1 Ribera

El proceso de ribera consiste en la preparación de la piel para el proceso de curtido desde la limpieza hasta el acondicionamiento. Este inicia con la recepción de materias primas; posteriormente, en el pretratamiento las pieles son pesadas, clasificadas y a su vez, se cortan las partes que no son útiles en el proceso como las extremidades, cuello y cola. Las pieles se pueden clasificar en pieles saladas y frescas, la diferencia radica en el tiempo que lleva la piel después del sacrificio del animal, las pieles que se almacenan por mucho tiempo deben pasar por un proceso que prevenga la putrefacción de esta, por ende, se realiza una inmersión en salmuera lo que permite que adquieran una fuerte resistencia a los microorganismos. Las pieles saladas a diferencia de las frescas deben pasar por un proceso de remojo en donde se les retira la sal para así pasar al pelambre. (SDA, 2010, P.78); El remojo se considera uno de los procesos más importantes ya que este afecta la calidad del producto terminado, en este proceso se busca devolverle la hidratación natural a la piel y eliminar sustancias presentes que puedan dificultar los procesos posteriores como sal, estiércol, sangre, entre otros, esto se logra mediante agentes agregados como desinfectantes, bactericidas, tensoactivos y álcali (Cuesta, 2017, p.28); Seguido de esto, las pieles debidamente lavadas y desinfectadas pasan al proceso de pelambre, en donde se elimina la epidermis y el pelo por medio de soluciones de sulfuro de sodio y cal, este proceso ocurre en tambores o bombos que aseguran una agitación constante. Luego se procede a remover la cal y el sulfuro remanente, esto se logra con la utilización de agua, ácidos orgánicos e inorgánicos, sales de amonio y bisulfito de sodio; teniendo las pieles apelambradas y desencaladas, se inician las subetapas por medio de procesos mecánicos en donde se retiran las partes que vienen adheridas a la piel y que no son necesarias para el proceso como grasas, carne y otros subproductos que pueden generar problemas

en el proceso. (Ministerio de Salud y Protección Social, 2015, p.3). A continuación, se presenta un esquema del proceso de ribera en donde se evidencian las etapas más relevantes (**Figura 10**)

Figura 10
Proceso de ribera



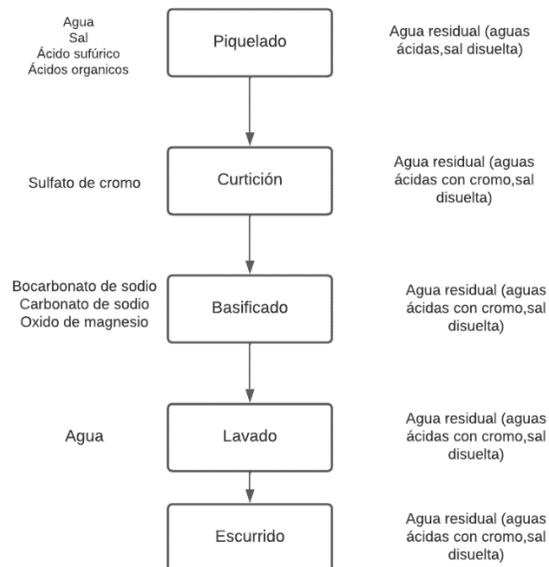
Nota. Adaptado de: Bravo, C., Fernandez, J. (2015). Análisis de incidencia de las descargas del proceso operativo de la industria curtiembre en los municipios de Villapinzón y Chocontá sobre el río Bogotá. Universidad La Gran Colombia.. <https://repository.ugc.edu.co/handle/11396/3458> & CARABIAS, J., PROVENCIO, E. & CORTINAS, C. (1999). Manual de Procedimientos para el Manejo Adecuado de los Residuos de la Curtiduría. Primera Edición ed. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.

6.2 Curtido

EL curtido es un proceso fisicoquímico que logra frenar la descomposición o degradación de la piel y así transformarla en cuero mediante la estabilización de las fibras de colágeno con agentes curtientes que pueden ser sustancias naturales ricas en taninos o sales de cromo trivalente (Cuesta, 2017, p.30).

Figura 11

Proceso de curtido



Nota. Adaptado de: Cardenas, C. J. (2012). Diseño de una metodología para la selección de esquemas de mejoramientos alcanzados con pml. caso: cadena del cuero del valle del cauca. Universidad del Valle.. <https://acortar.link/x2SWIX> & Carabias, J., Provencio, E. & Cortinas, C. (1999). Manual de Procedimientos para el Manejo Adecuado de los Residuos de la Curtiduría. Primera Edición ed. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.

