

Condiciones técnicas del proceso de electrocoagulación para una remoción eficiente de cromo y DQO en aguas residuales industriales de curtiembre

Linda Carolina Cerna Huertas

linda.cerna.22@gmail.com

[ORCID: 0000-0001-8584-5229](https://orcid.org/0000-0001-8584-5229)

Ing. Ambiental, Universidad Privada del Norte,
Trujillo, Perú.

Albert Stony Gamboa Zavala

2al.gamboa.zavala@gmail.com

[ORCID: 0000-0002-8228-2616](https://orcid.org/0000-0002-8228-2616)

Ing. Ambiental, Universidad Privada del Norte,
Trujillo, Perú.

Carlos Alberto Alva Huapaya

3caahrrhh@yahoo.es

[ORCID: 0000-0002-0983-3151](https://orcid.org/0000-0002-0983-3151)

MSc. en Ingeniería de Recursos Hídricos,
Docente de la Universidad Privada del Norte,
Lima, Perú.
+51949703460

RESUMEN

Se estudiaron las condiciones técnicas del proceso de Electrocoagulación (EC) para una remoción eficiente de Cromo y DQO en aguas residuales industriales de curtiembre. Para ello se llevó a cabo una búsqueda literaria y se registraron los datos de las condiciones técnicas del proceso de EC de diferentes autores, describiendo sus eficiencias, en una matriz de normalización, estandarizando la información a unidades del SI, para comparar estadísticamente las condiciones técnicas de operación que lograron mayores eficiencias de remoción. El análisis de datos se llevó a cabo en los softwares megastat y minitab 19, utilizando datos de las 14 investigaciones seleccionadas; asimismo se aplicó la prueba de correlación de Rho de Spearman para demostrar la relación entre el porcentaje de remoción de Cromo y DQO, estando

relacionadas, pero con baja intensidad ($r=0.2$); además, las regresiones lineales y pruebas estadísticas descriptivas muestran que las variables de pH inicial, amperaje, densidad de corriente, así como el material de electrodo, tipo de reactor y uso de agitador magnético influyen en la eficiencia de remoción de estos contaminantes. Finalmente, la tecnología de electrocoagulación pura fue la más usada por los investigadores.

Palabras clave: Electrocoagulación; tratamiento; remoción; cromo; DQO.

Technical conditions of the electrocoagulation process for an efficient removal of chromium and DQO in industrial wastewater from tannery

ABSTRACT

The technical conditions of the Electrocoagulation (EC) process for an efficient removal of Chromium and COD in industrial tannery wastewater were studied. For this, a literature search was carried out and the data of the technical conditions of the CE process of different authors were registered, describing their efficiencies, in a normalization matrix, standardizing the information to SI units, to statistically compare the technical conditions. of operation

that achieved higher removal efficiencies. The data analysis was carried out in the megastat and minitab 19 software, using data from the 14 selected investigations; Likewise, the Spearman's Rho correlation test was applied to demonstrate the relationship between the percentage of removal of Chromium and COD, being related, but with low intensity ($r=0.2$); In addition, the linear regressions and descriptive statistical tests show that the variables of initial pH, amperage, current density, as well as the electrode material, type of reactor and use of magnetic stirrer influence the removal efficiency of these contaminants. Finally, pure electrocoagulation technology was the most used by researchers.

Keywords: electrocoagulation; treatment; removal; chrome; COD.

Artículo recibido: 05 febrero 2022

Aceptado para publicación: 28 febrero 2022

Correspondencia: linda.cerna.22@gmail.com

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso esencial para el desarrollo de la vida en la tierra, la Organización Mundial de la Salud [OMS] explica que la cantidad de agua dulce es bastante limitada y que su calidad se ve comprometida por la presencia de productos químicos, radiaciones, metales pesados, agentes infecciosos entre otros elementos. Por su parte, el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (por sus siglas OEFA) define las aguas residuales como aquellas cuyas características originales han sido modificadas por el desarrollo de actividades humanas y que requieren un tratamiento previo, antes de ser reusadas, vertidas a un cuerpo receptor o descargadas al sistema de alcantarillado (2014).

Aproximadamente el 70% de aguas residuales no reciben tratamiento en Latinoamérica, dificultado su reincorporación en el ciclo del agua, en primer lugar por los niveles de contaminación a los que pueden llegar estas aguas. Asimismo, en Perú, solo el 30% de la inversión pública se ejecuta en tratamiento de agua, esto representa un grave riesgo para la conservación de su calidad (Larios, Gonzáles y Morales, 2015). Según datos del Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI] (2019) en el año 2014, se generaban diariamente 1'202,286 m³ de aguas residuales en Lima Metropolitana, de las cuales únicamente eran tratadas el 21.2%. Esto debido a que la infraestructura de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) es insuficiente para los volúmenes generados. La falta de infraestructuras y deficientes procesos en el tratamiento de aguas residuales son los principales problemas para el aseguramiento de la calidad de los cuerpos de agua.

En La Libertad, la afección por aguas residuales no tratadas proviene por efluentes de las actividades extractivas y productivas de la región, principalmente de minería y curtiembre. Neyra y Llenque, señalan que estas aguas contaminadas alteran la calidad del agua de los cuerpos receptores, siendo la cuenca del río Moche una de las más afectadas, donde predominan metales pesados como cromo, cobre, cadmio, plomo y concentraciones elevadas de DQO, DBO₅, coliformes, entre otros agentes contaminantes (2011).

Todos estos factores han abierto camino para la revisión de los tratamientos convencionales y la propuesta de nuevas tecnologías para un tratamiento más exigente. Una de estas nuevas tecnologías es la electrocoagulación, proceso que consiste en la

desestabilización de las partículas contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, por la inducción de corriente eléctrica en el agua a través de placas paralelas de diversos materiales (Arango, 2005). La deficiencia en las investigaciones sobre las condiciones técnicas de este proceso, en el tratamiento de aguas residuales, se considera un problema para la investigación y el desarrollo de mejores propuestas

En ese sentido, la presente investigación se justificó por el criterio de oportunidad, ya que sirvió para resaltar el hecho de que, aunque la electrocoagulación ha demostrado ser eficiente, aún se necesitan explorar los factores que influyen en su efectividad a la hora de remover metales pesados como el Cromo (Cr total y Cr³⁺). Desde el criterio teórico, porque hay déficit de información y permitirá la revisión del tema desde un punto de vista técnico y empírico. Desde el criterio metodológico se justificó, porque permite el desarrollo de herramientas para cuantificar la realidad de las variables y su relación entre ellas. Asimismo, la presente investigación tiene importantes implicaciones prácticas, ya que permite mostrar las variables que más influyen en la Electrocoagulación y crear sobre ellas diseños y propuestas de mejores tecnologías eficientes y rentables.

