

Depuración sostenible de efluentes de la industria láctea mediante electrocoagulación

Sustainable Treatment of Dairy Industry Effluents by Electrocoagulation

Wilber Quispe¹  y Patricia Quispe^{1*} 

1 Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima, Perú.



Citar como: Quispe, W. y Quispe, P. (2025). «Depuración sostenible de efluentes de la industria láctea mediante electrocoagulación». *South Sustainability*, 6(2), e132.
DOI: 10.21142/SS-0602-2025-e132

Artículo recibido: 15/7/2025
Arbitrado por pares
Artículo aceptado: 19/9/2025



© Los autores, 2025. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

*E-mail de correspondencia:
pquispe@unfv.edu.pe

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue determinar los parámetros óptimos para la distribución de electrodos, la corriente eléctrica y el tiempo de tratamiento, con el fin de lograr una depuración eficiente de los efluentes lácteos mediante el proceso de electrocoagulación. Empleando el diseño experimental Taguchi L_9 (3^3), que considera tres factores a tres niveles, la investigación se enfocó en la depuración eficiente de los efluentes lácteos mediante electrocoagulación, al identificar los parámetros clave que mejoran la reducción de contaminantes. Los resultados indican que las condiciones ideales para la electrocoagulación incluyen una corriente de cuatro amperios, un tiempo de tratamiento de 10 a 20 minutos, y configuraciones de electrodos de Al:Fe o Al:Al. Estas condiciones permiten maximizar la eficiencia en la reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO) y los sólidos suspendidos totales (SST). En conclusión, los hallazgos sugieren que centrar la atención en estos parámetros es crucial para la optimización de la depuración de efluentes lácteos, lo que contribuye a prácticas más sostenibles dentro de la industria.

Palabras clave: electrocoagulación, industria láctea, DQO, DBO_5 , SST

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the optimal parameters for electrode distribution, electric current and treatment time, in order to achieve the efficient treatment of dairy effluents using the electrocoagulation process. Using the Taguchi L_9 (3^3) experimental design, which considers three factors at three different levels, the study focused on the efficient purification of dairy effluents by electrocoagulation, identifying the key parameters that improve the reduction of pollutants. The results indicate that the ideal conditions for electrocoagulation include a current of four amps, a treatment time of 10 to 20 minutes, and Al:Fe or Al:Al electrode configurations. These conditions were found to maximize efficiency in reducing biological oxygen demand (BOD_5), chemical oxygen demand (COD), and total suspended solids (TSS). In conclusion, the findings of the study suggest that focusing on these parameters is crucial for the optimization of dairy effluent treatment, thereby contributing to more sustainable practices within the industry.

Keywords: Electrocoagulation, dairy industry, COD, BOD_5 , TSS



Introducción

La industria láctea constituye un sector fundamental en la economía mundial, ya que genera productos esenciales para la alimentación humana. Sin embargo, su expansión ha intensificado los desafíos ambientales relacionados con el manejo de sus vertimientos líquidos industriales. Estos vertimientos se caracterizan por elevadas concentraciones de materia orgánica, nutrientes, grasas y sólidos suspendidos, que representan una seria amenaza para los ecosistemas acuáticos cuando no reciben tratamiento adecuado (Niño *et al.*, 2013). Los métodos tradicionales de depuración de aguas residuales lácteas, incluyendo procesos biológicos y fisicoquímicos convencionales, frecuentemente presentan limitaciones en términos de eficiencia, costos operativos y generación de subproductos. Estas limitaciones han motivado la búsqueda de tecnologías alternativas más efectivas y ambientalmente sostenibles para el sector.

En este contexto, la electrocoagulación emerge como una tecnología prometedora que emplea corriente eléctrica para generar coagulantes *in situ*, ya que promueve la desestabilización y agregación de contaminantes presentes en las aguas residuales. Las investigaciones en tratamiento de efluentes lácteos han evolucionado progresivamente desde métodos convencionales hacia tecnologías más avanzadas. Bedoya y Sanches (2009) estudiaron la eliminación de carga orgánica del suero de queso mediante reactores anaerobios de lecho de lodo, utilizando tiempos de retención hidráulica de 1,3 días y tasas de carga orgánica variables entre 1,7 a 18,5 gramos de DQO por litro y día, hasta alcanzar eficiencias máximas de remoción del 98 % para DQO y 97,2 % para sólidos volátiles totales con cargas orgánicas óptimas de 9,6 g DQO/L.d, aunque la eficiencia descendió significativamente al 77 % cuando el aporte orgánico se elevó a 18,6 g DQO/L.d.