En este documento se describe el proceso de curtido al cromo teniendo en cuenta el impacto ambiental generado por los metales pesados, además de ser uno de los procesos más usados en la industria al ser más rápido y económico en comparación con el curtido vegetal. El curtido se da en 5 etapas principales como se muestra en la **Figura 11** iniciando con el piquelado, en este proceso se busca preparar la piel para el curtido, esto se logra mediante adición de ácidos (sulfúrico, fórmico)

y sales que detienen las reacciones enzimáticas y eliminan la cal combinada, así a su vez, evitando la curtición superficial que daría como resultado un producto quebradizo y áspero (SDA, 2010, p.79); seguido de esto, el curtido se da generalmente en el mismo baño del piquelado haciendo reaccionar el colágeno de la piel con el agente curtiente (sales de cromo) el cual es el encargado de que el cuero adquiera resistencia a cambios de temperatura y humedad por medio de la formación de complejos bioinorgánicos de cromo trivalente (Carabias et al., 1999, p.10). Además, teniendo en cuenta que el incremento del pH aumenta las cadenas de cromo y facilita la reacción de éste con el colágeno, se adicionan sales alcalinas en un proceso denominado basificado. Posteriormente, las pieles sacan del bombo, se apilan y se mantienen en reposo con el fin de que sigan reaccionando con las sales de cromo, continuo a eso, se procede a hacer un escurrido para retirar la mayor cantidad de humedad de la piel. Y, por último, son llevadas a una máquina rebajadora en donde se le da el calibre final al cuero.

6.3 Post-curtido y acabado

En la última etapa se realiza un recurtido de acabado, es decir, se curte, neutraliza y lava para asegurar las características del producto final, posterior a esto, se realiza el proceso de teñido parcial o total del cuero con anilinas en presencia de amoníaco como agente penetrante, también se realiza el engrase en donde se le confiere al cuero suavidad, elasticidad y resistencia por medio de la lubricación de las fibras con aceites y grasas. Por último, se realizan las etapas de secado y terminación en donde se le añaden ciertos aditivos que hacen que el cuero obtenga características como brillo, suavidad, resistencia, entre otras. (Cárdenas, 2012, p.66)

Figura 12
Post-curtido y acabado

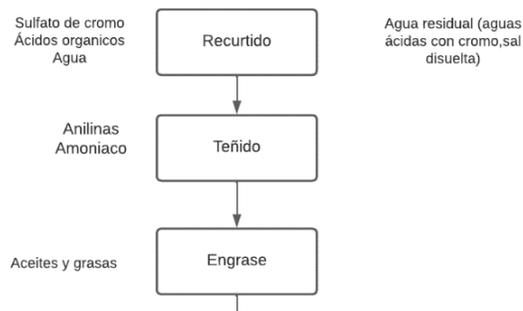


Figura 12 (Continuación)



Nota. Adaptado de: Cárdenas, C. J. (2012). Diseño de una metodología para la selección de esquemas de mejoramientos alcanzados con pml. caso: cadena del cuero del valle del cauca. Universidad del Valle. <https://acortar.link/x2SWIX> & Carabias, J., Provencio, E. & Cortinas, C. (1999). Manual de Procedimientos para el Manejo Adecuado de los Residuos de la Curtiduría. Primera Edición ed. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.

A continuación (**Tabla 8**), se presenta un aproximado de las concentraciones típicas de contaminantes presentes en agua residual por una tonelada de cuero presentado por Dixit, et al. (p. 40, 2014) en un estudio realizado a nivel mundial.

Tabla 8

Carga contaminante típica en los efluentes de la industria curtiembre.

Carga contaminante	Carga de operaciones de procesamiento kg/tonelada de cuero					
	Remojo	Pelambre/encalado	Desencalado	Curtido al cromo	Recurtido	Acabado
Agua residual generada (m ³ o kilolitro)	9 – 12	4 – 6	1,5 – 2	1 – 2	1 – 1,5	1 – 2
Sólidos suspendidos (mg SST/L)	11 – 17	53 – 97	8 – 12	5 – 10	6 – 11	0 – 2

Tabla 7 (Continuación)

DQO (mg O ₂ /L)	22 – 33	79 – 122	13 – 20	7 – 11	24 – 40	0 – 5
DBO ₅ (mg O ₂ /L)	7 – 11	28 – 45	5 – 9	2 – 4	8 – 15	0 – 2
Cromo (mg Cr/L)	–	–	–	2 – 5	1 – 2	–
Sulfuros (mg S ²⁻ /L)	–	3,9 – 8,7	0,1 – 0,3	–	–	–
NH ₃ -N (mg NH ₃ /L)	0,1 – 0,2	0,4 – 0,5	2,6 – 3,9	0,6 – 0,9	0,3 – 0,5	–
Nitrógeno total Kjeldahl (mg N/L)	1 – 2	6 – 8	3 – 5	0,6 – 0,9	1 – 2	–
Cloruros (mg Cl/L)	85 – 13	5 – 15	2 – 4	40 – 60	5 – 10	–
Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ /L)	1 - 2	1 - 2	10 - 26	30 – 55	10 - 25	–

Nota. Tomado de Dixit, Sumita, et al. Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review. En: Journal of Cleaner Production. Enero 2014, p. 40.

