

Eficiencia de la electrocoagulación para el tratamiento de efluentes de la industria de curtiembre

Efficiency of electrocoagulation for the treatment of effluents from the tannery industry

Hugo Apaza Aquino
hapaza89@gmail.com - Asociación de Investigación Científica BLOSS
Edgar Daniel Carrillo Monteagudo
daniel_4ad@hotmail.com - Asociación de Investigación Científica BLOSS
Danery Katherine Castilla Colpaert
dane_lbpmpp@hotmail.com - Asociación de Investigación Científica BLOSS
Froilan Rodolfo Huaraya Chambi
froyhua@gmail.com - Asociación de Investigación Científica BLOSS

Resumen

Una de las fuentes de contaminación ambiental más drástica lo generan los efluentes de la industria de curtiembre, por la cantidad y tipos de químicos empleados en sus procesos. Se estudió la eficiencia de la electrocoagulación para la remoción de contaminantes presentes en ella. Se realizó la caracterización fisicoquímica de la muestra del efluente de la curtiembre; los ensayos de electrocoagulación se realizaron en un sistema de régimen batch, empleando electrodos de aluminio y hierro, configurado en un sistema monopolar y en paralelo; se ensayó con muestras de una curtiembre en las 6 principales etapas que corresponden a: lavado remojo, pelambre, curtido, desencale y engrase. Se logró una máxima reducción de turbiedad con 93.86 % para la muestra de lavado, seguido de la muestra de remojo con 88.67 %; en cuanto a las muestras compuestas, para la muestra de desencale más curtido se obtiene una remoción de turbidez de 98.63 %. Existen diversas tecnologías para el tratamiento de los efluentes de la industria de la curtiembre pero la electrocoagulación representa una alternativa por tener la capacidad de remover tanto la carga orgánica como los químicos presentes en esta.

Palabras claves: *Cromo, agua residual, aluminio, hierro, curtido.*

Abstract

One of the most drastic sources of environmental pollution is generated by the effluents of the tannery industry, due to the amount and types of chemicals used in its processes. The efficiency of electrocoagulation for the removal of contaminants present in it was studied. Physicochemical characterization of the tannery effluent sample was performed; the electrocoagulation tests were carried out in a batch system, using aluminum and iron electrodes, configured in a monopolar and parallel system; samples were tested from a tannery in the 6 main stages corresponding to: washing, soaking, lining, tanning, de-greasing and lubrication. A maximum reduction of turbidity was achieved with 93.86% for the washing sample, followed by the soaking sample with 88.67%; as for the composite samples, for the tanned unwinding sample a turbidity removal of 98.63% is obtained. There are various technologies for the treatment of effluents from the tannery industry, but electrocoagulation represents an alternative because it has the ability to remove both the organic load and the chemicals present in it.

Keywords: *Chrome, waste water, aluminum, iron, tanning.*

Introducción

Actualmente por la alta demanda de alimentos, servicios, cosas, etc. que se da por la creciente población, obliga a que mayor número de industrias realicen sus actividades a pasos acelerados. Una de las industrias que tiene bastante actividad en Perú es la industria de la curtiembre, el cual consume gran cantidad de agua (Quijano, Castillo, & Meléndez, 2015) en varias etapas de su proceso; estas aguas residuales generadas por las industrias de curtiembre se caracterizan por tener una gran cantidad de sólidos en suspensión, orgánicos, inorgánicos y metales pesados (Carreño, 2016; Cuesta-parra, Velazco-rincón, & Castro-pardo, 2018; Mohammed & Sahu, 2019).

Usualmente las aguas generadas por las curtiembres son desechadas sin tratamiento alguno generando contaminación en los cuerpos receptores; las sustancias químicas tóxicas que se encuentran en ella actúan como mutágenos, aumentando así el riesgo de desarrollar cáncer en la población expuesta (Quijano et al., 2015); la exposición prolongada a compuestos de Cr (VI) produce un alto riesgo de carcinomas (Langård & Costa, 2015). Estos desechos industriales son capaces de contaminar el suelo y las aguas subterráneas (Sanjay, Sudarsanam, Raj, & Baskar, 2020).