La aplicación específica de electrocoagulación en efluentes lácteos ha demostrado resultados prometedores. López y Harnisth (2016) desarrollaron un electrocoagulador a escala piloto utilizando componentes económicamente accesibles, e identificaron el tiempo, tensión y número de placas como factores influyentes significativos en el proceso. Sus experimentos revelaron que el tiempo de reacción y voltaje presentaron mayor impacto en la eficiencia, al reducir la turbidez de 770 NTU a 19,9 NTU y alcanzar tasas de eliminación del 93 % para DQO, 82 % para DBO₅ y 76 % para la remoción de sólidos suspendidos.

García *et al.* (2012) realizaron una revisión comprehensiva sobre la aplicabilidad de la electrocoagulación para la eliminación de contaminantes en soluciones acuosas, y se enfocaron especialmente en el potencial para reducir las elevadas cargas orgánicas del lactosuero derivado de la industria láctea. Su trabajo destacó que la electrocoagulación se transforma en un proceso electroquímico con potencial para proporcionar

resultados satisfactorios mediante la optimización de sus componentes. Asimismo, contribuyó al objetivo de proteger, mantener y recuperar el suministro de agua, particularmente cuando el lactosuero se convierte en residuo acuoso vertido en canales de aguas residuales, lo que agrava el daño medioambiental por el incremento de la DQO.

Los aspectos técnicos del diseño de sistemas de electrocoagulación han sido estudiados. Arango y Garcés (2007) determinaron que el sistema de electrocoagulación influye considerablemente en la eficacia de eliminación de contaminantes, ya que identifica como aspectos cruciales del diseño: la célula, los electrodos, los materiales utilizados, la geometría y la colocación de los electrodos. Su investigación, basada en la caracterización fisicoquímica del efluente de una empresa láctea, permitió caracterizar la geometría de la célula, electrodos, materiales y tipo de conexión, además de determinar las propiedades eléctricas de la fuente de tensión.

Las aplicaciones prácticas recientes han validado la viabilidad industrial del proceso. Tenelema (2019) realizó una investigación sobre aguas residuales de la empresa lechera Familac del cantón de Chambo, que se vertían directamente al alcantarillado sin pretratamiento, y la construcción de un electrocoagulador para tratar estos efluentes. Mediante caracterización fisicoquímica del efluente, identificó parámetros que infringían las normas, incluyendo aceites y grasas, DBO₅, DQO, SST, ST y S. Los factores estudiados fueron distribución de electrodos, intensidad de corriente y periodo de tratamiento. Se determinó que el tratamiento más exitoso empleó 15 minutos de duración con dispersión de electrodos Al-Al e intensidad de corriente de tres amperios, y logró remociones efectivas del 95,5 % para aceites y grasas, 84,5 % para DBO₅, 83,1 % para DQO, 96,7 % para SST, 61,4 % para ST y 92,2 % para otros parámetros.

A pesar de estos avances significativos, persisten vacíos en el conocimiento sobre la optimización integral de variables operacionales mediante diseños experimentales sistemáticos y la evaluación comprehensiva de la sostenibilidad del proceso para diferentes tipos de efluentes lácteos. La determinación de condiciones óptimas que maximicen la eficiencia de remoción mientras minimiza el consumo energético y la generación de lodos representa un desafío técnico relevante que requiere investigación adicional. Fúquene y Yate (2018) señalaron que, aunque hay avances significativos en la aplicación de electrocoagulación a diversos efluentes industriales, aún persisten obstáculos particulares como la evaluación de viabilidad económica y medioambiental a largo plazo, la optimización de parámetros de funcionamiento, la reducción de formación de lodos y la mejora de la eficacia del proceso.