La industria curtiembre es una industria que aporta a la contaminación ambiental por diversos factores, uno de ellos como lo es evidente a lo largo del proceso, es la gran cantidad de agua requerida, los químicos que implementan en cada una de sus etapas y por ende los efluentes derivados de estas. El proceso de ribera es donde se genera el mayor caudal de agua y por esto, aproximadamente el 70% de la contaminación producida por la industria, allí se presentan efluentes con altos niveles de alcalinidad, sulfuro, nitrógenos, sólidos disueltos y suspendidos, grasas y aceites, así como altas demandas de DBO5 Y DQO (Andrioli et al., 2015, p.2). En la segunda etapa, el agua requerida es menor, sin embargo, entre los agentes de curtición se destaca el sulfato básico de cromo el cual no se fija 100% a las pieles, es decir, que el porcentaje restante que no se fija es arrastrado por el agua y si el vertimiento no es adecuado puede tener impactos negativamente altos al ecosistema, además, el agua presenta baja demanda de DBO5 y DQO y altos contenidos de sales y ácidos, además de algunos residuos sólidos como pelo, bordes, carne y grasa (Peñates, et al., 2017, p.254). Y, por último, en la tercera etapa se destacan efluentes con alto contenido de tintes y grasas.

6.4 Industria curtiembre en villapinzón

Villapinzón es un municipio ubicado en el altiplano cundiboyacense en la provincia de Almeidas a 80 Km de Bogotá, además es allí en donde se da el nacimiento del río Bogotá. La economía del municipio se centra en el sector agropecuario, industrial y medio ambiente, destacándose la industria curtiembre ocupando el tercer lugar (López, et al., 2018). El sector de curtiembres se localiza dentro de las Veredas de Casablanca y San Pedro, en una franja de cerca de 4 kilómetros de longitud, aledaños al río Bogotá y a la carretera central del Norte (Gobernación de Cundinamarca, 2020, p.45). En este momento se encuentran en operación 110 empresas curtidoras entre el municipio de Villapinzón y Chocontá de las cuales menos del 70% se establecen como ilegales; sin embargo, con el acompañamiento y formación de la CAR se han incrementado los procesos de legalización y la cultura de cuidado y preservación de los recursos naturales (CAR, 2019). Uno de los factores críticos de la industria son los efluentes debido a la alta cantidad de agua que se usa en cada uno de sus procesos y la concentración de productos químicos que esta arrastra, según la Gobernación de Cundinamarca (2020, p.54) en el plan de ordenamiento territorial del municipio “se puede decir que en la etapa de preparación, apelmbrado y encalado se utiliza el 100% de agua en peso por piel; en precurtición y curtición el 400% de agua sobre el peso de la piel y en recurtición, teñido y engrase el 200% sobre el peso de la piel, representado aproximadamente un total de agua del 700% sobre el peso de la piel” por ende, es necesario un buen tratamiento antes de verter las aguas residuales a los cuerpos de agua para mitigar la contaminación de las fuentes hídricas y a su vez evitar sanciones por incumplimiento de las normas de calidad de agua vigentes.

Tabla 9

Caracterización de efluente proveniente de una empresa del sector curtiembre en Villapinzón

PARAMETRO	UNIDAD	DATOS INICIALES	NORMATIVA	CUMPLE O NO
pH	Unidades de pH	8,85	6-9 (Resolución 0631 de 2015)	Cumple
Sólidos totales	mg/L	33030	600 mg/L (Resolución 0631 de 2015)	Incumple
			1000 mg/L Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Incumple
Sólidos sedimentables	mg/L	943	2.0 mg/L (Resolución 0631 de 2015)	Incumple
Coliformes Totales	UFC/100ml	5000	5000 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Cumple

Tabla 8 (Continuación)

DQO	mg/L O ₂	24900	1200 mg/L O ₂ (Resolución 0631 de 2015)	Incumple
			400- Acuerdo 08 (CAR, 2004)	
DBO ₅	mg/L	5187,5	600 mg/L O ₂ (Resolución 0631 de 2015)	Incumple
			200 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	
Sulfato	mg/L	10900	400 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Incumple
Nitrato	mg/L	3930		
Nitrito	mg/L	20.4		
Fosfato	mg/L	6760		
Zinc	mg/L	3.67	25 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Cumple
Cromo total	mg/L	267.8	1.5 mg/L (Resolución 0631 del 2015)	Incumple
			<0,01 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	
Cadmio	mg/L	Sin presencia de Cadmio.	0.05 Acuerdo 08 (CAR, 2004)	Cumple

Nota. Tomado de: Montenegro, D. L. C., Hernández, L. M. P., & Hilarión, J. S. T. (2019). Evaluación de la eficiencia de un sistema de electrocoagulación en los vertimientos de curtiembres en el sector de Villapinzón (Cundinamarca). *Revista Mutis*, 9(2), 34-48.