La industria de la curtiembre no solo genera efluentes con alta carga contaminante, además genera residuos sólidos (Ferro-Rodríguez, Castiblanco-Rocha, Agudelo-Valencia, & Ruiz-Martínez, 2019) y gaseosos (Numpaqué & Viteri, 2016). Entre los contaminantes que genera la industria de la curtiembre y que más preocupa en dichos residuos está el cromo, lo que ocasiona un serio problema de contaminación del agua y suelo (Sanjay et al., 2020). En Perú, los efluentes desechados por la mayoría de las industrias de las curtiembres, superan en gran manera los límites máximos permisibles y valores máximos admisibles (Guerrero, 2017). Por lo mencionado es primordial realizar un tratamiento a los residuos que genera la curtiembre antes de su disposición final.

Existen diversas tecnologías para disminuir la carga contaminante de los efluentes de las industrias de las curtiembres, tales como: Filtración, biorremediación, precipitación química, fitorremediación, entre otros. Mediante la precipitación química empleando CaO y Ca(OH)₂ se logra reducir eficientemente el Cr, sulfatos y la demanda química de oxígeno (Reyes-Serrano, López-Alejo, Hernández-Cortázar, & Elizalde, 2020). La biorremediación, va tomando más fuerza con el pasar de los años, las bacterias nativas aisladas de efluentes tienen la capacidad de remover contaminantes (Sanjay et al., 2020); los microorganismos aislados de efluentes de la industria de la curtiembre tienen capacidad para remediar metales como el cromo (Elahi et al., 2019).

Entre una de las tecnologías que en la actualidad tiene mayor acogida por sus resultados se encuentra la electrocoagulación. Como parte de un sistema de tratamiento usualmente en los sistemas para la eliminación de contaminantes del agua se emplean la coagulación química y la floculación (Nidheesh, Kumar, Syam Babu, Scaria, & Suresh Kumar, 2020). En la electrocoagulación al aplicar un voltaje de corriente continua a electrodos que usualmente son hierro o aluminio se libera iones al medio (Barrera-Díaz, Balderas-Hernández, & Bilyeu, 2018), cuando se utilizan electrodos de aluminio se libera gas hidrógeno en el cátodo y el aluminio se disuelve en el ánodo, este agente coagulante se combina con los contaminantes para formar flóculos (Emamjomeh & Sivakumar, 2009).

La electrocoagulación tiene diversas aplicaciones, ya sea para el tratamiento de aguas con alta carga orgánica (Apaza, 2019), así como para el tratamiento de aguas residuales industriales que contienen cromo hexavalente (Cheballah, Sahmoune, Messaoudi, Drouiche, & Lounici, 2015). Con la electrocoagulación no solo se reduce la carga orgánica, sino que además se logra reducir la concentración de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos (Cristancho-Montenegro, Pinto-Hernández, & Tique-Hilarión, 2019). La electrocoagulación tiene ventajas como bajo costo operativo frente al convencional (Espinoza-Quifones, Fornari, Módenes, Palácio, da Silva, et al., 2009).

El presente estudio tiene por objetivo principal, determinar la eficiencia de la electrocoagulación en el tratamiento de los efluentes de la industria de la curtiembre, mediante la evaluación de los parámetros fisicoquímicos.

Materiales y métodos

Caracterización de la muestra

Se obtuvo muestra de la poza de sedimentación de efluentes de una curtiembre ubicada en el parque industrial Río Seco del distrito de Cerro Colorado de la provincia de Arequipa- Perú, se realizó la caracterización fisicoquímica de las muestras determinándose los parámetros de DBO₅, (método prueba de DBO de 5 días), DQO (método colorimétrico, reflujo cerrado), dureza total como CaCO₃ (método volumétrico con EDTA), sulfatos (método turbidimétrico), pH (Método electrométrico), turbidez (método nefelométrico), conductividad (método de laboratorio), sólidos totales (método sólidos totales secados a 103-105°C), oxígeno disuelto (método de electrodo de membrana), metales totales (método de análisis por Plasma de Acoplamiento Inductivo) y cromo VI (método espectrofotométrico). Se obtuvo muestras de las 6 principales etapas de la curtiembre siendo estas: lavado, remojo, pelambre, desengrase, curtido y engrase.