Como objetivo general la investigación busca determinar las condiciones técnicas del proceso de electrocoagulación para lograr una remoción eficiente de Cromo (Cr Total y Cr³⁺) y DQO en aguas residuales industriales de curtiembre. Además, como objetivos específicos se plantea identificar las eficiencias de las diferentes técnicas y tecnologías de electrocoagulación en la remoción de Cromo y DQO de curtiembres., así como identificar la relación que tiene la remoción de Cromo y DQO a través de la aplicación de tecnologías de electrocoagulación.

2. ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS O MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación fue de tipo no experimental, debido a que se realizó sin manipular las variables, es decir, las variables se muestran tal y como se encuentran en su estado natural para realizar análisis frente a ellas. El diseño de investigación fue descriptivo porque describe las condiciones técnicas de la Electrocoagulación para una remoción eficiente de Cromo y DQO, además es explicativo pues no solo muestra describe un problema, sino que intenta encontrar las causas del mismo, explicando el comportamiento de las condiciones de operación en la eficiencia de remoción de

contaminantes (Monjarás, et al, 2019). Es de corte longitudinal pues la investigación toma datos de las eficiencias de remoción a partir de investigaciones publicadas en los últimos 20 años, además tiene un enfoque cuantitativo, ya que se realizó una recolección de datos para probar las hipótesis propuestas previamente respecto a la remoción eficiente de Cromo y DQO (Sampieri, 2020).

La población del presente trabajo de investigación corresponde a todas las tecnologías de electrocoagulación, mientras que la muestra corresponde a las condiciones técnicas de las tecnologías de electrocoagulación aplicadas a la remoción de Cromo y DQO en aguas residuales industriales de curtiembre. El tipo de muestreo es no probabilístico y es el muestreo crítico o por juicio, tomando una muestra por juicio donde se incluyen únicamente las condiciones técnicas de electrocoagulación aplicadas a la remoción de contaminantes (Cr Total, Cr III y DQO) en aguas residuales de industrias de curtiembre. En este caso, los investigadores pueden utilizar un muestreo intencional porque los entrevistados cumplen con una descripción o propósito específico que es necesario para realizar la investigación.

La técnica de recolección de datos utilizada en la presente investigación fue la de investigación documental, la metodología para la búsqueda de información fue la misma que la de una revisión sistemática, mismo que consiste en cuatro etapas esenciales: identificación; tamizaje; elegibilidad de textos; y la inclusión de artículos en la revisión sistemática (Bolaños y Calderón, 2014). Además, como instrumentos se utilizaron matrices de búsqueda de información, selección de artículos, y la matriz de normalización de condiciones técnicas de Electrocoagulación para la remoción de Cromo y DQO en aguas residuales industriales de curtiembre.

El procesamiento de datos será aplicado de acuerdo al diseño de investigación en los softwares MegaStat y Minitab; para la descripción de las variables se utilizará la estadística descriptiva, en distribución de frecuencias y presentación de gráficos. Asimismo, se aplicará la técnica no paramétrica de la correlación de Spearman, utilizada para medir el grado de asociación entre dos cantidades sin tomar en cuenta el nivel de acuerdo y concordancia (Martínez et al, 2009). Este coeficiente es muy útil para muestras de estudio menor a 50, cuando el número de pares de sujetos (n) que se debe asociar es pequeño. (Mondragón Barrera, 2014). El coeficiente no se ve afectado por

los cambios en las unidades de medida; utiliza los rangos, números de orden, de cada grupo de sujetos y compara dichos rangos (Santander et al, 2004).

El gráfico por excelencia es el conocido diagrama de dispersión, puesto que la posición de puntos muestra si la relación es lineal a través precisamente de una línea de fácil observación por el investigador. En el mismo, la variable independiente se coloca en el eje de las abscisas y la dependiente en el eje de las ordenadas. El valor de r se debe mostrar con dos decimales junto con el valor de la p , si el test de hipótesis se realizó para demostrar que r es estadísticamente diferente de cero. El número de observaciones debe a su vez estar indicado. Ahora bien, para corroborar el resultado matemático obtenido se presentará un diagrama de dispersión. Diversos autores expresan diferentes escalas de interpretación, la utilizada en la presente investigación fue la propuesta por Hernández Sampieri y Fernández Collado. La explicación de un coeficiente de correlación como medida de la intensidad de la relación lineal entre dos variables es puramente matemática y libre de cualquier implicación de causa-efecto. El hecho de que las dos variables tiendan a crecer o decrecer juntas no implica que una tenga algún efecto directo o indirecto sobre la otra. Ambas pueden ser influidas por otras variables de modo que se origine una fuerte relación matemática. La interpretación de rho depende principalmente de los detalles de la investigación y la experiencia propia en el tema de estudio. Tal y como se lo mencionan en su investigación, la experiencia previa sirve generalmente como base de comparación para determinar si un coeficiente de correlación es digno de ser mencionado (Ortega et al, 2009).

El procedimiento de la investigación comenzó con la recopilación de información de las técnicas y tecnologías de electrocoagulación mediante la técnica de investigación documental que se ciñó a la de una revisión sistemática, aplicando criterios de búsqueda de información, así de inclusión y exclusión para la selección de información. Las técnicas y tecnologías de electrocoagulación fueron procesadas analíticamente y se extrajeron los datos referentes a las condiciones técnicas óptimas en cada uno de los procesos, así como valores iniciales y finales de Cromo y DQO, todos los datos fueron normalizados y estandarizados a unidades internacionales para realizar un análisis más uniforme esto se pudo organizar mediante la matriz de normalización de condiciones técnicas de EC para remoción de Cromo y DQO en aguas residuales de curtiembres.

Luego, se identificaron las eficiencias de las tecnologías de electrocoagulación calculando los porcentajes de remoción de Cromo y DQO en aguas residuales de curtiembre. Posteriormente se procesaron los datos de las condiciones técnicas óptimas con los porcentajes de remoción llevando a cabo pruebas estadísticas descriptivas e inferenciales. Se realizaron regresiones lineales entre las variables de las técnicas y tecnologías de EC frente a los valores de remoción de Cromo y DQO determinando las relaciones existentes y su influencia en la efectividad de las tecnologías de electrocoagulación. Por otra parte, se procesaron los porcentajes de remoción del proceso de mediante la prueba estadística del coeficiente de correlación de Spearman para determinar la relación existente entre las variables de remoción de Cromo y remoción de DQO. Se estableció un nivel de significancia de 0.05, valor que funciona adecuadamente e indica un riesgo de 5% en dicho coeficiente de correlación es estadísticamente significativo se estableció (es decir, un nivel de confianza del 95%) según lo indicado por Mondragón Barrera, anteriormente citado.