Como se puede evidenciar en la **Tabla 9** la industria curtiembre posee una descarga de agua alta en contaminantes orgánicos e inorgánicos. Uno de los contaminantes de mayor preocupación en la industria curtiembre es el cromo debido a que al ser un ion metálico no biodegradable y resultar altamente tóxico para el medio ambiente, puede generar efectos negativos significativos.

6.4.1 Marco legal

El marco legal ambiental es uno de los requisitos fundamentales en una organización, no solo por las altas sanciones que les pueden generar, sino también porque es fundamental aportar a la prevención de la contaminación teniendo en cuenta la situación del país y el mundo a nivel ambiental.

En Colombia, las disposiciones relacionadas con el recurso hídrico, entre las que se encuentran los vertimientos se establecen en el decreto 3930 de 2010, así mismo, la resolución 0631 de 2015 reglamenta el artículo 28 de dicho decreto “por el cual se establecen los parámetros y valores

límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones”. Esta resolución es de obligatorio cumplimiento para sectores industriales, comerciales o de servicios que generen vertimientos, esto con el fin de mitigar la contaminación hídrica provenientes de 73 actividades productivas en el país y a su vez. El decreto 2667 de 2012 “por el cual se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales, y se toman otras determinaciones.”. Decreto 2811 de 1974 por el cual se dicta el código nacional de recursos naturales renovables, y de protección al medio ambiente en su artículo 72 en donde se definen las normas de vertimiento a los cuerpos de agua, así como las concentraciones para el control de la carga de sustancias de interés sanitario.

Específicamente el municipio de Villapinzón está regido por el acuerdo 008 de 2004 “por el cual se define la norma de vertimientos de la industria de curtido de pieles y se adoptan otras determinaciones” teniendo en cuenta que, “ el artículo 31, numeral 10 de la ley 99 de 1993, establece que le corresponde a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) fijar en el área de su jurisdicción, los límites permisibles de emisión, descarga, transporte, o depósito de sustancias, productos, compuestos, o cualquier otra materia que pueda afectar el medio ambiente o los recursos naturales renovables y prohibir, restringir o regular la fabricación, distribución, uso, disposición o vertimiento de sustancias causantes de degradación ambiental”

6.4.2 Matriz selección

Existen diversos métodos de remoción metales pesados que pueden llegar a ser eficientes como adsorción, nanofiltración, ósmosis inversa, fotocátalisis, entre otros (Alvites, 2020, p.7); sin embargo, pueden llegar a ser muy costosos, por ende, por medio de una matriz de selección presentada a continuación (**Tabla 10**) y estableciendo criterios que permitan evaluar la pertinencia de cada método, se presentará la escogencia de la tecnología electroquímica más adecuada en la remoción de metales de la industria curtiembre.

Para la elección se hace uso de la matriz Pugh, la cual es una herramienta cuantitativa que permitirá lograr mayor objetividad en la toma de decisión. En primer lugar, se identificarán los criterios más

relevantes que posteriormente serán evaluados para cada tecnología. Se dará una calificación de 1 a 5 dependiendo del grado de cumplimiento del parámetro en específico. Y finalmente, la tecnología que obtenga un mayor puntaje será la escogida como más apropiada para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria curtiembre en el sector Villapinzón.

Tabla 10

Matriz Pugh

		TECNOLOGÍAS DE TRATAMIENTO		
		Electrocoagulación	Electrofenton	Electrodiálisis
CRITERIOS	Eficiencia	5	3	4
	Costo	4	3	2
	Facilidad de operación	5	3	4
		14	9	10

I. Eficiencia (porcentaje de recuperación)

1 = Muy bajo

2 = Bajo

3 = Medio

4 = Alto

5 = Muy alto

La eficiencia es un parámetro de interés en todo proceso y se puede definir como el cumplimiento adecuado de un objetivo, en este caso se busca el mejor porcentaje de remoción de cromo posible usando las 3 tecnologías. A lo largo de la investigación, la electrocoagulación ha sido ampliamente estudiada para procesos de remoción de contaminantes incluidos el cromo con porcentajes de remoción bastante altos, esto se puede evidenciar en la sección 3.1 y a su vez, en el estudio realizado por Alvites (2020) en donde hace un estudio comparativo entre diferentes tecnologías de remoción de cromo incluyendo electrocoagulación, y encuentra porcentajes de remoción de más del 90% e incluso, encuentra un estudio realizado por Genawi, et al. (2020) en donde a determinadas condiciones se logra un porcentaje de remoción de cromo del 100%. Por otro lado, la electrodiálisis también logra porcentajes de remoción significativos como lo describen Núñez, et al. (2018), Tor, et al. (2005), Dos santos, et al. (2019) entre otros autores. Ellos realizan estudios

de las variables que afectan el proceso y concluyen que la electrodiálisis es apta para remover metales pesados como el cromo y a su vez encuentran las condiciones a las cuales el proceso obtiene porcentajes de remoción de más del 90%. Por último, en el estudio realizado por Rahmani, et al. (2015) a condiciones óptimas de operación se obtiene un porcentaje de remoción de 97%, sin embargo, no hay información suficiente para respaldar la eficiencia de este proceso en la remoción de cromo de la industria curtiembre.