Ensayos de electrocoagulación

Se construyó un reactor a escala laboratorio para un régimen batch, se utilizó una bandeja de plástico de forma rectangular, dentro de la celda se acondicionaron los electrodos por medio de perno y tuercas; los electrodos empleados fueron placas rectangulares metálicas de hierro y aluminio dispuestas en paralelo. Debido a la compleja composición del efluente de curtiembre se realizó pruebas a nivel laboratorio, para muestras simples que consistían en muestras de las etapas de lavado, remojo, pelambre, desencale, curtido y engrase; también se realizó ensayo con muestras compuestas. Cada muestra fue tomada directamente en baldes de plástico de 20 litros.



Figura 1. Proceso de sedimentación, previo al ensayo de la electrocoagulación.

Antes de realizar los ensayos de electrocoagulación se realizó un proceso de filtración con malla metálica y sedimentación (Figura 1), con la finalidad de separar los pelos o tejidos orgánicos que puedan encontrarse en las muestras; se vertió todo el volumen de muestra sobre la malla, permaneciendo en el tanque de sedimentación por 15 minutos; transcurrido el tiempo se desechó 4 litros aproximadamente directamente desde el fondo del tanque, luego se tomó una muestra para realizar la caracterización fisicoquímica. Se tomaron 8 litros de muestra del tanque de sedimentación directamente en el recipiente de electrocoagulación, se conectó a una fuente poder de corriente directa; una vez ensamblado el sistema de electrocoagulación se operó a un voltaje de 20 y 20 amperios por un periodo de 15 minutos por cada ensayo. En la Figura 2 se aprecia el sistema de electrocoagulación en funcionamiento.



Figura 2. Proceso de electrocoagulación

Resultados y discusión

En la Tabla 1 se muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica de la muestra del efluente de la industria de curtiembre; se evidencia una alta concentración de sulfatos y DQO, esto se debe a que en el proceso emplean varios productos químicos para las distintas etapas del proceso como: lavado, remojo, pelambre, curtido, desecale y engrase; por lo general el efluente tiene un olor fétido y de un color marrón/plomo oscuro; durante el proceso de filtración y sedimentación se observó la retención de alta cantidad de sólidos de diferentes tipos de partículas, principalmente con residuos de pelo.

Tabla 1
Resultados del análisis fisicoquímico de la muestra del efluente de la curtiembre.

Parámetro	Unidad	Valor
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L	734
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	10067
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	10216.81
Dureza total (CaCO ₃)	mg/L	4377
Turbidez	NTU	11050
pH	-	8.12
Conductividad	mS/cm	38.5
Oxígeno disuelto	mg/L	1.46
Cr (VI)	mg/L	3.0595
Sólidos totales	mg/L	48000

En la Tabla 2 se muestra los resultados del análisis de los metales totales presentes en el efluente de la curtiembre, cabe resaltar el valor del cromo con un valor >50 ppm que excede lo permitido por la legislación Peruana; por su parte De La Cruz, Silva, & Inca (2017) reportan un valor similar en su caracterización fisicoquímica de las muestras de la curtiembre con un valor de cromo de 57,79 mg/L; estos valores van a variar dependiendo de las tecnologías de las empresas; las empresas que optimizaron sus procesos hacen uso en menor cantidad de los químicos lo que se traduce en menor cantidad desechada.

Tabla 2
Resultados del análisis de los metales totales presentes en el efluente de la curtiembre.