Por último, se presentó un resumen de las condiciones técnicas de electrocoagulación que mostraron un mayor efecto en la eficiencia de la remoción de Cromo y DQO en aguas residuales de curtiembres.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se procesaron catorce distintos trabajos de técnicas y tecnologías de electrocoagulación, estas investigaciones proporcionaron datos sobre los parámetros iniciales y condiciones administradas de EC, por la cantidad de condiciones técnicas de operación se dividieron la presentación de datos en dos matrices de condiciones técnicas de Electrocoagulación para la remoción de Cromo y DQO en aguas residuales industriales de curtiembre, la Tabla N 01 contiene información de : pH inicial, conductividad inicial, concentración inicial de DQO y Cr; así como condiciones de diseño y energía administrada: voltaje, amperaje, densidad de corriente, tiempo de contacto y naturaleza de cromo. La segunda tabla (tabla N° 02) muestra las condiciones de diseño del proceso de electrocoagulación y describe variables cualitativas y cuantitativas, tales como: tipo de reactor, diseño de electrocoagulación, material de electrodos, capacidad del reactor, cantidad de electrodos, distancia de separación entre electrodos y área de reacción. En ambas tablas se muestran las eficiencias de electrocoagulación basadas en la remoción de los porcentajes de concentración de contaminantes como Cromo y DQO.

Tabla 1.

Matriz de condiciones técnicas de Electrocoagulación para la remoción de Cromo y DQO en aguas residuales industriales de curtiembre (Condiciones iniciales).

Contaminante	Parámetros iniciales				Condiciones óptimas de operación				Eficiencias		Tecnología de EC	Autor
	Condiciones iniciales de la solución								Remoción de DQO (%)	Remoción de Cromo (%)	Tipo de tecnología	Autor(es) de la investigación
Naturaleza del Cromo	pH ₀	Conductividad (k _o) mS/cm	DQO (COD ₀) - mg/L	Cromo (Cr ₀) mg/L	Voltaje (V)	Amperaje (A)	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Tiempo de contacto ideal (min)				
Cr ³⁺	4.22	36.05	1132	1470	10	9	183.67	45	47.78%	97.72%	EC Pura	Mayta, R. Mayta, J.
Cr Total	7.06	46	26040	50	20	20	400	15	83.33%	84.00%	EC Mixta	Apaza, H., Carrillo, E., Castilla, D. y Huaraya, F.
Cr Total	7.42	21.63	3700	22	10	1.5	33.3	30	49.00%	97.00%	EC Pura	Apaydin, O, Kurt, U. y Gonullu, M.
Cr Total	7.00	11.71	2800	570	30	1.85	50	25	64.40%	99.00%	EC Pura	Deghles, A. y Kurt, U.
Cr ³⁺	4.52	12.05	23350	3596	30	5	57.87	60	64.00%	99.76%	EC Pura	Gilpavas, E., Dobroski, Gomez, I. y Gómez García A.
Cr ³⁺	3.42	32.5	1050	2700	0.5	3	97.59	90	65.70%	99.40%	EC Pura	Amar, S., Animes, G. y Subhabrata, R.
Cr Total	8.85	-	24900	267.8	12	5	50	90	36.00%	52.80%	EC Pura	Cristancho, D., Pinto, L. y Tique, J.

Cr Total	8.00	21.1	12225	50	30	5.5	68	30	53.50%	99.00%	EC Pura	Espinoza, F.; Fornari, M.; Módenes, A.; Palacio, S.; Da Silva, F.; Szymanski, N.; Kroumov, A. y Trigueros, D.
Cr ³⁺	3.8	54.2	5800	7000	3	4.2	400	360	95.00%	99.70%	EC Pura	Elabbas, S.; Ouazzani, N.; Mandi, L.; Berrekhis, F.; Perdicakis, M.; Pontvianne, S.; Pons, M.; Lopicque, F. y Leclerc, J.
Cr Total	7.10	2.36	7680	18.4	-	1	75	45	95.31%	93.15%	EC Pura	Amel, B; Mourad, T. y Rachida, M.
Cr Total	6.00	23	2800	570	24	0.63	14	45	73.00%	99.98%	EC Pura	Abdalhadi, U.
Cr Total	4.07	71.91	387.2	2000	3	3	57.7	110	82.00%	97.76%	EC Pura	Mella, B., Glanert, A. y Gutterres, M.
Cr Total	7.40	8.45	1600	15	30	5	15	60	90.70%	67.00%	EC Mixta	Keerthi, V y Balasubramanian, N.
Cr Total	7	2480	6758	12.59	-	3.6	22.4	20	95.00%	100.00%	EC Pura	Kongjao, S., Damronglerd, S. y Hunsom, M.

Nota. Los valores de los parámetros iniciales de operación y condiciones óptimas de operación se encuentran estandarizados a las unidades métricas internacionales, el cálculo de las eficiencias de Cromo y DQO se realizaron mediante la diferencia de las concentraciones iniciales y finales del contaminante sobre la concentración inicial. La nomenclatura de EC Pura corresponde al uso de técnicas y tecnologías propias de la Electrocoagulación, mientras EC Mixta corresponde al uso de técnicas y tecnologías no propias de EC en su operación, tales como filtración, disolución química, biofiltración, entre otros. (-) Significa dato no proporcionada por los investigadores.

Tabla 2.

Matriz de condiciones técnicas de Electrocoagulación para la remoción de Cromo y DQO en aguas residuales industriales de curtiembre (Condiciones de diseño).

