

# Efecto del flujo de carga durante el tratamiento por electrocoagulación en aguas residuales lácteas

## Effect of charge loading during electrocoagulation in dairy wastewater

Jaime Alberto Cachay Melly<sup>1,a</sup>, Lawrence Enrique Quipuzco Ushñahua<sup>1,b</sup>

Recibido: 7/07/2022 - Aprobado: 03/10/2022 – Publicado: 31/12/2022

### RESUMEN

Con frecuencia se estudia la electrocoagulación considerando la intensidad de corriente o densidad de corriente como un parámetro determinante al buscar las condiciones óptimas de tratamiento de aguas residuales; sin embargo, estos se encuentran correlacionados al parámetro flujo de carga (*Charge loading*) que regula la dosis del metal que se disolverá. Debido a ello, el presente estudio incorpora al flujo de carga para encontrar las condiciones óptimas de tratamiento mediante electrocoagulación a los efluentes de una industria láctea, la planta piloto de leche de la Universidad Nacional Agraria La Molina, tomando como variable respuesta a la remoción de la turbidez. Se ha trabajado en batch en prototipos de 2.2 litros de capacidad efectiva. Los electrodos de aluminio y hierro, actuando como ánodo y cátodo respectivamente, fueron los mejores materiales para el tratamiento, además se alcanzó la mayor remoción de turbidez a un pH de 8 y un flujo de carga de 5.65 F/m<sup>3</sup>, logrado a 2 Amperios (2A) de corriente suministrada y 10 minutos de tratamiento. Posteriormente, la prueba bajo un flujo de carga constante (5.65 F/m<sup>3</sup>) reafirmó que a 2A y 10 minutos de tratamiento electroquímico se logra las mayores remociones de contaminantes, principalmente aceites y grasas y, turbidez.

**Palabras claves:** aguas residuales, electrocoagulación; flujo de carga; industria láctea; remoción de turbidez.

### ABSTRACT

Electrocoagulation is frequently studied considering only the current or current density as a determining parameter when looking for the optimal conditions of wastewater treatment; however, these are correlated to the charge loading parameter that regulates the dose of metal to be dissolved. Due to this, the present study incorporates the charge loading to find the optimal conditions of treatment by electrocoagulation to the effluents of a dairy industry, "La Planta Piloto de Leche" of Universidad Nacional Agraria La Molina, taking as a variable response to the removal of turbidity. Work has been done in batch on prototypes of 2.2 liters of effective capacity. The aluminum and iron electrodes, acting as anode and cathode respectively, were the best materials for the treatment, in addition, the highest turbidity removal was achieved at a pH of 8 and a charge flow of 5.65 F/m<sup>3</sup>, achieved at 2 Ampere (2A) of supplied current and 10 minutes of treatment. Subsequently, the test under a constant load flow (5.65 F/m<sup>3</sup>) reaffirmed that at 2A and 10 minutes of electrochemical treatment, the highest removals of contaminants, mainly oils and greases, and turbidity are achieved.

**Keywords:** charge loading; dairy industry; electrocoagulation; turbidity removal; wastewater.

1 Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú

a Egresado de la carrera de Ingeniería Ambiental. Autor para correspondencia: [20160122@lamolina.edu.pe](mailto:20160122@lamolina.edu.pe) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5554-0918>

b Docente del Departamento de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ciencias. E-mail: [lquipuzco@lamolina.edu.pe](mailto:lquipuzco@lamolina.edu.pe) - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7282-0409>

## I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural de suma importancia para el sustento de la vida y muy utilizado en las actividades económicas productivas. Dentro de esta gama de actividades, se encuentra la industria láctea, caracterizada por usar grandes cantidades de agua durante las líneas de producción para la elaboración de leche y derivados, adicionalmente se origina residuos constituidos compuesto por diluciones de leche cruda, agua y grasas (Chou Rodríguez et al., 2018)

En la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) se realiza diferentes actividades productivas, algunas de ellas se desarrollan en la planta piloto de leche (PPL) cuyas principales actividades corresponden a la producción de leche fresca embolsada, yogurt y queso la cual genera efluentes de características fisicoquímicas y caudales variados, con variaciones horarias y en función a los procesos diarios. Los efluentes de la industria láctea presentan un pH cercano a la neutralidad, sin embargo, puede descender drásticamente a causa de la fermentación de la lactosa produciendo ácido láctico (Sinha et al., 2019).

Como alternativa para el tratamiento del agua residual, la electrocoagulación es una potencial solución. Son consideradas como en tecnologías muy convenientes y versátiles para una amplia gama de aguas residuales con distintas características fisicoquímicas. Además, son rentables por su bajo costo de capital, bajos costos operacionales, baja energía requerida y ocupa poco espacio; estas características las hacen atractivas para su implementación (Dieudonné Bassala et al., 2017), (Reilly et al., 2019). Consiste en un proceso electroquímico inducido a partir de una diferencia de potencial entre los electrodos sumergidos en el agua a tratar lo que permite la dilución de un metal como el aluminio o hierro, generando coagulantes in-situ (Mohora et al., 2018), (Weiss et al., 2021).