El objetivo general de esta investigación fue determinar los parámetros óptimos de operación, incluyendo

distribución de electrodos de la placa, corriente eléctrica y tiempo de tratamiento, mediante el diseño experimental Taguchi L_9 (3^3), para lograr una depuración eficiente de efluentes lácteos por electrocoagulación. Los objetivos específicos se enfocaron en determinar las condiciones óptimas de distribución de electrodos, corriente eléctrica y tiempo de tratamiento para maximizar la remoción individual de: (1) grasas y aceites, (2) DBO₅, (3) DQO y (4) SST en efluentes lácteos. Los resultados demostraron que las condiciones ideales incluyen una corriente de cuatro amperios, tiempo de tratamiento entre 10-20 minutos y configuraciones de electrodos Al-Fe o Al-Al, lo que permite maximizar la remoción de todos los parámetros evaluados. De este modo, se contribuye al desarrollo de alternativas tecnológicas sostenibles para el tratamiento de aguas residuales en el sector lácteo.

Materiales y métodos

El estudio experimental se desarrolló en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Industrial y de Sistemas de la Universidad Nacional Federico Villarreal. Se implementó un diseño experimental factorial ortogonal Taguchi L_9 (3^3) para evaluar sistemáticamente tres factores operacionales a tres niveles cada uno, siguiendo la metodología establecida por Villegas (2013). Los factores evaluados fueron: corriente eléctrica (2, 3, 4 amperios), tiempo de tratamiento (10, 15, 20 minutos) y configuración de electrodos (Fe-Fe, Al-Al, Al-Fe).

Las muestras de efluentes lácteos se obtuvieron de la planta procesadora Vida Sana, localizada en el distrito y provincia de Andahuaylas. Esta instalación industrial se especializa en la elaboración de productos lácteos diversos, incluyendo leche, quesos, yogures y mantequilla. Se recolectaron 5 litros de efluente durante las operaciones de lavado de tanques de almacenamiento, pasteurizadores y esterilizadores de leche, con el uso de recipientes de plástico de 10 litros de capacidad y siguiendo el protocolo descrito por Ballester *et al.* (1999). El muestreo se realizó durante una semana de operación, para asegurar la representatividad de las muestras.

Establecida la base experimental, la unidad de análisis se centró en los efluentes lácteos sometidos al proceso de electrocoagulación, y se evaluaron específicamente los impactos y la eficacia de esta técnica en la reducción de contaminantes y mejora de la calidad del agua residual. En este contexto, las variables de respuesta incluyeron la concentración inicial de contaminantes en el efluente, los cambios en la composición química y física del agua posteriores al proceso de electrocoagulación, así como la eficiencia de remoción de contaminantes específicos, aspectos fundamentales para determinar la viabilidad y sostenibilidad del método propuesto.

La caracterización fisicoquímica de las muestras requirió la implementación de diversas metodologías analíticas, que combinaron procedimientos *in situ* y de

laboratorio, según las características específicas de cada parámetro. Esta aproximación metodológica dual se justificó por la naturaleza variable de ciertos parámetros, particularmente la temperatura y el caudal, cuya inestabilidad inherente demandó mediciones directas en el sitio de muestreo.

Respecto al comportamiento térmico del sistema, durante el proceso de electrocoagulación se observó un incremento gradual de la temperatura debido a la resistencia eléctrica de los electrodos metálicos, fenómeno que transforma la energía eléctrica en calor y constituye una característica operacional importante del proceso. Paralelamente, las mediciones de caudal se realizaron mediante el enfoque volumétrico directo, que registró el volumen de efluente recolectado en recipientes calibrados durante periodos específicos de tiempo, metodología que proporcionó datos precisos para la caracterización del flujo de proceso.

La integración de estas metodologías permitió obtener un conjunto completo de datos experimentales que, posteriormente, fueron procesados mediante análisis estadístico avanzado para determinar las condiciones óptimas de operación del sistema de electrocoagulación propuesto.

Para la caracterización fisicoquímica de las muestras de efluentes lácteos se emplearon métodos analíticos estandarizados, siguiendo protocolos establecidos internacionalmente. Los parámetros evaluados y las metodologías específicas utilizadas se detallan en la Tabla 1, la cual presenta una descripción comprehensiva de los métodos analíticos implementados para cada variable de interés en el estudio.