Diseño							Eficiencias	Tecnología de EC	Autor	
Condiciones del diseño de EC										
Tipo de Reactor	Uso de técnicas adicionales	Material de electrodos	Capacidad del reactor (L)	Cantidad de electrodos	Distancia de separación entre electrodos (mm)	Área de reacción (cm ²)	Remoción de DQO (%)	Remoción de Cromo (%)	Tipo de tecnología	Autor(es) de la investigación
Batch plexiglás	de No	Al - Al	1.30	6	10	49	47.78%	97.72%	EC Pura	Mayta, R. Mayta, J.
Batch acrílico	de (4 etapas)	Al - Al	2.50	6	25	48	83.33%	84.00%	EC Mixta	Apaza, H., Carrillo, E., Castilla, D. y Huaraya, F.
Batch vidrio	de No	Fe - Fe	0.50	2	60	45	49.00%	97.00%	EC Pura	Apaydin, O, Kurt, U. y Gonullu, M.
Batch plexiglás	de Agitador magnético	Al - Al	0.60	2	50	37	64.40%	99.00%	EC Pura	Deghles, A. y Kurt, U.
Batch plexiglás	de No	Al - Al	0.30	2	50	27	64.00%	99.76%	EC Pura	Gilpavas, E., Dobrosz-Gomez, I. y Gómez-García A.
Batch plexiglás	de Agitador magnético	Al - Al	0.80	2	22	30.74	65.70%	99.40%	EC Pura	Amar, S., Animes, G. y Subhabrata, R.
Batch plexiglás	de Agitador magnético	Al - Fe	5.00	10	20	100	36.00%	52.80%	EC Pura	Cristancho, D., Pinto, L. y Tique, J.

Batch de polietileno	No	Fe - Fe	5.00	2	40	80.5	53.50%	99.00%	EC Pura	Espinoza, F.; Fornari, M.; Módenes, A.; Palacio, S.; Da Silva, F.; Szymanski, N.; Kroumov, A. y Trigueros, D.
Batch de plexiglás	Agitador magnético	A-U4G	2.50	2	20	105	95.00%	99.70%	EC Pura	Elabbas, S.; Ouazzani, N.; Mandi, L.; Berrekhis, F.; Perdicakis, M.; Pontvianne, S.; Pons, M.; Lapicque, F. y Leclerc, J.
Batch de plexiglás	Agitador magnético	Al - Al	1.00	2	30	28	95.31%	93.15%	EC Pura	Amel, B; Mourad, T. y Rachida, M.
Batch de plexiglás	No	Al - Al	2.50	10	7	45	73.00%	99.98%	EC Pura	Abdalahdi, U.
Batch de vidrio	Agitador magnético	Al - Al	0.50	2	20	52	82.00%	97.76%	EC Pura	Mella, B., Glanert, A. y Gutterres, M.
Bio reactor con membrana	Bio reactor de membrana	AISI - Al	65.80	2	50	487.5	90.70%	67.00%	EC Mixta	Keerthi, V y Balasubramanian, N.
Batch de plexiglás	Recirculación	Fe - Fe	0.30	6	50	161	95.00%	100.00%	EC Pura	Kongjao, S., Damronglerd, S. y Hunsom, M.

Nota. Los valores de las condiciones de diseño se encuentran estandarizados a las unidades métricas internacionales. La nomenclatura de EC Pura corresponde al uso de técnicas y tecnologías propias de la Electrocoagulación, mientras EC Mixta corresponde al uso de técnicas y tecnologías no propias de EC en su operación, tales como filtración, disolución química, biofiltración, entre otros.

A partir de la presentación de información en las matrices de normalización se aplicó estadística descriptiva. Identificando el Promedio, desviación estándar, valor mínimo, máximo y mediana de las eficiencias del proceso de EC de los contaminantes expresadas en porcentajes de remoción.

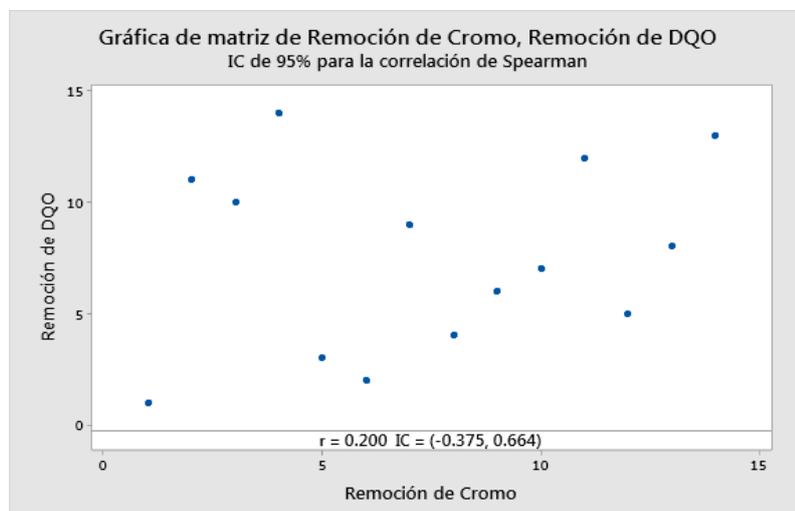
Tabla 3. Estadística descriptiva de las eficiencias de EC.

Estadística Descriptiva	Remoción de DQO (%)	Remoción de Cromo (%)
Promedio	71.05	91.88
Desviación Estándar	19.77	14.46
Valor Mínimo	36.00	52.80
Valor Máximo	95.31	100.00
Mediana	69.35	98.38

Nota. La estadística descriptiva fue realizada a través del uso de Minitab 19. Estadística descriptiva. Los resultados muestran mayores eficiencias del proceso de EC en la remoción de Cromo, incluso en los valores mínimos de remoción.

Seguidamente, para hallar la relación existente entre la remoción de cromo y DQO mediante las tecnologías de electrocoagulación exploradas se sometieron a una prueba de correlación de Rho de Spearman que permite hallar el grado e intensidad de relación entre dos variables, en este caso dos variables dependientes (remoción de cromo y DQO). Para ello, se asignaron valores jerárquicos a los resultados de los porcentajes de remoción y se realizó la prueba estadística mediante el software de minitab. Para calcular la correlación de Spearman, Minitab jerarquiza los datos sin procesar. Luego, el programa calcula el coeficiente de correlación con los datos jerarquizados. Estos datos son presentados en la figura 1, donde se puede encontrar información de los intervalos de confianza de 95% para la correlación.

Figura 1. Gráfica de correlación de Spearman.



Nota. Se clasificó por jerarquías los 28 valores de remoción de ambas variables, bajo la clasificación de X y Y. Se calcula “di” para cada pareja de datos obtenidos, restando la jerarquía de Y de la de X. Se eleva al cuadrado cada “di” y se calcula la suma de los valores al cuadrado. El grado de confiabilidad establecido de 95%.

Tabla 4.

Correlación de Rho de Spearman.

	Remoción de Cromo
Remoción de DQO	0.200

Nota. Minitab 19. Correlación de Spearman. El valor calculado de r es menor que el valor crítico (0.50) para Rho de Spearman, en un nivel de significancia de 0,05.