Metal	Unidad	Valor
Ag	mg/L	0.0047
Al	mg/L	1.92
B	mg/L	82.49
Ba	mg/L	0.18925
SiO ₂	mg/L	53.95
Ca	mg/L	>250
Cd	mg/L	0.01269
Sr	mg/L	3.087
Cr	mg/L	>50
Cu	mg/L	0.0422
Fe	mg/L	5.25
K	mg/L	>250
Zn	mg/L	0.517
Mg	mg/L	>250
Mn	mg/L	0.34892
Na	mg/L	>250
Tl	mg/L	0.1199
Ni	mg/L	0.1106
P	mg/L	11.06
Pb	mg/L	0.0144
Sb	mg/L	0.357
Se	mg/L	<0.002
Be	mg/L	<0.00008
Sn	mg/L	<0.0009
Co	mg/L	<0.000094
Mo	mg/L	<0.00038
Ti	mg/L	0.07208
V	mg/L	<0.00014

De La Cruz et al. (2017). Reportan un valor de 1153 mg/L en su caracterización fisicoquímica de las muestras de la curtiembre; por su parte Babu, Bhadrinarayana, Meera, Begum, & Anantharaman (2007), reporta una DQO de 3200 mg/L y una concentración de cromo de 40 mg/L. En la caracterización fisicoquímica de la muestra en el presente estudio se obtiene una DQO de 10067 mg/L; estos valores pueden variar dependiendo de los volúmenes, cantidad de agua que emplee cada empresa, producción etc.; si emplean mayor cantidad de agua ya sea en sus procesos o en el proceso de limpieza diluirá la muestra por ende menor será la concentración de la DQO.

La legislación peruana establece los límites máximos permisibles para las actividades de las curtiembres con un valor de 2500 mg/L para la DQO y un valor de 0.5 mg/l para cromo VI (Ministerio de la Producción, 2002); en las muestras caracterizadas en el presente estudio superan dichos valores.

El sistema construido se trabajó con una configuración monopolar en paralelo con electrodos de aluminio y hierro; muy importante es la configuración de los electrodos y el material de los electrodos, la conexión monopolar es más económico en comparación con la conexión bipolar (Nidheesh et al., 2020), como indican Mahmad, Rozainy, Abustan, & Baharun (2016), empleando electrodos de aluminio se elimina la turbidez y el color; en cambio los electrodos de acero inoxidable es el mejor para eliminar el cromo total. Cuando se emplean electrodos de aluminio se producen especies de Al(III), que al unirse con los contaminantes favorece su eliminación (Nidheesh et al., 2020), la eliminación del cromo se debe principalmente a la adsorción en hidróxido de aluminio (Elabbas et al., 2016). Por las razones descritas se empleó electrodos de aluminio y hierro para favorecer la remoción de los contaminantes presentes.

Durante el proceso de electrocoagulación para cada muestra ensayada se evidencio la formación de 3 capas, en la parte inferior la aglomeración de los lodos, en la parte intermedia la zona purificada y en la parte superior los lodos que flotaron. En la Tabla 3 se muestran los resultados tras haber aplicado la electrocoagulación; el parámetro de importancia es la turbidez; se logra la mayor reducción con 93.86 % en la muestra de lavado seguido de la muestra de remojo con 88.67 %; para estas muestras se observó una clara disminución de la turbidez, porque estas muestras tienen en su composición mayoritaria carga orgánica, empleando electrodos de aluminio y hierro se obtiene buenas eficiencias. En las muestras de curtido y engrase se tiene valores negativos en las lecturas de la turbidez porque estas muestras presentaban una coloración fuerte; la muestra del curtido era de color azul marino, la muestra de engrase era de color azul marino oscuro/negro, estas características impidieron hacer lecturas de la turbidez.

Tabla 3.