Tabla 1. Métodos en el análisis de las aguas residuales

Parámetro	Unidad	Método
DBO	mg/l	8043, Método de dilución
DQO	mg/l	8000, Método de digestión de reactor
Potencial de hidrogeno	-	SM 4500 H+ B
Solidos suspendidos totales	mg/l	SM 2540 B
Solidos totales	mg/l	SM 2540 B
Sulfuros	mg/l	SM 4500-PD
Temperatura	°C	SM 2550 B
Turbidez	NTU	SM 2130 B
Conductividad	µs/cm	SM 2510 B
Solidos disueltos totales	mg/l	gravimétrico S.M. 2540 C

Nota. DBO = demanda biológica de oxígeno; DQO = demanda química de oxígeno; SM = métodos estándar; NTU = unidades nefelométricas de turbidez. Las instrucciones que se explican en Hach Company (2000) paso a paso destacan la información que aparece en todos los procedimientos.

El reactor de electrocoagulación se construyó empleando los siguientes componentes: (1) fuente de

alimentación regulable marca J Power Electronic modelo PE-F240W, (2) tanque de vidrio con tres compartimentos de 1 litro de capacidad cada uno, (3) tres placas de aluminio de 7 cm × 12 cm, (4) tres placas de hierro de 7 cm × 12 cm, (5) 5 metros de cable n.º 14 para conexiones eléctricas, y (6) sistema auxiliar compuesto por mangueras, válvulas, filtro y termómetro.

El montaje se realizó teniendo en consideración el esquema del electrocoagulador de la figura 1. Se siguieron con cuidado los pasos indicados en el diagrama para asegurar que el dispositivo se ensamblara correctamente y pudiera funcionar de manera eficiente. Cada uno de los componentes, desde los electrodos hasta los interruptores y las conexiones, fue colocado y ajustado con precisión, de acuerdo con las especificaciones técnicas proporcionadas. El proceso de montaje requirió una atención minuciosa a los detalles para garantizar que el electrocoagulador cumpliera con los estándares de seguridad y desempeño requeridos. Una vez completado el ensamblaje, se realizaron pruebas exhaustivas para verificar el correcto funcionamiento del dispositivo antes de proceder a su puesta en marcha.

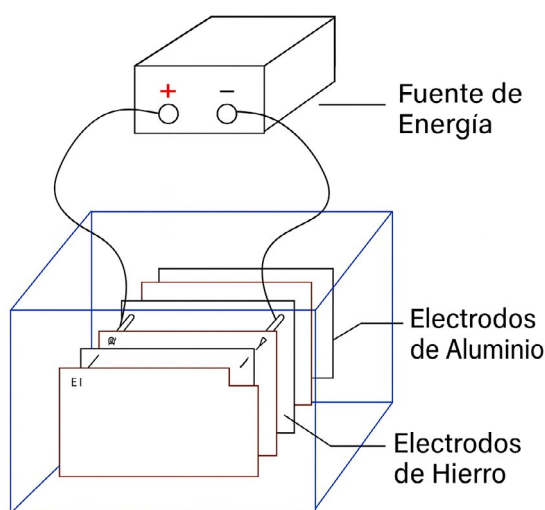


Figura 1. Esquema del electrocoagulador

Nota. La Figura 1 representa la configuración del sistema de electrocoagulación utilizado en el estudio. Muestra la disposición de los electrodos, el tanque de tratamiento y las conexiones eléctricas. La configuración incluye tres compartimentos de 1 litro cada uno con placas de aluminio (Al) y hierro (Fe) de 7 cm × 12 cm. Adaptado de Betancourt (2014).

Para aplicar un diseño Taguchi, se eligió un diseño ortogonal de $L_9 (3^3)$, compuesto por cuatro elementos con tres niveles (Villegas, 2013). Esta disposición se incluyó en el *software* estadístico Minitab 21 versión de prueba, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Diseño experimental Taguchi $L_9(3)^3$

Factores de control	Niveles			Unidad
	1	2	3	
A: Corriente eléctrica	2	3	4	Amperios
B: Tiempo	10	15	20	Minutos
C: Distribución de electrodos	1(Fe,Fe)	2(Al,Al)	3(Al,Fe)	