II. Costos

1 = Muy alto

2 = Alto

3 = Medio

4 = Bajo

5 = Muy bajo

Los costos del proceso son un factor importante para las empresas debido a que dependiendo de estos se define la implementación o no de un proceso. La electrocoagulación al igual que las otras tecnologías estudiadas en este documento, requieren energía para su funcionamiento y dependiendo de la zona en donde este vaya a operar y la disponibilidad de corriente eléctrica, varía el costo. Además, debido a la disolución del ánodo de sacrificio es necesaria su reposición con regularidad, sin embargo, por el costo y la disponibilidad de los materiales normalmente utilizados, estos costos siguen siendo menores a los requeridos por las tecnologías convencionales de tratamiento de aguas residuales. Por otra parte, la electrodiálisis tiene un costo inicial adicional alto por el uso de membranas de intercambio iónico, así como costos de mantenimiento de estas teniendo en cuenta que a lo largo del proceso pueden sufrir ensuciamiento o envenenamiento, en cuyo caso se debe realizar una limpieza o en un caso extremo, cambio de membrana para asegurar la eficiencia del proceso. El electrofenton es un proceso relativamente económico debido a que los reactivos se pueden producir in situ, sin embargo, en algunos casos la concentración de los reactivos producida no es suficiente para llevar a cabo el proceso, por ende, se necesitaría hacer uso de químicos adicionales, además de la necesidad de realizar un ajuste de pH a aguas que no cumplen con las condiciones óptimas mostradas en el numeral 4.1

III. Facilidad de operación (Condiciones)

1 = Muy complejo

2 = Complejo

3 = Medio

4 = Sencillo

5 = Muy sencillo

En cuanto a facilidad de operación, la electrocoagulación es un proceso muy sencillo en donde incluso se podría llegar a la automatización del mismo, se da a condiciones normales de presión y temperatura, condiciones de pH ácidas cercanas al neutro, por ende, las aguas provenientes de la industria curtiembre son idóneas para tratarse en dicho sistema. Así mismo, las condiciones de operación de la electrodiálisis permiten que el proceso opere a condiciones ambiente; sin embargo, requiere un alto consumo de energía, además de un tratamiento periódico de las membranas para así asegurar el adecuado funcionamiento de estas. Por otro lado, el electrofenton requiere un pH de 2 a 3 para lograr un porcentaje de remoción, por lo que se necesita realizar un ajuste de pH antes de iniciar el proceso para obtener los mejores resultados, además, requiere un suministro constante de oxígeno para asegurar la generación de los reactivos involucrados en el proceso.

La tecnología electroquímica escogida como adecuada para la remoción de metales para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria curtiembre en Villapinzon es la electrocoagulación, dado que demuestra ser el método más eficiente en cuanto a porcentaje de remoción de contaminantes derivados de diferentes industrias y en específico el cromo en la industria curtiembre, a su vez al ser un proceso que no requiere equipos de alta complejidad y por la disponibilidad y costo de materiales implementados en la construcción de la celda electroquímica, operar en condiciones normales, no requerir uso de químicos adicionales y la baja producción de residuos, está es una tecnología viable para el tratamiento de dichas aguas.

7. CONCLUSIONES

Las aguas generadas en las industrias después de su uso pueden contener diversos compuestos que en su mayoría pueden afectar cuerpos de agua causando degradación ambiental si no se le realiza un adecuado tratamiento, en muchos casos los contaminantes presentes en estas pueden contener compuestos complejos que difícilmente se pueden remover con técnicas convencionales y técnicas más avanzada pueden resultar muy costosas para las empresas, por ende, es necesario buscar alternativas que resulten económicamente viables e impacten positivamente el ambiente. Las técnicas de electroquímicas más implementadas en el tratamiento de aguas residuales son la electrocoagulación, el electrofenton y la electrodiálisis, estas presentan diversas ventajas en comparación con los tratamientos convencionales como: simplicidad en el proceso, costos de operación relativamente bajos, trabajan a condiciones ambiente, además de presentar mejores eficiencias en la remoción de contaminantes complejos. El éxito del proceso depende en gran medida de parámetros como densidad de corriente, pH inicial del agua, tiempo, material de los electrodos, entre otros. Las condiciones óptimas aseguran la remoción adecuada de los compuestos presentes en el agua, y con una configuración adecuada se podría incluso potabilizar el agua, lo que traería beneficios sociales ya que la calidad del agua afecta la salud pública y la seguridad alimentaria, además contribuiría a la mitigación de la contaminación de corrientes hídricas generada por el vertimiento inadecuado.