Resultados del análisis fisicoquímico de las muestras simples antes y después del tratamiento con electrocoagulación

Muestra	Antes				Después			
	pH Valor	OD ppm	Conductividad mS/cm	Turbidez NTU	pH Valor	OD ppm	Conductividad mS/cm	Turbidez NTU
Pelambre	12.54	0.04	21.67	8188	12.36	0.05	22.4	7300
Remojo	9.31	0.05	29.74	3088	9.43	0.26	29.4	350
Curtido	3.41	0.4	114.4	-3.13	3.9	2.99	120.9	27.6
Desencale	9.37	0.23	24.58	8624	9.15	0.58	25.35	8530
Engrase	3.69	3.23	19.05	-2.43	3.89	1.42	19.02	1.16
Lavado	7.09	0.06	11.23	778	6.61	0.71	11.25	47.8

De acuerdo a estos resultados de los ensayos con las muestras simples, se decidió formar muestras compuestas; al mezclar 2 o más muestras simples pueden formar complejos entre los componentes presentes en estas, luego estos puedan ser removidos más fácilmente por el proceso de electrocoagulación. Se formó 3 muestras compuestas: A (pelambre, lavado y remojo); B (desencale y curtido) y C (pelambre, lavado, remojo, desencale, curtido y engrase). Luego se aplicó la electrocoagulación de la misma manera que se realizó con las muestras simples; los parámetros fisicoquímicos del antes y después del tratamiento de electrocoagulación se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4.

Resultados del análisis fisicoquímico de las muestras compuestas antes y después del tratamiento con electrocoagulación

Muestra	Antes				Después			
	pH Valor	OD ppm	Conductividad mS/cm	Turbidez NTU	pH Valor	OD ppm	Conductividad mS/cm	Turbidez NTU
A	12.65	0.07	24.95	5800	12.09	0.67	24.92	5147
B	7.44	1.38	71.3	4061	6.87	0.07	65.5	55.5
C	7.32	0.03	42.9	160	6.54	0.06	43.2	36.7

Se puede observar que al mezclar las muestras se obtuvieron mejores resultados, en el caso de la muestra compuesta B se obtiene una remoción de turbidez de 98.63%, seguido de la muestra compuesta C con 77.06 %; a pesar de que en la medición inicial de la turbidez se obtiene un valor de 160 NTU, esto pueda ser a causa de la coloración rojiza que le dio la muestra de engrase a la muestra compuesta C en general y esto desvió la medición real en el equipo, pero la muestra compuesta C por contener mezclado las 6 muestras simples al ser evaluada visualmente presentaba mayor turbidez que la muestra compuesta B. En el caso de la muestra compuesta A la disminución de los parámetros fue menor que en los tratamientos de muestras individuales. En la Figura 3 se aprecia la muestra compuesta C antes

y después del tratamiento con la electrocoagulación, donde se aprecia que después de la electrocoagulación se logra reducir la turbiedad sedimentando en la parte inferior los flocúlos.

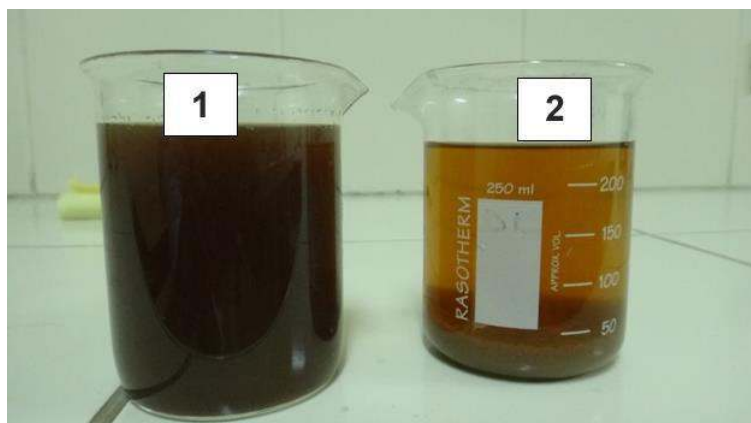


Figura 3. Muestra compuesta C; 1) antes del tratamiento con electrocoagulación, 2) después del tratamiento con electrocoagulación.