Los electrocoaguladores, en su forma más simplificadas, están compuestas por una celda electroquímica (operación por batch) con uno o más electrodos dispuestos de forma vertical conectados a una fuente alimentadora de corriente eléctrica continua donde el ánodo es el electrodo activo, será consumido durante la operación, y el cátodo se encontrará de forma pasiva (Zailani & Zin, 2018). Asimismo, la configuración de los electrodos según su tipo de conexión puede ser en monopolar o bipolar, y cada uno de ellos, puede estar en conexión en serie o en paralelo (Dimogloa et al., 2019), (P. V. Nidheesh & Anantha Singh, 2017), (Kumar et al., 2018a), (Sher, Hanif, Zafar Iqbal, et al., 2020).

Dentro de las variables determinantes que propicia las condiciones adecuadas para un correcto tratamiento, se encuentra el *Charge Loading* (Dieudonné Bassala et al., 2017), de ahora en adelante *Flujo de Carga*. Este cuantifica la tasa de producción de coagulante que se producirá y disolverá en el agua a tratar, es decir, es la dosis del metal que se disolverá en un tiempo determinado (Koby et al., 2016), (Weiss et al., 2021). Esta variable está basada en la Ley de Faraday el cual relaciona la corriente aplicada junto al tiempo de reacción según la **Ecuación 1**.

$$FC = \frac{I \times t}{V \times F}$$

**Ecuación 1:** Cálculo del flujo de carga.

Donde FC es el flujo de carga ( $F/m^3$ ), I es la corriente aplicada (A), t es el tiempo de tratamiento (s), V es el volumen del agua residual tratado ( $m^3$ ) y F, es la constante de Faraday (96500 C/mol).

En varias investigaciones se emplea a la corriente o densidad de corriente como el principal referente para determinar la condición óptima de operación del electrocoagulador (Elazzouzi et al., 2017), (Rodríguez Díaz et al., 2021), (Sher et al., 2020), (Zailani & Zin, 2018). Si bien es cierto que la densidad de corriente es un parámetro importante, este se encuentra correlacionada con el flujo de carga (Kanta Ray et al., 2020), por lo que es necesario incluir esta variable para el estudio de condiciones óptimas.

El presente estudio propuesto tiene como objetivo tratar las aguas residuales de la planta piloto de leche de la UNALM mediante la electrocoagulación, teniendo en consideración al flujo de carga como un parámetro decisivo en la determinación de las condiciones óptimas de tratamiento y a la remoción de turbidez como variable respuesta, adicionalmente se tomó en consideración al pH, intensidad de corriente y tiempo de tratamiento para lograr el objetivo planteado.

## II. MÉTODOS

El tratamiento del efluente fue del tipo batch. Se construyó un reactor electroquímico con 2.2 litros de capacidad efectiva para el tratamiento del agua residual. Además, se empleó placas metálicas de aluminio y acero de calidad A36 (hierro negro) cuyas dimensiones fueron de 150mm, 80mm y 3mm de largo, ancho y espesor, respectivamente. La corriente eléctrica continua fue suministrada por la fuente de alimentación regulable modelo UNI-T UTP3315TFL-II, este dispositivo estuvo conectado a los electrodos constituido por dos placas metálicas para el ánodo y una placa para el cátodo. En la *Figura 1* se muestra la configuración de los electrodos, monopolar conectadas en paralelo a 1 cm de distancia entre placas, además de las conexiones físicas entre la fuente de alimentación y las placas a través de alambres de cobre.

### 2.1. Muestreo y caracterización del agua residual

Las muestras fueron obtenidas de la poza de vertimiento de la planta piloto de leche entre las 10:00 am y 01:30 pm los miércoles de tres semanas consecutivas. Se midieron y determinaron los parámetros de temperatura, pH, conductividad eléctrica, turbidez, sólidos sedimentables (SS), sólidos suspendidos totales (SST), aceites y grasas (AyG), demanda química de oxígeno (DQO) y demanda biológica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>).

La DQO, DBO<sub>5</sub>, AyG, y SST fueron determinados por el Laboratorio SGS Perú, el resto, en el laboratorio de