Posteriormente, se realizaron pruebas estadísticas de regresión para cada una de las condiciones técnicas, tanto de diseño, condiciones iniciales o condiciones de operación con las eficiencias de las tecnologías de electrocoagulación expresadas en los porcentajes de remoción de Cr y DQO. A continuación, se presentan los resultados más significativos de las pruebas de regresión lineal de las condiciones técnicas (variable independiente) y su grado de relación con la variable dependiente (porcentaje de remoción de Cromo).

Tabla 5.

Regresión lineal pH inicial vs % de remoción de Cromo

Source	SS	df	MS	F	p-value
Regression	0.0852	1	0.0852	5.48	.0372
Residual	0.1865	12	0.0155		
Total	0.2718	13			

Variables	Coefficients	Std. Error	T (Df=12)	P-Value	95% Lower	95% Upper
Intercept	1.1992	0.1243	9.648	5.27E-07	0.9284	1.4700
pH 0	-0.0457	0.0195	-2.342	.0372	-0.0883	-0.0032

Nota. Análisis de varianza un solo valor ANOVA, regresión lineal. Fuente Megastat.

Además de regresiones lineales simples, también se realizaron regresiones lineales agrupadas para medir el grado de influencia de un conjunto de condiciones técnicas frente a su influencia en la remoción del cromo.

Tabla 5.

Regresión lineal condiciones de diseño vs % de remoción de Cromo.

Source	SS	Df	MS	F	P-Value	
Regression	0.1398	4	0.0350	1.97	.2043	
Residual	0.1244	7	0.0178			
Total	0.2643	11				

Regression Output				Confidence Interval		
Variables	Coefficients	Std. Error	T (Df=7)	P-Value	95% Lower	95% Upper
Intercept	1.1043	0.1266	8.726	.0001	0.8051	1.4036
Voltaje (V)	0.00045455	0.0041	0.112	.9138	-0.00912602	0.01003512
Amperaje (A)	-0.0574	0.0208	-2.762	.0280	-0.1065	-0.0083
Densidad De Corriente	0.0023	0.0009	2.647	.0331	0.0003	0.0044
Tiempo De Contacto	-0.0022	0.0010	-2.239	.0602	-0.0045	0.0001

Nota. Análisis de varianza diferencias valores, regresión lineal del Voltaje, Amperaje, Densidad de Corriente y Tiempo de contacto en simultáneo y su incidencia en la Remoción de Cromo.

Tabla 6

Regresión lineal cantidad de electrodos vs % de remoción de Cromo.

Source	SS	Df	MS	F	P-Value	
Regression	0.0608	1	0.0608	3.46	.0876	
Residual	0.2109	12	0.0176			
Total	0.2718	13				

Regression Output				Confidence Interval		
Variables	Coefficients	Std. Error	T (Df=12)	P-Value	95% Lower	95% Upper
Intercept	1.0088	0.0600	16.815	1.05E-09	0.8781	1.1395
Cantidad De Electrodo	-0.0225	0.0121	-1.860	.0876	-0.0489	0.0039

Nota. Análisis de varianza un solo valor ANOVA, regresión lineal. Fuente Megastat.

Tabla 7.

Porcentajes de remoción Cromo de acuerdo al material de electrodo usado.

	Al-Al	Fe-Fe
Conteo	8	3
Promedio (%)	91.33	88.25

Nota. Estadística descriptiva. Fuente Megastat.

Tabla 8.

Porcentajes de remoción de Cromo de acuerdo a la naturaleza del contaminante

	Cromo Total	Cromo (III)
Conteo	10	4
Promedio (%)	88.96	99.14

Nota. Estadística descriptiva. Fuente Megastat. Se observa una mayor eficiencia en la remoción de Cr³⁺

Tabla 9.

Uso de agitador magnético vs % remoción de Cr.

Source	SS	Df	MS	F	P-Value
Regression	0.0775	1	0.0775	3.38	.1086
Residual	0.1606	7	0.0229		
Total	0.2381	8			

Regression Output				Confidence Interval		
Variables	Coefficients	Std. Error	T (Df=7)	P-Value	95% Lower	95% Upper
Intercept	1.1747	0.1659	7.080	.0002	0.7824	1.5670
Diseño Adicional	-0.1868	0.1016	-1.838	.1086	-0.4270	0.0535

Nota. Análisis de varianza un solo valor ANOVA, regresión lineal. Fuente Megastat.

En cuanto a los resultados de la relación entre condiciones técnicas de operación y la eficiencia de las tecnologías para electrocoagulación en la remoción en Demanda Química de Oxígeno, se muestran las pruebas estadísticas de regresión lineal más significativas en las tablas presentadas a continuación.

Tabla 11.

Regresión lineal pH inicial vs % de remoción de DQO

Source	SS	Df	MS	F	P-Value
Regression	0.0199	1	0.0199	0.49	.4983
Residual	0.4885	12	0.0407		
Total	0.5083	13			

Regression Output					Confidence Interval	
Variables	Coefficients	Std. Error	T (Df=12)	P-Value	95% Lower	95% Upper
Intercept	0.8459	0.2012	4.205	.0012	0.4076	1.2841
Ph 0	-0.0221	0.0316	-0.698	.4983	-0.0909	0.0468

Nota. Análisis de varianza un solo valor ANOVA, regresión lineal. Fuente Megastat.

Tabla 102.

Regresión lineal conductividad inicial vs % de remoción de DQO

Source	SS	Df	MS	F	P-Value
Regression	0.04998257	1	0.04998257	1.69	.2206
Residual	0.32601902	11	0.02963809		
Total	0.37600158	12			

Regression Output					Confidence Interval	
Variables	Coefficients	Std. Error	T (Df=11)	P-Value	95% Lower	95% Upper
Intercept	0.7169	0.0503	14.249	1.95E-08	0.6062	0.8276
Conductividad (K 0) Ms/Cm	0.00009488	0.00007306	1.299	.2206	-0.00006593	0.00025568

Nota. Análisis de varianza un solo valor ANOVA, regresión lineal. Fuente Megastat.

Tabla 11.

Porcentajes de remoción de DQO de acuerdo al material de electrodo usado.

	<i>Al-Al</i>	<i>Fe-Fe</i>
Conteo	8	3
Promedios (%)	71.94	65.83

Nota. Estadística descriptiva. Fuente Megastat.

Tabla 12.

Porcentajes de remoción de DQO de acuerdo a la naturaleza del contaminante.

	Cromo total	Cromo (III)
Conteo	10	4
Promedios (%)	65.96	83.76

Nota. Estadística descriptiva. Fuente Megastat.

Tabla 15.

Uso de agitador magnético vs % de remoción de DQO.