Las técnicas electroquímicas tienen una amplia gama de aplicaciones en diferentes industrias que contienen compuestos altamente tóxicos para el ambiente dentro de su proceso productivo, los cuales pueden ser arrastrados por el agua y posteriormente vertidos como la industria curtiembre, en donde hacen uso de grandes cantidades de agua y químicos para asegurar la calidad de los cueros. Entre los contaminantes más complejos de dicha industria encontramos el cromo, el cual es un metal pesado considerado cancerígeno y altamente tóxico para el medio ambiente el cual debe ser removido de las aguas de descarga.

Se realizó un análisis comparativo entre la electrocoagulación, electrofenton y electrodiálisis por medio de estudios de caso, y se encontró que las tres tecnologías poseen alta eficiencia en el proceso de remoción de cromo, así mismo, contienen ventajas y desventajas entre sí; sin embargo, se identificó que la tecnología más viable para el tratamiento de aguas residuales de la industria curtiembre por su contenido metales pesados en específico el cromo, es la electrocoagulación.

8. ECOMENDACIONES

- Para estudios posteriores, se recomienda realizar una investigación específicamente al proceso de electrofenton enfocado en metales pesados debido a que no hay información suficiente que soporte la efectividad de la tecnología aplicada a este contaminante.
- Se recomienda realizar un estudio de la eficiencia de remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales de la industria curtiembre con el fin de determinar la viabilidad de la implementación de una planta de aguas residuales que posea como proceso principal tecnologías electroquímicas
- Considerar un mayor número de parámetros de operación con el fin de tener un mayor alcance y más asertividad en el análisis

9. BIBLIOGRAFÍA

- Abad, L. J. (2013) Aplicaciones de proceso foto-electrofenton para la oxidación de contaminantes en la industria química. [Trabajo de grado]. Universidad Nacional de Ingeniería. https://web.archive.org/web/20180505013653id_/http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/4097/1/abad_lj.pdf
- Alvites, A. (2020). Métodos fisicoquímicos usados en la remoción de cromo (VI) en aguas residuales de la industria curtiembre: Revisión sistemática. [Tesis de pregrado] Universidad Cesar Vallejo https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/53156/Alvites_AAY-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Andrioli, E. Petry, L. Gutterres, M. 2015 “Environmentally friendly hide unhairing: Enzymatic-oxidative unhairing as an alternative to use of lime and sodium sulfide”. *Process Safety and Environmental Protection*. 93
- Arango, A., Restrepo, A., Garces, L. (2006). La electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción + Limpia*. Vol. 1 No. 2
- Arturi, T. S., Seijas, C. J., & Bianchi, G. L. (2019). A comparative study on the treatment of gelatin production plant wastewater using electrocoagulation and chemical coagulation. *Heliyon*, 5(5), e01738.
- Brillas, E., Sirés, I., & Oturan, M. A. (2009). Electro-Fenton Process and Related Electrochemical Technologies Based on Fenton’s Reaction Chemistry. *Chemical Reviews*, 109(12), 6570–6631. doi:10.1021/cr900136g
- Bravo, C., Fernandez, J. (2015). Análisis de incidencia de las descargas del proceso operativo de la industria curtiembre en los municipios de Villapinzón y Chocontá sobre el río Bogotá. Universidad La Gran Colombia. <https://repository.ugc.edu.co/handle/11396/3458>
- Camargo, P. (2015). Remoción de metales pesados presentes en aguas residuales a través del proceso de electrocoagulación. Especialización en Planeación Ambiental y Manejo Integral de los Recursos Naturales. Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/7473/REMOCI%c3%93N%20ODE%20METALES%20PESADOS%20PRESENTES%20EN%20AGUAS%20RESIDU>

ALES%20A%20TRAV%c3%89S%20DEL%20PROCESO%20DE%20ELECTROCOAGULACION.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- CAR (2019). De las más de cien curtiembres que operan en Villapinzón y Chocontá, 30 están en la legalidad. <https://www.car.gov.co/saladeprensa/de-las-mas-de-cien-curtiembres-que-operan-en-villapinzon-y-choconta-30-estan-en-la-legalidad>
- Carabias, J., Provencio, E. & Cortinas, C. (1999). Manual de Procedimientos para el Manejo Adecuado de los Residuos de la Curtiduría. Primera Edición ed. México D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
- Cárdenas, C. J. (2012). Diseño de una metodología para la selección de esquemas de mejoramientos alcanzados con pml. caso: cadena del cuero del valle del cauca. Universidad del Valle. Repositorio institucional. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/8110/%20CB-0461302.pdf;jsessionid=996160148F4ED331A5B1B49F3F77DC69?sequence=1>
- Cegarra, S. (2014). Electrodiálisis reversible para la obtención de agua regenerada a partir de efluentes industriales depurados (Trabajo de grado pregrado ingeniería mecánica, Universidad Politécnica de Cartagena) Repositorio institucional. <https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4466/tfg357.pdf;jsessionid=2A98BB984C32ABC2594270EA89B34D19?sequence=1>
- Correa Mahecha, F., Cuesta Parra, D. M., Melo Hernández, A. P., & Sacristán Yepes, L. J. (2018). Electrocoagulación en la remoción de contaminantes de efluentes provenientes de fertilizantes nitrogenados. *Revista De Investigación*, 11(2), 109-139. <https://doi.org/10.29097/2011-639X.233>
- Cruz, K. D., Francisco, J. T. J., Mellendrez, K. J. M., & Pineda, J. M. F. (2019). Electrocoagulation treatment of swine slaughterhouse wastewater: effect of electrode material. In *E3S Web of Conferences*, 117, EDP Sciences.
- Cuesta, D. (2017) Evaluación ambiental asociada a los vertimientos de aguas residuales generados por una empresa de curtiembres en la cuenca de río aburra [Trabajo de grado] Universidad de Manizales. https://ridum.umanizales.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12746/3645/1/Cuesta_DianaProyecto%20gradomaestr%C3%ADa.pdf