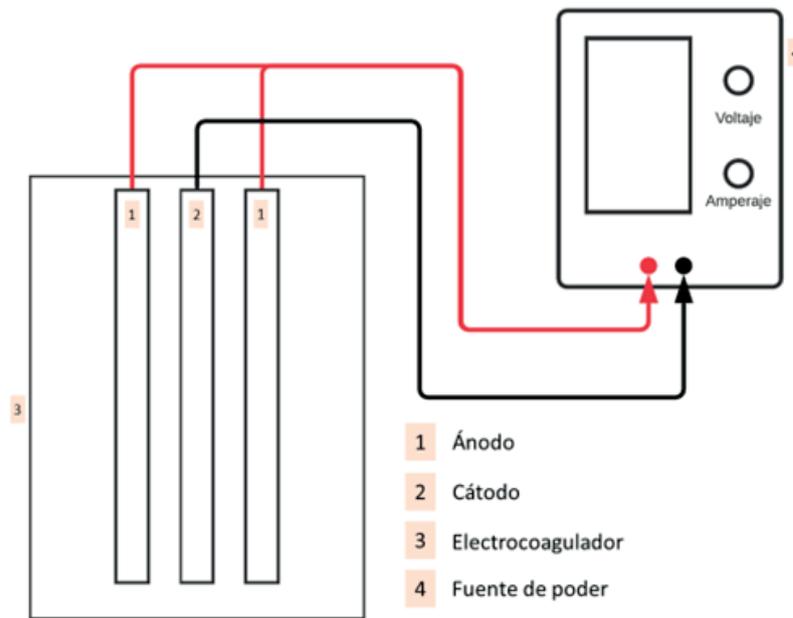


Figura 1. Esquema del tratamiento y conexiones

Ingeniería Ambiental de la UNALM (LIAM). Se consideró la remoción de turbidez como referente para la selección de las condiciones óptimas de tratamiento.

### 2.2. Selección del juego de electrodos

Se consideró 4 combinaciones distintas con los materiales de aluminio (Al) y hierro (Fe) los cuales tendrán la función de ánodo y cátodo según sea el caso. Las configuraciones ánodo-cátodo fueron: Al-Fe, Al-Al, Fe-Al y, Fe-Fe.

### 2.3. Determinación de las condiciones óptimas de tratamiento

Se realizó un diseño factorial entre los factores de pH (5.5, 7 y 8) y corriente eléctrica suministrada (0, 1, 2, 3 y 4 Amperios). Se fijó el tiempo de reacción a 10 minutos, el ajuste del pH se realizó con hidróxido de sodio (NaOH) y ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ).

Conociendo los niveles óptimos de los factores, se calculó el flujo de carga óptimo mediante la **Ecuación 1**. Posteriormente, se procedió a determinar el tiempo óptimo de tratamiento, considerando los niveles 5, 10, 20 y 30 minutos y manteniendo fijo el pH y flujo de carga óptimo.

### 2.4. Análisis de datos

Para la determinación del juego de electrodos y el tiempo óptimo de tratamiento, se realizó un Análisis de Varianza de un factor (One-Way ANOVA), mientras que, para la determinación de pH y corriente óptima, se utilizó el ANOVA multifactorial (2 factores) junto a la prueba de Tukey, teniendo en consideración a la remoción de turbidez (%) como variable respuesta a un nivel de significancia del 5%. El software Minitab 19 fue empleado para efectuar dicho análisis estadístico.

## III. RESULTADOS

### 3.1. Caracterización del efluente

La planta piloto de leche, en promedio, emplea unos  $50\text{ m}^3$  de agua durante sus procesos productivos. Dependiendo de la inclusión o no de la elaboración de queso, los constituyentes del efluente pueden variar considerablemente. Las aguas residuales de la industria láctea están caracterizadas por la alta presencia de materia orgánica de los cuales destacan la lactosa, minerales, ácidos grasos y proteínas (Ahmad et al., 2019), (Qarani Aziz & Mohammed Ali, 2017), este alto contenido se pone en evidencia en la elevada DQO y  $DBO_5$ , de una relación  $DBO_5/DQO$  mayores o iguales a 0.4, que indican la biodegradabilidad del efluente (Dae-Hee Ahna et al., 1999). En la Tabla 1 se presenta la variabilidad en la calidad de las aguas residuales de la PPL durante las 3 semanas de toma de muestras.

### 3.2. Selección de electrodos

En la Tabla 2 se presentan los resultados del análisis estadístico realizado para seleccionar aquel par de electrodos con mayor remoción de turbidez, adicionalmente en la Figura 2 se ilustra las remociones alcanzadas durante los ensayos. El análisis estadístico muestra que los tratamientos tuvieron un efecto significativo en la remoción de turbidez y que existe diferencias entre las medias (ANOVA,  $p = 0.000$ ). El juego Al-Fe, donde el aluminio actúa como ánodo, logró la mayor remoción de turbidez del agua residual. Seguidamente del juego Al-Al y finalmente Fe-Al y Fe-Fe, estos no tuvieron una diferencia significativa. Pese a esta jerarquía en los resultados, en todos los casos se logró una remoción mayor al 90%.