Se utilizó el modelo Taguchi y se incluyó en el *software* estadístico Minitab (versión de prueba) una disposición ortogonal de $L_9 (3^3)$, que consta de 3 componentes con tres niveles. El diseño de matriz ortogonal que se utilizó fue la matriz $L_9 (3)^3$, conformado por tres elementos, y el propósito de esta evaluación fue determinar el impacto de las variables independientes: A: la intensidad de la corriente eléctrica, B: tiempo y C: la distribución de los electrodos. La variable de respuesta (Y1) correspondió a la caracterización fisicoquímica. Esta estructura ortogonal permitió construir nueve corridas experimentales para determinar el impacto de las variables independientes, como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Tratamientos propuestos por método de Taguchi $L_9(3)^3$

Tratamientos	Factor 1 A: Corriente eléctrica (amperios)	Factor 2 B: Tiempo (minutos)	Factor 3 C: Distribución de electrodos
1	2	10	Fe:Fe
2	2	15	Al:Al
3	2	20	Al:Fe
4	3	10	Al:Al
5	3	15	Al:Fe
6	3	20	Fe:Fe
7	4	10	Al:Fe
8	4	15	Fe:Fe
9	4	20	Al:Al

El estudio se ejecutó cumpliendo las normativas ambientales vigentes para el manejo de aguas residuales industriales. Las muestras de efluentes se obtuvieron con autorización formal de la empresa Vida Sana, siguiendo protocolos de seguridad laboral y ambiental establecidos. Los residuos generados durante los experimentos fueron neutralizados y dispuestos conforme a las regulaciones ambientales locales.

Resultados

Los resultados que se muestran en la Tabla 4 superan los límites máximos permitidos para los efluentes industriales. Esto es relevante, ya que el Decreto Supremo 010-2019-Vivienda establece los límites aceptables de diversos parámetros físicos, químicos y biológicos que

deben cumplir los efluentes de la industria láctea, con el objetivo de prevenir la contaminación de los cuerpos de agua y proteger la salud de la población.

Tabla 4. Resultados de la caracterización fisicoquímicas de las muestras

Características fisicoquímicas	Unidad	VMA	Valor promedio en la muestra	Cumple con el D. S. 010-2019
DBO ₅	mg/L	500	4156	No
DQO	mg/L	1000	6061	No
Sólidos suspendidos totales	mg/L	500	817	No
Aceites y Grasas (A y G)	mg/L	100	682	No
Sulfuros	mg/L	5	10.5	No
pH	-	6-9	7.9	Si

Nota. Valor máximo admisible (VMA) según Decreto Supremo 010-2019-Vivienda para los efluentes industriales.

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos de los nueve tratamientos por electrocoagulación aplicados a las muestras de efluentes de la industria láctea. Estos resultados demuestran que los parámetros evaluados, como la remoción de grasas y aceites no exceden los límites máximos permisibles establecidos en el Decreto Supremo 010-2019-Vivienda para este tipo de efluentes.

Tabla 5. Resultados de la remoción de grasas y aceites

Tratamientos	Factor 1 A: Corriente eléctrica (amperios)	Factor 2 B: Tiempo (minutos)	Factor 3 C: Distribución de electrodos	Variable Remoción de grasas y aceite mg/L
1	2	10	Fe:Fe	38.8 ± 0.92
2	2	15	Al:Al	39.3 ± 0.057
3	2	20	Al:Fe	30.9 ± 0.47
4	3	10	Al:Al	33.4 ± 0.567
5	3	15	Al:Fe	24.6 ± 0.067
6	3	20	Fe:Fe	29.6 ± 0.089
7	4	10	Al:Fe	23.6 ± 0.78
8	4	15	Fe:Fe	27.8 ± 0.76
9	4	20	Al:Al	29.7 ± 0.023

Nota. Los valores se presentan como promedio ± desviación estándar.

En la Figura 2, sobre el análisis de ANOVA de un factor aplicado a la eficiencia de remoción de aceites y grasas en efluentes de la industria láctea, se evidencian diferencias significativas entre nueve tratamientos.