- Curo, L. (2020). Tratamiento de efluentes de la industria curtiembre, etapa pelambre mediante electro-fenton [Tesis de pregrado] Universidad Cesar Vallejo. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/53267/Curo_BL-Mendoza_GRC-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Díaz, C. E. B. (2014). Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales. Reverte.
- Dixit, Sumita, et al. Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review. En: Journal of Cleaner Production. Enero 2014, .
- Dos Santos, C. S. L., Miranda Reis, M. H., Cardoso, V. L., & de Resende, M. M. (2019). Electrodialysis for removal of chromium (VI) from effluent: analysis of concentrated solution saturation. Journal of Environmental Chemical Engineering, 103380.
- Elnenay, A. M. H., Nassef, E., Malash, G. F., & Magid, M. H. A. (2017). Treatment of drilling fluids wastewater by electrocoagulation. Egyptian Journal of Petroleum, 26(1), 203-208.
- Gobernación de Cundinamarca (2020). Esquema de ordenamiento territorial Municipio de Villapinzón Cundinamarca <https://mapas.cundinamarca.gov.co/documents/cundinamarca-map::municipio-de-villapinzon/explore>
- Gutiérrez Bouzán, M. C., López Grimau, V., Riera Torres, M. A., Vilaseca Vallvé, M. M., & Crespi Rosell, M. (2009). Tratamiento electroquímico y reutilización de efluentes de tintura. Revista de química textil, (191), 40-46.
- Hernández, J., y Mejía, S. (2019). Evaluación del sistema de electrocoagulación para disminuir la carga contaminante a escala de laboratorio [Trabajo de grado] Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7384/1/6122858-2019-1-IQ.pdf>
- Igwegbe, C. A., Onukwuli, O. D., Ighalo, J. O., & Umembamalu, C. J. (2021). Electrocoagulation-flocculation of aquaculture effluent using hybrid iron and aluminium electrodes: A comparative study. Chemical Engineering Journal Advances, 6, 100107.

- Jan-Max Arana Juve, Frederick Munk S. Christensen, Yong Wang, Zongsu Wei, Electrodialysis for metal removal and recovery: A review, *Chemical Engineering Journal*, 435 (2) 2022.
- Khaled, B., Wided, B., Béchir, H., Elimame, E., Mouna, L., & Zied, T. (2019). Investigation of electrocoagulation reactor design parameters effect on the removal of cadmium from synthetic and phosphate industrial wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(8), 1848-1859.
- López, U. (2005). Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de nitrato en agua [Tesis de maestría] Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica. <https://cideteq.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1021/157/1/Aplicaci%C3%B3n%20de%20la%20electrodi%C3%A1lisis%20en%20agua..pdf>
- Lopez, N., Andrade, J., Suarez, F., Duarte, D., Muñoz, M., & Arango, M. (2018) Contaminación del río Bogotá por vertimientos de industrias de curtiembres en el municipio de Villapinzón, Cundinamarca [Proyecto semestral] Universidad de los Andes https://villapinzoncundinamarca.micolombiadigital.gov.co/sites/villapinzoncundinamarca/content/files/000210/10462_investigacion-curtiembres.pdf
- Medina, I. (2007). Tratamiento de aguas de producción con electrodiálisis [Trabajo de grado], Escuela de Ingeniería Química. http://bdigital.ula.ve/storage/pdftesis/pregrado/tde_arquivos/12/TDE-2012-09-19T03:03:18Z-1654/Publico/medinaisrael.pdf
- Merma, A. G., Santos, B. F., Rego, A. S. C., Hacha, R. R., & Torem, M. L. (2020). Treatment of oily wastewater from mining industry using electrocoagulation: Fundamentals and process optimization. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 15164-15176.
- Ministerio de Ambiente. Vertimientos y reúso de aguas residuales <https://www.minambiente.gov.co/gestion-integral-del-recurso-hidrico/vertimientos-y-reuso-de-aguas-residuales/#tabs-1>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2015) Guía para el desarrollo de actividades de promoción y prevención en la industria de curtiembres.