Source	SS	Df	MS	F	P-Value
Regression	0.0836	1	0.0836	5.26	.0555
Residual	0.1112	7	0.0159		
Total	0.1948	8			

Regression Output				Confidence Interval		
Variables	Coefficients	Std. Error	T (Df=7)	P-Value	95% Lower	95% Upper
Intercept	0.9625	0.1381	6.972	.0002	0.6360	1.2889
Diseño Adicional	-0.1940	0.0845	-2.294	.0555	-0.3939	0.0059

Nota. Análisis de varianza un solo valor ANOVA, regresión lineal. Fuente Megastat.

Finalmente, se presentó una tabla resumen las condiciones óptimas de operación observadas en las pruebas estadísticas, se tomaron en cuenta aquellas que mostraron alguna significancia en la remoción de los contaminantes.

Tabla 13.

Tabla resumen de condiciones óptimas de operación.

Parámetros óptimos	Remoción de Cromo	Remoción de DQO
pH inicial	4.35	-
Amperaje	1.81	-
Densidad de Corriente	45.3	-
Electrodo Usado	Al - Al	Al - Al
Contaminante Principal	Cr III	Cr III
Material de Reactor	Plexiglás	Plexiglás
Uso de Agitador Magnético	No	No
Tipo de Tecnología	Electrocoagulación Pura	Electrocoagulación Pura

Nota. Los valores estimados de pH inicial, Amperaje y Densidad de corriente se obtuvieron a partir de las regresiones lineales de las condiciones técnicas y los porcentajes de remoción, siendo los estimados aquellos para un porcentaje de remoción

de 100%. Por otro lado, los valores cualitativos de electrodo usado, contaminante principal, material de reactor, uso de agitador magnético y tipo de tecnología fueron tomados de la estadística descriptiva de promedio y moda.

Los resultados muestran eficiencias en remoción de DQO que varían desde un 36% hasta un 95.31%, mientras en Cromo se muestran resultados de entre 52.80% y 100% de remoción. Esto concuerda con la investigación de Kongjao, Damronglerd y Hunsom (2008) quienes obtienen la máxima remoción de Cromo Total de todas las técnicas y tecnologías de EC aplicadas a curtiembre analizadas. Las tecnologías identificadas en la investigación son dos: Tecnologías Puras de EC y Tecnologías Mixtas de EC. En promedio la remoción de DQO con cualquiera de las tecnologías de electrocoagulación es de 71.05%, mientras que la remoción de Cromo es de 91.88% mostrando mayores porcentajes de remoción siempre con el Cromo tal y como Aguilar y Palomino (2018) plantearon en su investigación, donde sin importar las variaciones en el diseño de remoción, al trabajar en conjunto una misma técnica o tecnología de EC, los resultados de porcentaje de remoción siempre son mayores para los aniones de Cromo. Por la cantidad de datos agrupados en la tecnología de EC pura y mixta no se recomienda análisis de regresión o correlación separados por grupos (Amat, 2016).

La relación existente entre la remoción de DQO y Cromo se determinó mediante la prueba de correlación de Rho de Spearman. Esta prueba estadística se utiliza para valores muestrales bajos o menores a 50 y que no intentan medir el mismo efecto (Martínez, et al, 2009). Los resultados muestran un valor de correlación igual a $R = 0.2$ a un 95% de confianza y un intervalo de confianza de $(-0.375, 0.664)$ esto significa que la relación existente es una correlación positiva media baja, donde el valor de R varía entre $+ 0.11$ a $+ 0.50$, según Mondragón (2014) esta relación existente no representa suficiente evidencia para inferir un efecto directo y en la misma magnitud al trabajar valores para la eficiencia de remoción de DQO y Cromo.

Asimismo, a partir de las pruebas de correlación de Rho de Spearman que muestran una relación positiva insuficiente entre las eficiencias de remoción de DQO y Cromo en las muestras analizadas, se trabajaron las pruebas estadísticas por grupos separados. Las regresiones lineales para los resultados del porcentaje de remoción de cromo fueron significativas para la regresión lineal de la tabla n° 05 y la regresión lineal múltiple de la tabla n° 06. En la primera se encontró un valor $p = 0.037$, esto significa que se rechaza

la hipótesis nula específica para cada prueba ($p < 0.05$), y se acepta que la relación entre el pH inicial y el porcentaje de remoción de cromo guardan una relación significativa, mientras que el signo del coeficiente se muestra en negativo (-), por tanto esta relación es inversamente proporcional, es decir mientras los valores de pH inicial aumentaron los valores de % de remoción de cromo fueron menos eficientes. Arroyo, et al (2009) explican que la formación de iones formados durante la disolución del ánodo se precipita con más rapidez y frecuencia cuando se trabaja con pH bajos, mientras que a pH altos la disociación de iones del ánodo se dificulta y disminuye la eficiencia del proceso de electrocoagulación. En cuanto a la regresión lineal múltiple de los parámetros iniciales y el porcentaje de remoción de cromo se obtuvo un valor p de 0.2, con lo cual no se puede rechazar la hipótesis nula. Estos datos así como el valor de R^2 de 0.23 pueden concluir que la regresión lineal múltiple tiene una muy mala correlación (Manuel Rojo, 2007) y no se puede explicar que las 4 variables asociadas (voltaje, amperaje, densidad de corriente y tiempo) se ajusten a demostrar una variable dependiente como el porcentaje de remoción de cromo. Sin embargo, Irene Moral (2006) señala que los valores asignados a explicar la variable dependiente que obtengan un p-valor menor a 0.05 pueden explicar de manera independiente la significancia o relación existente entre ellas y la variable dependiente. En ese sentido, el amperaje y la densidad de corriente obtuvieron valores de p iguales a 0.028 y 0.033 respectivamente, con relaciones inversa y directamente proporcional al porcentaje de remoción de cromo. Esto quiere decir que la energía administrada en forma de densidad de corriente elevado puede influir en la mejora de la remoción de cromo mediante electrocoagulación. Osorio y Juárez (2019) coinciden con estos resultados añadiendo que a mayor densidad de corriente administrada será mayor la producción de burbujas en los electrodos que atraparan las contaminantes y mejorará la eficiencia de remoción.

Por otro lado, en los resultados de las regresiones lineales donde la variable dependiente era la remoción de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) no se hallaron valores aceptables, siendo la relación entre la conductividad y el porcentaje de remoción de DQO la que obtuvo un mayor grado de relación con un p-valor de 0.22 y una R^2 igual a 0.133. Además, entre las pruebas de regresión con las variables cualitativas se halló un alto grado de relación en el uso de agitador magnético. Esta relación es inversamente proporcional al uso de agitador magnético, con un valor p de 0.055 y un coeficiente de

regresión cuadrada de 0.42 se puede inferir que el uso de agitador magnético en las pruebas de electrocoagulación no influyen positivamente en el porcentaje de remoción de DQO. Aun así, no se puede concluir la relación existente entre estas variables dado que el valor de p es mayor a 0.05 y con ello se acepta la hipótesis nula, la que nos señala que no existe una relación entre esas condiciones técnicas y la eficiencia de remoción de DQO.