Los principales factores a tener en cuenta en la electrocoagulación es el tiempo, densidad de corriente, el material del electrodo empleado así como el pH inicial de la muestras; estos factores influyen en la eficiencia del proceso de la electrocoagulación. En cuanto al tiempo usualmente se trabaja en promedio entre 15-30 minutos; como indican Villacorta & Rios (2019) el tiempo óptimo para tratar las aguas residuales de curtiembre es de 20 minutos; en el presente estudio se realizó a 15 minutos con la finalidad de que el consumo de energía no sea mayor. En cuanto a la densidad de corriente existe una relación directa que a mayor voltaje mayor porcentaje de remoción de contaminante (Mahmad, Rozainy, Abustan, & Baharun, 2016), se evidenció en los ensayos esta relación y además de aumentar en varios niveles la densidad de corriente genera que se desgaste más rápido los electrodos.

La industrias de la curtiembre genera diversos contaminantes, en el presente trabajo solo se abarcó los efluentes, pero otro residuo importante también es la generación de residuos sólidos entre ellos el pelo residual; trabajos como la que realizaron Numpaque & Viteri (2016), donde emplean el pelo residual de la industria de la curtiembre para la obtención del compost es una alternativa viable.

La electrocoagulación es adecuado para la eliminación de diversos contaminantes del agua superficial y las aguas residuales (Nidheesh et al., 2020). Pero la electrocoagulación solo es una etapa de un sistema de tratamiento; se debe integrar otras tecnologías que permitan realizar un adecuado tratamiento; por ejemplo Deghles & Kurt (2016), integraron dos tecnologías como la electrocoagulación / electrodiálisis para el tratamiento de aguas residuales de la curtiduría; por su parte Ait, Chabani, Amrane, & Bensmaili (2012), integraron la electrocoagulación y adsorción a base de carbón activado obteniendo altos porcentajes de remoción para DQO y cromo VI, incluso técnicas como la electroflotación ayuda a eliminación de diversos contaminantes (Muruganathan, Raju, & Prabhakar, 2004).

Usualmente se trabajan en sistemas batch en pruebas de laboratorio, pero una aproximación real a una implementación en planta sería que el sistema funcione a sistema continuo. Babu et al. (2007), trabajando en un sistema continuo reportan eficiencias de remoción para la DQO a un flujo de 6 lpm y con una densidad de corriente de 20 mA /cm²; para que un sistema continuo funcione se tiene que uniformizar el efluente, lo cual resulta complicado porque en una curtiembre es variado la producción de efluente tanto en volumen como en la concentración de contaminantes, así por ejemplo si la empresa se encuentra en una jornada de las etapas de remojo y lavado solo genera aguas residuales con alto contenido en materia orgánica, pero si se encuentra en la etapa de curtido genera efluentes con altas cantidades de químicos.

Por lo expuesto y porque diversos estudios (Babu et al., 2007; Cristancho-Montenegro et al., 2019; Deghles & Kurt, 2016; Elabbas et al., 2016; Espinoza-Quiñones, Fornari, Módenes, Palácio, Trigueros, et al., 2009; Mahmad et al., 2016; Villacorta & Rios, 2019) lo manifiestan, la electrocoagulación representa una alternativa potencial para el tratamiento de aguas residuales de la industria de la curtiembre.

Conclusiones

La electrocoagulación mostró una eficiencia aceptable en la remoción de contaminantes del efluente de la curtiembre; logrando la mayor reducción de turbiedad con 93.86 % para la muestra de lavado, seguido de la muestra de remojo con 88.67 %. En cuanto a las muestras compuestas, en la muestra conformada por desecale y curtido se obtiene una remoción de turbidez de 98.63%; en la muestra compuesta por todas las muestras de todos los procesos de la curtiembre conformada por lavado, remojo, pelambre, desecale, curtido y engrase se obtiene una reducción de 77.06 %. Las muestras de cada etapa al ser tratadas por separado con la electrocoagulación presentan un comportamiento distinto, en muestras simples de lavado y remojo se aprecian mejores resultados debido a que estas muestras tienen un alto contenido en materia orgánica. Pero al aplicar la electrocoagulación a una muestra compuesta donde se mezclan todas las muestras simples favorece la remoción de los distintos contaminantes presentes en ella por la formación de complejos que se dan.