En la Figura 3 se presenta el pH inicial y final según el tipo de electrodos empleados. Asimismo, se ha observado

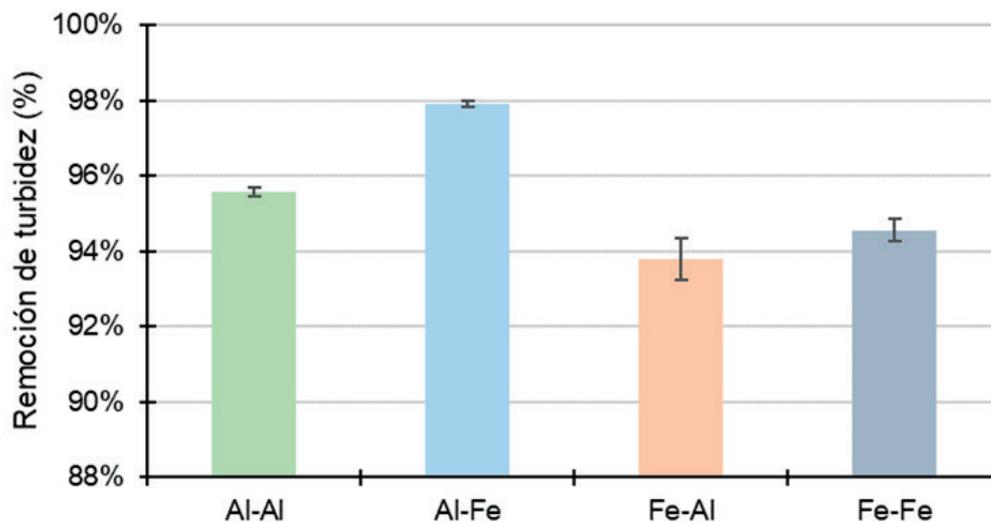
**Tabla 1.** Características fisicoquímicas de los efluentes de la PPL

Parámetro	Unidad	Semana 01	Semana 02	Semana 03
Temperatura <sup>(1)</sup>	°C	25	25	26
pH <sup>(1)</sup>	-	6.89	7.36	7.01
CE <sup>(1)</sup>	mS/cm	3.48	7.49	3.47
Sólidos Sedimentables <sup>(1)</sup>	mL/L/h	0.2	1.1	0.5
SST <sup>(2)</sup>	mg/L	560	620	790
DQO <sup>(2)</sup>	mg/L	6378.8	6688.7	8308.2
DBO <sub>5</sub> <sup>(2)</sup>	mg/L	2532.5	2737.5	3346.7
DBO <sub>5</sub> /DQO	-	0.397	0.409	0.403
A & G <sup>(2)</sup>	mg/L	78.3	154.6	135

Nota: <sup>(1)</sup> Parámetros determinados en el LIAM. <sup>(2)</sup> Parámetros determinados por SGS Perú (2021).

**Tabla 2.** Análisis estadístico para la selección de electrodos

ANOVA	
Valor F	p-valor
92.81	0.000
Tukey	
Comparación	p-valor
Al-Fe / Al-Al	0.000
Fe-Al / Al-Al	0.001
Fe-Fe / Al-Al	0.020
Fe-Al / Al-Fe	0.000
Fe-Fe / Al-Fe	0.000
Fe-Fe / Fe-Al	0.072



**Figura 2.** Remoción de turbidez por juego de electrodos.

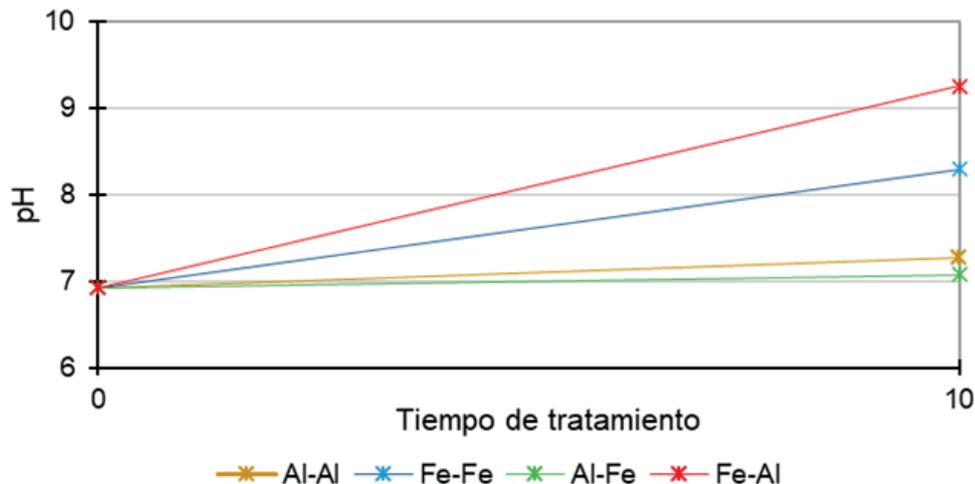


Figura 3. Comportamiento del pH en el inicio y final de los tratamientos.

que el pH al final de cada tratamiento presentó una tendencia creciente partiendo desde los 6.9 hasta valores de 9.3, esto evidencia efectos buffer de la electrocoagulación (Dieudonné Bassala et al., 2017). El juego de electrodos más eficiente para este estudio logró alcanzar un pH final de aproximadamente 7.