Además, se utilizó la estadística descriptiva para describir la influencia de las condiciones de operación con respecto al material de electrodo, tal como se muestran en las tablas 8 y 13 los promedios de porcentaje remoción de cromo y DQO alcanzaron mayores resultados con el uso de electrodos de aluminio con un 91.3% de remoción de Cromo y 71.9% de remoción de DQO, mientras que usando electrodos de hierro los resultados fueron de 88.2% y 65.8% respectivamente. Estos resultados discrepan con los obtenidos por Bazrafshan, Mahvi, Naseri y Mesdaghinia, (2008), quienes señalan que los electrodos de hierro fueron los más efectivos para remover cromo. No obstante, esto se puede explicar dado a que las muestras utilizadas en la investigación de Bazrafshan fueron soluciones artificiales obtenidas de una muestra madre, además solo se analiza el efecto de remoción de cromo y no incluye remoción en la DQO.

De este modo, la explicación del comportamiento de los electrodos de hierro y aluminio y el porcentaje de remoción de cromo y DQO se debe a la pasificación de los electrodos durante la electrocoagulación. Ingelsson, Yasri, y Roberts (2020) describen la actividad del electrodo de Hierro cuando se usa como ánodo y como cátodo generando radicales hidroxilios que pueden estar compuestos por Fe (II), Fe (III) o una combinación de ambos, estos alcanzan los radicales de Cr (III) y son coagulados luego de la descomposición de Cr (VI). Además los radicales Fe (0) son expulsados químicamente en forma de gases al medio ambiente. Los electrodos de Fe son eficaces para remociones de Cromo especialmente de Cromo trivalente ya que es la primera reacción química luego de descomposición del ánodo. Por otro lado, Bazrafshan, Mohammadi, Ansari y Hossein (2015) explican la descomposición del electrodo de Aluminio tanto como ánodo y cátodo generando radicales libres de hidroxilio (OH^-) en la descomposición del radical de Al^{3+} como tal formando $\text{Al}(\text{OH})_3$ que reacciona formando burbujas que encapsulan contaminante orgánicos reduciendo sus cantidades.

Esto explica porque la remoción de DQO es elevada cuando se trabaja con electrodos de aluminio.

Finalmente algunas condiciones técnicas de operación como el contaminante Principal tratado, material de Reactor, uso de Agitador Magnético y tipo de Tecnología fueron encontradas mediante la aplicación de estadística descriptiva de moda, siendo el Cromo Trivalente el principal material tratado, en un reactor tipo batch de plexiglás, usando agitador magnético para la remoción de Cromo y sin su uso para la remoción de DQO, además el tipo de tecnología más usada fue la de electrocoagulación Pura con un 85.71 % de incidencia.

4. CONCLUSIÓN O CONSIDERACIONES FINALES

Se identificaron las eficiencias de las técnicas y tecnologías de electrocoagulación en la remoción de Cromo y DQO aplicadas en curtiembres, describiendo las condiciones técnicas de operación, así como las concentraciones iniciales y finales del contaminante analizado en las matrices de normalización, luego se calcularon los porcentajes de remoción. Las eficiencias transcurrieron desde el 52% de remoción al 100% de remoción de Cromo en las investigaciones de Cristancho, Pinto y Tique (2019) y la de Kongjao, Damronglerd y Hunsom (2008), respectivamente. Del mismo modo, las eficiencias de remoción de DQO variaron desde un 36% hasta un 95.31%, correspondientes a las investigaciones de Cristancho, Pinto y Tique (2019) y de Amel, Mourad y Rachida (2011), respectivamente.

Se identificó la relación entre la remoción de Cromo y DQO a través de la aplicación de tecnologías de electrocoagulación a través del estadístico de correlación de la prueba de Rho de Spearman quien demuestra una correlación positiva entre las variables, pero poco significativa con un valor de R cuadrado de 0.20. Por tanto, las condiciones técnicas de operación deben ser analizadas para describir la eficiencia de remoción de Cromo y DQO por separado.

Se determinaron cuales son las condiciones técnicas del proceso de electrocoagulación para lograr una remoción eficiente de Cromo y DQO en aguas residuales industriales de curtiembre a través de las pruebas estadística de regresión lineal y estadística descriptiva aplicadas a todas las variables de diseño del proceso de electrocoagulación demostrando que el pH inicial de la solución tratada influirá inversamente en la remoción de cromo, teniendo un valor óptimo de 4.35, por su parte, el amperaje y densidad de corriente

influyen directamente en la remoción de cromo, con valores estimados de 1.81 A y 45.3 mA/cm², respectivamente. Por otro lado, el material de electrodo usado será crucial en las condiciones técnicas del proceso de electrocoagulación, ya que dependiendo a los contaminantes que se deseen tratar se podrá elegir entre una relación de Al – Al o Fe – Fe, para mayores eficiencias de remoción de DQO y Cromo, respectivamente. Sin embargo, la opción más adecuada para aguas residuales industriales de curtiembre sin importar cual fuese el contaminante principal a tratar es el electrodo de Aluminio. De igual manera el uso de agitadores magnéticos no es tan efectivo para la remoción de DQO, y las mejoras en la eficiencia de remoción de Cromo no son tan notables, por lo que se recomienda dejar en reposo el agua tratada. Finalmente, las tecnologías de electrocoagulación pura tuvieron mayor incidencia de uso por parte de los investigadores.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguilar, F. y Palomino, A. (2018). Evaluación de un Sistema de Electrocoagulación de Flujo Continuo para la Remoción de Cromo (VI) y DQO de Curtiembre-Huachipa-2018. [Tesis titulación, Universidad César Vallejo: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/27948>
- Amar, S., Animes, G. y Subhabrata, R. (2011). Removal of Chromium and Organic Pollutants from Industrial Chrome Tanning Effluents by Electrocoagulation. *Chemical Engineering Technology*, 34 (5), 775 – 783. <https://doi.org/10.1002/ceat.201000236>
- Amat, J. (2016). Introducción a la regresión lineal múltiple. *Ciencia Datos*. https://www.cienciadedatos.net/documentos/25_regresion_lineal_multiple#:~:text=En%20el%20libro%20Hanbook%20of,n%C3%BAmero%20de%20predictores%20del%20modelo.
- Amel, B., Mourad, T. y Rachida, M. (2011). Electrocoagulation and effect of cathode materials on the removal of pollutants from tannery wastewater of Rouïba. *Desalination*, 277 (3) 128 – 134. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.014>
- Apaydin, O, Kurt, U. y Gonullu, M. (2009). An investigation on the treatment of tannery wastewater by electrocoagulation. *Global NEST Journal*, 11 (4) 546 – 555