Referencias bibliográficas

- Ait, Y., Chabani, M., Amrane, A., & Bensmaili, A. (2012). Integration of electro coagulation and adsorption for the treatment of tannery wastewater - The case of an Algerian factory, Rouiba. *Procedia Engineering*, 33, 98–101. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1181>
- Apaza, H. (2019). Eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de materia orgánica de las aguas del río Torococha. *Revista Científica de Investigaciones Ambientales*, 2(2), 8–18. Recuperado de <http://revistas.upsc.edu.pe/journal/index.php/RIAM/article/view/57>
- Babu, R. R., Bhadrinarayana, N. S., Meera, K. M., Begum, M. S., & Anantharaman, N. (2007). Treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 42(2), 201–206. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/N_Anantharaman/publication/228625432_Treatment_of_tannery_wastewater_by_electrocoagulation/link/s/53e959360cf2dc24b3cab436/Treatment-of-tannery-wastewater-by-electrocoagulation.pdf
- Barrera-Díaz, C. E., Balderas-Hernández, P., & Bilyeu, B. (2018). Electrocoagulation: Fundamentals and perspectives. In *Electrochemical Water and Wastewater Treatment*, 61–76. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813160-2.00003-1>
- Carreño, U. F. (2016). Diseño y evaluación de un biosistema de tratamiento a escala piloto de aguas de curtiembres a través de la *Eichhornia crassipes*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 18(2), 74–81. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n2.52271>
- Cheballah, K., Sahmoune, A., Messaoudi, K., Drouiche, N., & Lounici, H. (2015). Simultaneous removal of hexavalent chromium and COD from industrial wastewater by bipolar electrocoagulation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 96, 94–99. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2015.08.007>
- Cristancho-Montenegro, D. L., Pinto-Hernández, L. M., & Tique-Hilarión, J. S. (2019). Evaluación de la eficiencia de un sistema de electrocoagulación en los vertimientos de curtiembres en el sector de Villapinzón (Cundinamarca). *Mutis*, 9(2). <https://doi.org/10.21789/22561498.1590>
- Cuesta-parra, D. M., Velazco-rincón, C. L., & Castro-pardo, J. C. (2018). Evaluación ambiental asociada a los vertimientos de aguas residuales generados por una empresa de curtiembres en la cuenca del río Aburrá. *UIS Ingenierías*, 17(2), 141–152. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018013>
- De La Cruz, P. J., Silva, E. H., & Inca, J. L. (2017). *Tratamiento de aguas residuales de la industria de curtiembre mediante el método de electrocoagulación para la reducción de la demanda química de oxígeno y cromo* (Tesis pregado). Universidad Nacional del Callao, Lima. Recuperado de <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/UNAC/3594>
- Deghles, A., & Kurt, U. (2016). Treatment of tannery wastewater by a hybrid electrocoagulation/electrodialysis process. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 104, 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.02.009>
- Elabbas, S., Ouazzani, N., Mandi, L., Berrekhis, F., Perdicakis, M., Pontvianne, S., ... Leclerc, J. P. (2016). Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: Influence of the quality of aluminium used for the electrode. *Journal of Hazardous Materials*, 319, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.067>
- Elahi, A., Ajaz, M., Rehman, A., Vuilleumier, S., Khan, Z., & Hussain, S. Z. (2019). Isolation, characterization, and multiple heavy metal-resistant and hexavalent chromium-reducing Microbacterium testaceum B-HS2 from tannery effluent. *Journal of King Saud University - Science*, 31(4), 1437–1444. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.02.007>
- Emamjomeh, M. M., & Sivakumar, M. (2009). Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *Journal of Environmental Management*, 90(5), 1663–1679. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.12.011>
- Espinoza-Quifones, F. R., Fornari, M. M. T., Módenes, A. N., Palácio, S. M., da Silva, F. G., Szymanski, N., ... Trigueros, D. E. G. (2009).