### 3.3. Tratamiento del agua residual

Seleccionado el par ideal para el tratamiento de este tipo de efluentes, se procedió con las pruebas factoriales. En la Figura 4 se presenta el diseño factorial cuyos factores son el pH y corriente eléctrica suministrada en la electrocoagulación. Gráficamente, se observa en la Figura 4 que a pH = 8 se logró la mayor remoción de turbidez, particularmente, el tratamiento a 2 Amperios logró, en promedio, un 90.41% además la prueba de Tukey demuestra estadísticamente que a un pH de 8 y corriente de 2A, se logra la mayor remoción de turbidez. Ante estas consideraciones y según la **Ecuación 1**, el flujo de carga óptimo es de 5.65 F/m<sup>3</sup>.

En la Figura 5 se ilustra el comportamiento en la remoción de algunos contaminantes bajo un flujo de carga constante, es decir, que la corriente suministrada y el tiempo de tratamiento tienen una relación inversamente proporcional (**Ecuación 1**). Adicionalmente, los parámetros de turbidez, AyG, DQO y DBO<sub>5</sub> presentan una tendencia decreciente en su remoción conforme se incrementa el tiempo de tratamiento (y reducción simultánea de la corriente eléctrica).

La remoción de turbidez logra un pico máximo a un tiempo de tratamiento de 10 minutos y va decayendo paulatinamente similar al comportamiento en la remoción de AyG. Las remociones de DQO y DBO<sub>5</sub> fueron muy bajas, llegando a ser ligeramente negativas, es decir, que los tratamientos aportaban DQO y DBO<sub>5</sub> (-2.91% y -1.99%, respectivamente).

## IV. DISCUSIÓN

### 4.1. Caracterización del efluente

El cociente DBO<sub>5</sub>/DQO, presentado en la Tabla 1, muestra un valor promedio de 0.403 siendo menor a lo encontrado en la literatura (Akansha et al., 2020), (León-Chimbolema et al., 2020). Esto puede explicarse porque durante el periodo de muestreo, el agua residual provino de lavados, reduciendo de esta manera la cantidad de materia orgánica dispuesta en el agua residual. Adicionalmente, la PPL elaboró leche en bolsa y yogurt en la primera semana, a diferencia en la segunda y tercera, donde también se elaboró queso, incorporando lactosuero en los efluentes. Durante las semanas de producción de quesos, el pH presentó valores ligeramente más alcalinos y el parámetro AyG se vieron aumentadas a aproximadamente el doble.

### 4.2. Selección de electrodos

En la Figura 6 se visibiliza la coloración del efluente tratado inmediatamente después del tratamiento (lado izquierdo) y después de dejarlo reposar en la intemperie (lado derecho). Los tratamientos que emplearon al hierro como ánodo, obtuvieron los menores porcentajes de remoción, además presentaron una coloración oscura-verdosa causado por la presencia de especies del ion ferroso (Huda et al., 2017), (Nasrullah et al., 2014). Según Lakshmanan et al. (2019), esta forma de hierro se presenta en las etapas iniciales del tratamiento y al ser más soluble que el ion férrico (ion que da coloración amarillenta al agua residual y responsable de la generación de los hidróxidos de hierro III), causa una ralentización en la coagulación (Nidheesh & Anantha Singh, 2017), por lo tanto, se alcanzaría una menor remoción de contaminantes. Este inconveniente podría ser mejorado al incrementar la cantidad de oxígeno disuelto (Kumar et al., 2018b) mediante procesos de, por ejemplo, aeración del agua residual (Akansha et al., 2020).

Adicionalmente, los tratamientos con ánodos de hierro presentaron un aumento del pH final. Según Lakshmanan et al. (2019), durante el proceso de electrocoagulación se

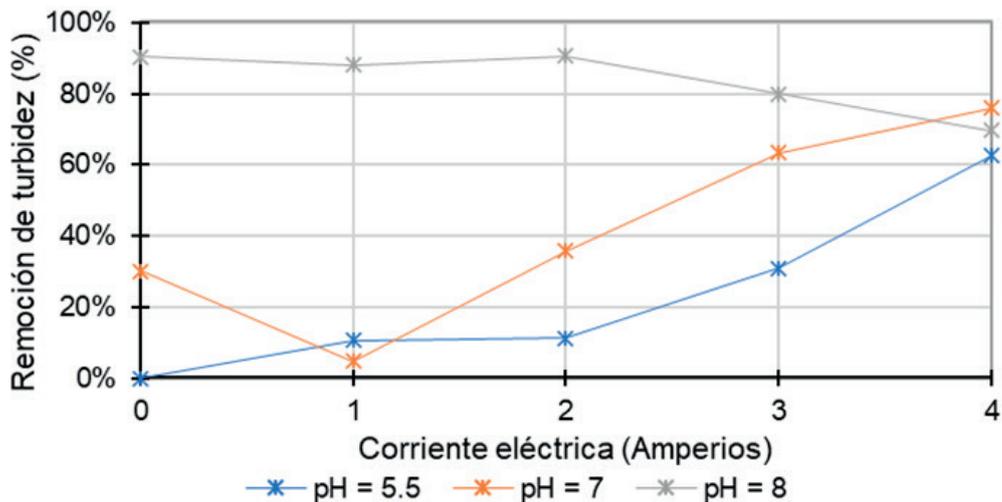


Figura 4. Experimento factorial - condiciones óptimas.