- <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/6guia-actividades-pyp-curtiembres.pdf>
- Miño, Q, S. (2005). Evaluación preliminar del proceso de electrodiálisis como alternativa para la recuperación de metales pesados en la industria galvánica- un estudio para níquel. [Trabajo de grado] Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/10830/u263308.pdf?sequence=1>
- Mohammadi, R., Tang, W., & Sillanpää, M. (2021). A systematic review and statistical analysis of nutrient recovery from municipal wastewater by electrodialysis. *Desalination*, 498, 114626.
- Monserrat, C. (2015). Evaluación de procesos de electrodiálisis para la valorización de efluentes industriales mediante membranas de intercambio iónico [Tesis de licenciatura] Universidad Politécnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/84186?show=full>
- Montenegro, D. L. C., Hernández, L. M. P., & Hilarión, J. S. T. (2019). Evaluación de la eficiencia de un sistema de electrocoagulación en los vertimientos de curtiembres en el sector de Villapinzón (Cundinamarca). *Revista Mutis*, 9(2), 34-48.
- Moussavi, M., Pendashteh, A., & Alinia, H. (2021). Treatment of a natural gas refinery effluents by electrocoagulation. *Environmental Challenges*, 3, 100036.
- Moreira, F. C., Boaventura, R. A. R., Brillas, E., & Vilar, V. J. P. (2017). Electrochemical advanced oxidation processes: A review on their application to synthetic and real wastewaters. *Applied Catalysis B: Environmental*, 202, 217–261.
- Nidheesh, P. V., & Gandhimathi, R. (2012). Trends in electro-Fenton process for water and wastewater treatment: An overview. *Desalination*, 299, 1–15. doi: 10.1016/j.desal.2012.05.011
- Núñez, A. P., Angeles, F. T., Pichihua, P. M., & Acosta, G. Y. (2018). Remoción de cromo de efluentes de la industria curtiembre mediante electrodiálisis. *Industrial data*, 21(1), 27-34.
- Organización Mundial de la Salud (OMS) (2019) Agua. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) (2021) Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_spa
- Pavas, E. G. (2012). Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. Cuadernos de Investigación, 65.
- Peñates F, S., Guzmán D, N., Aguas M, Y., Martínez M, A., & Cury R, K. (2017). Evaluación del proceso de descalcado de residuos de descarnes de un proceso de curtición. *Revista Colombiana De Ciencia Animal - RECIA*, 9(2), 253–259.
- Pérez, M. (2016). Tratamiento de lodos residuales procedentes de plantas de tratamiento de aguas residuales mediante procesos electroquímicos para la disminución de metales pesados (pb) [Trabajo de grado] Universidad Politécnica Salesiana <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/12045>
- Rahmani, A. reza, Hossieni, E., & Poormohammadi, A. (2015). Removal of Chromium (VI) from Aqueous Solution Using Electro-Fenton Process. *Environmental Processes*, 2(2), 419–428. doi:10.1007/s40710-015-0068-4
- Ramcharan, T., Bissessur, A. (2017). Electrocoagulative and biological treatment of laundry wastewater. *Intech*. 179-194.
- Rao Y. Surampalli, Ph D., Tian C. Zhang, Ph D., Satinder Kaur Brar, Ph D., Krishnamoorthy Hegde, P. D., Rama Pulicharla, P. D., & Mausam Verma, P. D. (2018). Handbook of Environmental Engineering. McGraw-Hill Education. <https://www-accessengineeringlibrary-com.ezproxy.uamerica.edu.co/content/book/9781259860225>
- Rubí, H. (2016). Tratamiento combinado electrocoagulación-electro oxidación de aguas residuales oleosas provenientes de servicios de lavado y engrasado [Tesis doctoral]. Universidad Autónoma del Estado de México <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/79959/Tesis%20Humberto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Ruiz, P. (2017). Prototipo de una celda de electrocoagulación abastecida con energía fotovoltaica para tratamiento de aguas residuales en la industria minera [Trabajo de grado] Corporación Universitaria Minuto de Dios. <https://repository.uniminuto.edu/handle/10656/5304>
- Tor, A., Büyükerkek, T., Çengelolu, Y., & Ersöz, M. (2005). *Simultaneous recovery of Cr (III) and Cr (VI) from the aqueous phase with ion-exchange membranes*. *Desalination*, 171(3), 233–241.
- Sunil R. Patel, Sachin P. Parikh. (2020). Statistical optimizing of electrocoagulation process for the removal of Cr (VI) using response surface methodology and kinetic study, *Arabian Journal of Chemistry*, 13 (9),7032-7044.
- Secretaria Distrital de Ambiente (SDA) (2010). Guía para la gestión y manejo integral de residuos industria de curtiembres y tenerías. https://www.ambientebogota.gov.co/documents/10184/2113710/guia_curtiembres.pdf/73a2e0bd-2110-40ce-afb2-86641f0e26ee
- Vilela, E. L., & Rojas, V. A. (2021). Aplicación de la electrocoagulación en la eliminación de los metales pesados en los efluentes galvánicos. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 24(48), 109-1