- Pollutant removal from tannery effluent by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*, 151(1–3), 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.01.043>
- Espinoza-Quifones, F. R., Fornari, M. M. T., Módenes, A. N., Palácio, S. M., Trigueros, D. E. G., Borba, F. H., & Kroumov, A. D. (2009). Electrocoagulation efficiency of the tannery effluent treatment using aluminium electrodes. *Water Science and Technology*, 60(8), 2173–2185. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.518>
- Ferro-Rodríguez, D. E., Castiblanco-Rocha, J. C., Agudelo-Valencia, R. N., & Ruiz-Martínez, L. E. (2019). Evaluación de un sistema de centrifugación para el secado de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales en la curtiembre El Escorpión del municipio de Villapinzón, Cundinamarca. *Revista Vínculos*, 16(2). <https://doi.org/10.14483/2322939X.15188>
- Guerrero, A. de D. (2017). *Influencia del tiempo y voltaje en la disminución de la carga orgánica por electrocuagulación del agua residual de la curtiembre Cuenca S.A.C.* (Tesis pregrado). Universidad Cesar Vallejo, Trujillo. Recuperado de <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/26426>
- Langård, S., & Costa, M. (2015). Chromium. In *Handbook on the Toxicology of Metals: Fourth Edition* (p. 717–742). Elsevier.
- Mahmad, M. K. N., Rozainy, M. A. Z. M. R., Abustan, I., & Baharun, N. (2016). Electrocoagulation Process by Using Aluminium and Stainless Steel Electrodes to Treat Total Chromium, Colour and Turbidity. *Procedia Chemistry*, 19, 681–686. <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.03.070>
- Ministerio de la Producción. (2002). Decreto supremo N° 003-2002-PRODUCE .- Aprueban límites máximos permisibles y valores referenciales para las actividades industriales de cemento, cerveza, curtiembre y papel. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-limites-maximos-permisibles-valores-referenciales-las>
- Mohammed, K., & Sahu, O. (2019). Recovery of chromium from tannery industry waste water by membrane separation technology: Health and engineering aspects. *Scientific African*, 4, e00096. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2019.e00096>
- Muruganathan, M., Raju, G. B., & Prabhakar, S. (2004). Separation of pollutants from tannery effluents by electro flotation. *Separation and Purification Technology*, 40, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.01.005>
- Nidheesh, P. V., Kumar, A., Syam Babu, D., Scaria, J., & Suresh Kumar, M. (2020). Treatment of mixed industrial wastewater by electrocoagulation and indirect electrochemical oxidation. *Chemosphere*, 251, 126437. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.12.6437>
- Numpaque, R. V., & Viteri, S. E. (2016). Biotransformación del pelo residual de curtiembres. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 33(2), 95–105. <https://doi.org/10.22267/rcia.163302.56>
- Quijano, A., Castillo, C., & Meléndez, I. (2015). Potencial mutagénico y genotóxico de aguas residuales de la curtiembre Tasajero en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 18(1), 13–20. <https://doi.org/10.31910/rudca.v18.n1.2015.449>
- Reyes-Serrano, A., López-Alejo, J. E., Hernández-Cortázar, M. A., & Elizalde, I. (2020). Removing contaminants from tannery wastewater by chemical precipitation using CaO and Ca(OH)₂. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.12.023>
- Sanjay, M. S., Sudarsanam, D., Raj, G. A., & Baskar, K. (2020). Isolation and identification of chromium reducing bacteria from tannery effluent. *Journal of King Saud University - Science*, 32(1), 265–271. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.05.001>
- Villacorta, Z. S., & Rios, D. A. (2019). *Sistema de electrocuagulación para el tratamiento de aguas residuales de la curtiembre de piel de paiche (Arapaima gigas) en el cite pesquero, región Ucayali* (Tesis pregrado). Universidad Nacional de Ucayali, Pucallpa. Recuperado de <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/4290>