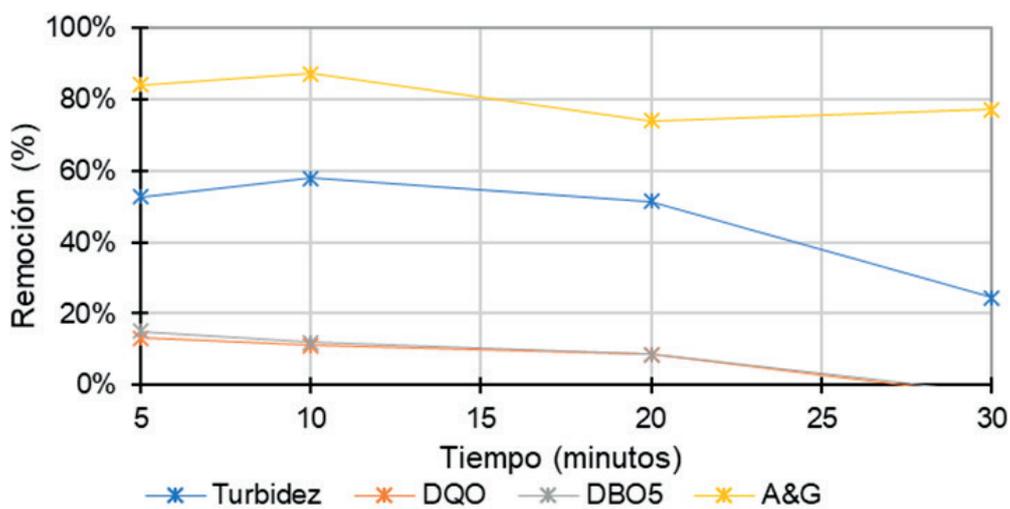


Figura 5. Tiempo de tratamiento óptimo.

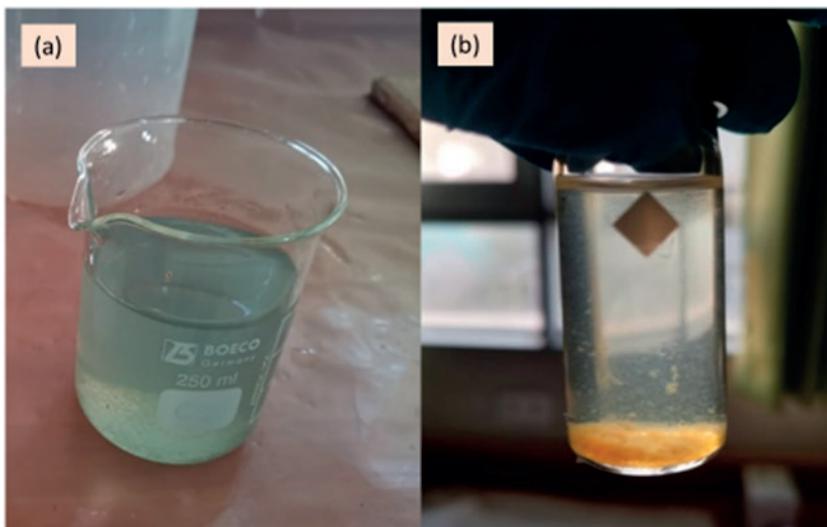


Figura 6. Coloración del efluente tratado.

Nota: (a) coloración al finalizar el tratamiento. (b) coloración al reposar el efluente tratado.

da lugar la oxidación del hierro a ion ferroso en el ánodo, simultáneamente, en el cátodo ocurre la reducción del agua generando hidrógeno gaseoso y los iones hidroxilos ( $\text{OH}^-$ ) en medios neutros o alcalinos (Huda et al., 2017). Entonces, al cesar la oxidación electrolítica del hierro, el  $\text{Fe}^{+2}$  se oxida gracias al oxígeno disuelto y consume el  $\text{OH}^-$ , decayendo el pH postratamiento.

#### 4.2. Tratamiento del agua residual

En la Figura 4 se muestra el efecto del pH y la corriente eléctrica en la remoción de la turbidez del agua residual. Estas variables son importantes para alcanzar una buena efectividad en la electrocoagulación, asimismo, se encuentran estrechamente relacionados a la cantidad de metal disuelto y las especies catiónicas metálicas dependientes del pH (Sher et al., 2020).

Mantener constante el flujo de carga permite conocer más a detalle la influencia de la corriente eléctrica ya que ambas están correlacionadas (Kanta Ray et al., 2020). El parámetro AyG ha presentado altos valores de remoción porque las burbujas de hidrógeno y oxígeno formadas durante el proceso electroquímico se adhieren a las diminutas gotas de aceites haciéndolas flotar (Manilal et al., 2020), (Mirshafiee et al., 2018). Por otro lado, la DQO y  $\text{DBO}_5$  presentaron muy bajas remociones con una tendencia de disminuir conforme aumenta el tiempo de retención, esto lo explica (Moreno-Casillas et al., 2007), quienes sugieren que este comportamiento se debe a la predominancia de compuestos solubles que no pueden ser removidos por electrocoagulación.