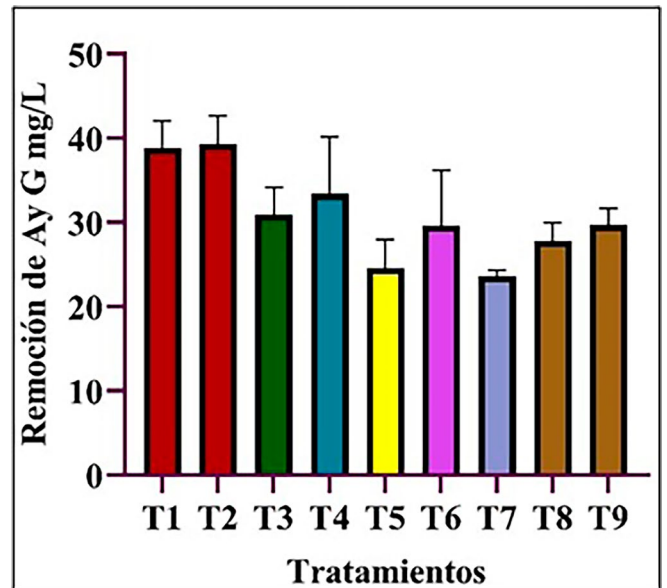


Figura 2. ANOVA unidireccional ordinario para remoción de aceites y grasas

En la Tabla 6 se observa que los principales factores que afectan significativamente el proceso de electrocoagulación son la intensidad de corriente, el tiempo de aplicación y la disposición de los electrodos, con valores de p inferiores a 0,05. Esto indica que estos parámetros juegan un papel crucial en la eficacia y el rendimiento del proceso.

Tabla 6. Análisis de varianza de relaciones SN para la variable grasas y aceites

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Corriente	2	10.6135	10.6135	5.30676	406.04	0.002
Tiempo	2	0.2587	0.2587	0.12936	9.90	0.092
Electrodos	2	8.1703	8.1703	4.08517	312.57	0.003
Error residual	2	0.0261	0.0261	0.01307		
Total	8	19.0687				

Nota. SN = relación señal a ruido; GL = grados de libertad; SC Sec. = suma de cuadrados secuencial; SC Ajust. = suma de cuadrados ajustada; MC Ajust. = media de cuadrados ajustada; F = estadístico F; P = valor de probabilidad.

En la tabla 7 se muestra la relación señal y ruido, que se considera para la variable respuesta el criterio «más pequeño es mejor». Este criterio se utiliza cuando el objetivo es minimizar la variable de respuesta, es decir, se busca obtener un valor lo más pequeño posible.

Tabla 7. Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido para la variable aceites y grasas

Nivel	Corriente	Tiempo	Electrodos
1	-31.15	-29.90	-30.03
2	-29.24	-29.53	-30.61
3	-28.60	-29.56	-28.36
Delta	2.56	0.37	2.25
Clasificar	1	3	2

Nota. Delta = diferencia entre el valor máximo y mínimo; clasificar = orden de importancia de los factores.

La Figura 3 muestra los efectos principales para la relación SN, donde se observa que los tres factores influyen en la eliminación de grasas y aceites. Sin embargo, la intensidad de la corriente eléctrica y la distribución de los electrodos tienen una mayor influencia, al alcanzar los mejores puntajes en cuatro amperios de corriente, 10 minutos de tiempo y la distribución de electrodos Al:Fe.

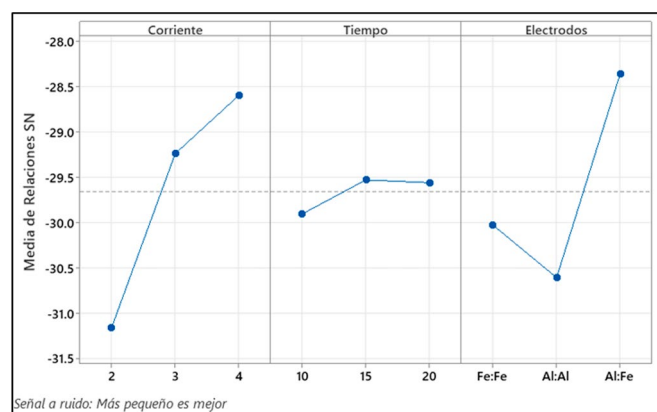


Figura 3. Efectos principales para relaciones SN en la variable grasas y aceites

En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos de los nueve tratamientos por electrocoagulación aplicados a las muestras de efluentes de la industria láctea. Estos resultados demuestran que los parámetros evaluados, DBO₅, se ajustan con los límites máximos permisibles establecidos en la normativa DS-010-2019-Vivienda para este tipo de efluentes.