- Apaza, H., Carrillo, E., Castilla, D. y Huaraya, F. (2020). Modelo de un sistema de tratamiento para efluentes de la industria de curtiembre. *Revista de investigaciones de la escuela de posgrado*, 9 (3), 1647 - 1658. <http://dx.doi.org/10.26788/riepg.2020.3.180>
- Arango, Á. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*, 2 (1), 49 - 56 <https://www.redalyc.org/pdf/695/69520109.pdf>
- Arroyo, M., Pérez, V., Montañés, M., García, J. y Guiñón, J. (2009). Effect of pH and chloride concentration on the removal of hexavalent chromium in a batch electrocoagulation reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 169 (3), 1127 - 1133, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.04.089>.
- Bazrafshan E., Mohammadi, L., Ansari, A. y Hossein, A. (2015). Heavy metals removal from aqueous environments by electrocoagulation process– a systematic review. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 13 (74), 1 – 16. DOI: 10.1186/s40201-015-0233-8
- Bazrafshan, E., Mahvi, A., Naseri, S. y Mesdaghinia, A. (2008). Performance evaluation of electrocoagulation process for removal of chromium (VI) from synthetic chromium solutions using iron and aluminum electrodes. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 32 (1), 59-66.
- Bolaños, R. y Calderón, M. (2014). Introducción al meta-análisis tradicional. *Revista de Gastroenterología del Perú*, 34 (1) , 45-51. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1022-51292014000100007&lng=es&tlng=es.
- Cristancho, D., Pinto, L. y Tique, J. (2019). Evaluación de la eficiencia de un sistema de electrocoagulación en los vertimientos de curtiembres en el sector de Villapinzón (Cundinamarca). *MUTIS Journal*. 9 (2) 34 – 48. <https://doi.org/10.21789/22561498.1590>
- Deghles, A. y Kurt, U. (2015) Treatment of raw tannery wastewater by electrocoagulation technique: optimization of effective parameters using Taguchi method. *Desalination and Water Treatment*, 1(1), 1 – 12. <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2015.1074622>

- Elabbas, S., Ouazzani, N., Mandi, L., Berrekhis, F. Perdicakis, M., Pontvianne, S., Pons, M., Lopicque, F. y Leclerc, J. (2015) Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: Influence of the quality of aluminium used for the electrode, *Journal of Hazardous Materials*, 15 (1), 1 – 37. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.01.043>
- Espinoza, F., Fornari, M., Módenes, A., Palácio, S., da Silva, F., Szymanski, N., Kroumov, A. y Trigueros, D. (2009). Pollutant removal from tannery effluent by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*, 151 (1), 59 – 65. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.01.043>
- GilPavas, E. Dobrosz, I. y Gómez, M. (2011). The removal of the trivalent chromium from the leather tannery wastewater: the optimisation of the electro-coagulation process parameters. *Water Science y technology*. 63 (3) 386 – 394. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.232>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI] (2019). Perú anuario de estadísticas ambientales 2019. Autoedición. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1704/libro.pdf
- Keerthi, V. y Balasubramanian, N. (2013). Electrocoagulation-integrated hybrid membrane processes for the treatment of tannery wastewater. *Environ Sci Pollut Res*, 20 (1), 7441 – 7449. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1766-y>
- Kongjao, S., Damronglerd, S. y Hunsom, M. (2008). Simultaneous removal of organic and inorganic pollutants in tannery wastewater using electrocoagulation technique. *Korean J. Chem. Eng.* 25 (4), 703 – 709. <https://doi.org/10.1007/s11814-008-0115-1>
- Larios, J., González, C. y Morales, Y. (2015). Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la USIL*, 2 (2), 9 – 25. <https://www.usil.edu.pe/sites/default/files/revista-saber-y-hacer-v2n2.2-1-19set16-aguas-residuales.pdf>
- Martínez, R., Tuya, L., Martínez, M., Pérez, A., y Cánovas, A. (2009). El coeficiente de correlacion de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8 (2), 1-14

- Mayta, R. y Mayta, J. (2017) Remoción de cromo y demanda química de oxígeno de aguas residuales de curtiembre por electrocoagulación. *Revista sociedad Química Perú*, 83(3), 331 – 340
- Mella, B., Glanert, A. y Gutterres, M. (2015). Removal of chromium from tanning wastewater and its reuse. *Process Safety and Environmental Protection*, 95 (1), 195 – 201. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2015.03.007>
- Mondragón, M. (2014). Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia. *Movimiento científico*, 8 (1), 98-104 <https://doi.org/10.33881/2011-7191.mct.08111>
- Monjarás, A.; Bazán, A.; Pacheco, Z.; Rivera, J.; Zamarripa, J. y Cuevas, C. (2019) Diseño de investigación. *Educación y Salud Boletín Científico Instituto de Ciencias de la Salud. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, 15, 119-112.
- Moral, I. (2006). Modelos de regresión: lineal simple y regresión logística. En: *Métodos Estadísticos para Enfermería Nefrológica* (pp. 195-2014). Autoedición.
- Neyra, E. y LLenque, E. (2011). Grado de contaminación por relaves mineros en la cuenca del río Moche (La Libertad). [Tesis Titulación, Universidad Nacional de Trujillo]. <http://www.dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/3334>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (2014). *Fiscalización ambiental de aguas residuales*. (1a ed.). Autoedición.
- Organización Mundial de la salud (s.f.) *Temas de salud: Agua*. <https://www.who.int/topics/water/es/>
- Osorio, G. y Juárez, C. (2019). Determinación de los parámetros electroquímicos óptimos para la remoción de Cromo (III) y DQO en aguas de curtido a través del proceso de electrocoagulación en un reactor de recirculación. [Tesis Titulación, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa] <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/9254/QUoscagv%26jucaca.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rojo, J. (2007). *Regresión lineal múltiple*. Laboratorio de estadística
- Yasri, N. y Roberts, E. (2020) Electrode passivation, faradaic efficiency, and performance enhancement strategies in electrocoagulation—a review. *Water Research*, 187 (1) 1-25 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116433>