## V. CONCLUSIONES

Se puso en marcha un reactor para la electrocoagulación que permitió lograr un mejoramiento en las condiciones finales del efluente. La combinación de electrodos, el juego aluminio-hierro como ánodo y cátodo respectivamente, permitió lograr las mayores remociones de turbidez del agua residual logrando en promedio un 97.9%. Seguidamente, la corriente de 2 Amperios y un tiempo de retención de 10 minutos logró la mayor remoción, a partir de este valor, se concluyó que las condiciones óptimas de tratamiento son a pH de 8 y flujo de carga es de 5.65 F/ $\text{m}^3$ . Posteriormente, se reafirmó que, a dichas condiciones, a 2A y 10 minutos de tratamiento, se logra alcanzar la mayor remoción de turbidez, además de una alta remoción de aceites y grasas. Considerar constante al flujo de carga permitió estudiar adecuadamente la relación de la corriente eléctrica y el tiempo de retención en el tratamiento de las aguas residuales de la Planta Piloto de leche, sin embargo, dada las fluctuaciones horarias y, por ende, de composición de los efluentes de esta industria, es dificultoso tener un total control sobre las características iniciales del efluente a tratar, por lo que el resultado del tratamiento puede ser algo diferente a lo esperado. Es importante complementar este estudio bajo condiciones más controladas, como el empleo de aguas residuales sintéticas que simulen a los efluentes estudiados.

## VI. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue financiado en marco del “Concurso de Trabajos de Investigación para Bachillerato - UNALM 2020”. Un agradecimiento especial al Departamento de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ciencias de la UNALM por poner a disposición al Laboratorio de Ingeniería Ambiental. A la Planta Piloto de Leche, quienes concedieron el permiso para la obtención de muestras mostrándose a favor de la investigación para la búsqueda de soluciones a los problemas ambientales.

## VII. REFERENCIAS

- Ahmad, T., Aadil, R. M., Ahmed, H., Rahman, U. ur, Soares, B. C. V., Souza, S. L. Q., Pimentel, T. C., Scudino, H., Guimarães, J. T., Esmerino, E. A., Freitas, M. Q., Almada, R. B., Vendramel, S. M. R., Silva, M. C., & Cruz, A. G. (2019). Treatment and utilization of dairy industrial waste: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 361–372. <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2019.04.003>
- Akansha, J., Nidheesha, P. V., Gopinath, A., Anupama, K. V., & Suresh Kumara, M. (2020). Treatment of dairy industry wastewater by combined aerated electrocoagulation and phytoremediation process. *Chemosphere*, 253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126652>
- Chou Rodríguez, E. M., García Martínez, Y., Bermúdez Chou, A. de la C., & Pisch Vidal, L. (2018). Evaluación de producción más limpia en el proceso de leche y derivados de la soya Evaluation of cleaner production in the process of milk and soybean derivatives. *Tecnología Química*, 38(2), 428–436. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v38n2/rtq19218.pdf>
- Dae-Hee Ahna, Won-Seok Changab, & Tai-IIYoonb. (1999). Dyestuff wastewater treatment using chemical oxidation, physical adsorption and fixed bed biofilm process. *Process Biochemistry*, 34(5), 429–439. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032959298001113?via%3Dihub>
- Dieudonné Bassala, H., Kenne Dedzo, G., Njine Bememba, C. B., Tchekwagep Seumo, P. M., Donkeng Dazie, J., Nansou-Njiki, C. P., & Ngameni, E. (2017). Investigation of the efficiency of a designed electrocoagulation reactor: Application for dairy effluent treatment. *Process Safety and Environmental Protection*, 111, 122–127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.002>
- Dimogloa, A., Sevim-Elibola, P., DinçbK.Gökmena, Ö., & Erdoğan, H. (2019). Electrocoagulation/electroflotation as a combined process for the laundry wastewater purification and reuse. *Journal of Water Process Engineering*, 31. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100877>
- Elazzouzi, M., Haboubi, Kh., & Elyoubi, M. S. (2017). Electrocoagulation flocculation as a low-cost process for pollutants removal from urban wastewater. *Chemical Engineering Research and Design*, 117, 614–626. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.11.011>
- Huda, N., Raman, A. A. A., Bello, M. M., & Ramesh, S. (2017). Electrocoagulation treatment of raw landfill leachate using iron-based electrodes: Effects of process parameters and optimization. *Journal of Environmental Management*,

- 204(1,15), 75–81. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.028>
- Kanta Ray, S., Majumdera, C., & Sahab, P. (2020). The effect of current density and charge loading for total organic carbon (TOC) removal by electrocoagulation. *J. Indian Chem. Soc.*, 97(12b), 2713–2719. <http://indianchemicalsociety.com/portal/uploads/journal/B-Dec-1.pdf>
- Koby, M., Demirbas, E., & Ulu, F. (2016). Evaluation of operating parameters with respect to charge loading on the removal efficiency of arsenic from potable water by electrocoagulation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(2), 1484–1494. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.02.016>
- Kumar, A., Nidheesh, P. V., & Suresh Kumar, M. (2018a). Composite wastewater treatment by aerated electrocoagulation and modified peroxi-coagulation processes. *Chemosphere*, 205, 587–593. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.141>
- Kumar, A., Nidheesh, P. V., & Suresh Kumar, M. (2018b). Composite wastewater treatment by aerated electrocoagulation and modified peroxi-coagulation processes. *Chemosphere*, 205, 587–593. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.141>
- Lakshmanan, D., Clifford, D. A., & Samanta, G. (2019). Ferrous and Ferric Ion Generation During Iron Electrocoagulation. *Environmental Science & Technology*, 43(10), 3853–3859. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/es8036669>
- León-Chimbolema, J. I. G., Medina-Serrano, C. I. A., & Segovia-Obando III, E. N. (2020). Aplicación del método Foto-fenton para el tratamiento de aguas residuales en la industria láctea. *Dominio de Las Ciencias*, 6(3), 785–801. <https://doi.org/10.23857/DC.V6I3.1316>
- Manilal, A. M., Soloman, P. A., & Ahmed Basha, C. (2020). Removal of Oil and Grease from Produced Water Using Electrocoagulation. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 24(1). <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HZ.2153-5515.0000463>
- Mirshafiee, A., Rezaee, A., & Sarraf Mamoozy, R. (2018). A clean production process for edible oil removal from wastewater using an electroflotation with horizontal arrangement of mesh electrodes. *Journal of Cleaner Production*, 198(10), 71–79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.201>
- Mohora, E., Rončević, S., Agbaba, J., Zrnić, K., Tubić, A., & Dalmacija, B. (2018). Arsenic removal from groundwater by horizontal-flow continuous electrocoagulation (EC) as a standalone process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(1), 512–519. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.042>
- Moreno-Casillas, H. A., Cocke, D. L., Gomesa, J. A. G., Morkovsky, P., Parga, J. R., & Peterson, E. (2007). Electrocoagulation mechanism for COD removal. *Separation and Purification Technology*, 56(2,15), 204–211. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2007.01.031>
- Nasrullah, M., Siddique, M. N. I., & Zularisam, A. W. (2014). Effect of High Current Density in Electrocoagulation Process for Sewage Treatment. *Asian Journal of Chemistry*, 26(14), 4281–4285. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14233/ajchem.2014.16134>
- Nidheesh, P. V., & Anantha Singh, T. S. (2017). Arsenic removal by electrocoagulation process: Recent trends and removal mechanism. *Chemosphere*, 181, 418–432. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.082>
- Qarani Aziz, S., & Mohammed Ali, S. (2017). Characterization of municipal and dairy wastewaters with 30 quality parameters and potential wastewater treatment by biological trickling filters. *International Journal of Green Energy*, 14(13). <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15435075.2017.1370594>
- Reilly, M., Cooley, A. P., Tito, D., Tassou, S. A., & Theodorou, M. K. (2019). Electrocoagulation treatment of dairy processing and slaughterhouse wastewaters. *Energy Procedia*, 161, 343–351. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2019.02.106>
- Rodríguez Díaz, Y. J., Fuentes Guevara, M. D., Beleño Díaz, Ó. D., & Montoya Armenta, L. H. (2021). Electrocoagulación como proceso de tratabilidad de aguas residuales de una planta de lácteos y cárnicos. *Tecnura*, 25(67), 26–39. <https://doi.org/10.14483/22487638.15769>
- Sher, F., Hanif, K., Zafar Iqbal, S., & Imran, M. (2020). Implications of advanced wastewater treatment: Electrocoagulation and electroflocculation of effluent discharged from a wastewater treatment plant. *Journal of Water Process Engineering*, 33. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101101>
- Sinha, S., Srivastava, A., Mehrotra, T., & Singh, R. (2019). A Review on the Dairy Industry Waste Water Characteristics, Its Impact on Environment and Treatment Possibilities. *Emerging Issues in Ecology and Environmental Science. SpringerBriefs in Environmental Science. Springer, Cham.*, 73–84. [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-99398-0\\_6](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-99398-0_6)
- Weiss, S. F., Christensen, M. L., & Jørgensen, M. K. (2021). Mechanisms behind pH changes during electrocoagulation. *AIChE Journal*, 67(11). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/aic.17384>
- Zailani, L. W. M., & Zin, N. S. M. (2018). Application of Electrocoagulation In Various Wastewater And Leachate Treatment-A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 140, 012052. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/140/1/012052>

#### Contribución de autoría

Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Software, Redacción - borrador original: Jaime Alberto Cachay Melly.

Adquisición de fondos, Recursos, Supervisión, Validación, Visualización, Redacción-revisión y edición: Lawrence Enrique Quipezco Ushñahua.