Tabla 8. Resultados de la remoción de DBO₅

Tratamientos	Factor 1 B: Corriente eléctrica (A)	Factor 2 C: Tiempo (minutos)	Factor 3 D: Distribución de electrodos	Variable DBO ₅ mg/L
1	2	10	Fe:Fe	499 ± 0.08
2	2	15	Al:Al	258 ± 0.36
3	2	20	Al:Fe	448 ± 0.067
4	3	10	Al:Al	239 ± 0.08
5	3	15	Al:Fe	443 ± 0.42

6	3	20	Fe:Fe	468 ± 0.067
7	4	10	Al:Fe	411 ± 0.34
8	4	15	Fe:Fe	447 ± 0.23
9	4	20	Al:Al	216 ± 0.45

Nota. Los valores se presentan como promedio ± desviación estándar.

En la Figura 4, sobre el análisis de ANOVA de un factor aplicado al análisis DBO₅ para efluentes de la industria láctea, se evidenciaron diferencias significativas entre nueve tratamientos.

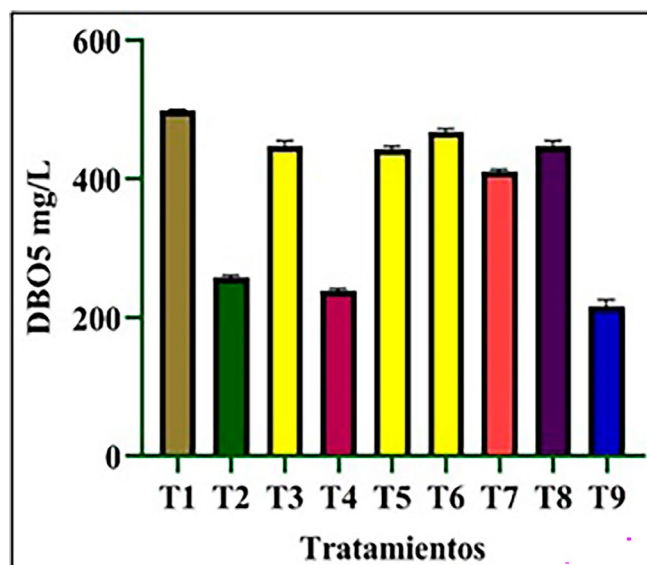


Figura 4. ANOVA unidireccional ordinario para DBO₅

De acuerdo con la Tabla 9, los principales factores que afectan significativamente el proceso de electrocoagulación son la intensidad de la corriente y la distribución de los electrodos, mientras que el tiempo de aplicación no es un factor significativo, con valores de p inferiores a 0,05. Esto sugiere que estos parámetros tienen un papel fundamental en la eficacia y el rendimiento del proceso.

Tabla 9. Análisis de varianza de relaciones SN para la variable DBO₅

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Corriente	2	1.8025	1.8025	0.9012	70.62	0.014
Tiempo	2	0.1911	0.1911	0.0956	7.49	0.118
Electrodos	2	63.7396	63.7396	31.8698	2497.23	0.000
Error residual	2	0.0255	0.0255	0.0128		
Total	8	65.7588				

En la Tabla 10 se muestra la relación señal y ruido, que se considera para la variable respuesta el criterio «más pequeño es mejor». Este criterio se utiliza cuando el

objetivo es minimizar la variable de respuesta, es decir, se busca obtener un valor lo más pequeño posible.

Tabla 10. Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido para DBO₅

Nivel	Corriente	Tiempo	Electrodos
1	-51.74	-51.26	-53.45
2	-51.29	-51.38	-47.48
3	-50.65	-51.03	-52.74
Delta	1.09	0.35	5.97
Clasificar	2	3	1

La Figura 5 muestra los efectos principales para la relación SN, donde se observa que los tres factores influyen en la reducción de DBO₅. Sin embargo, la distribución de los electrodos tiene una mayor influencia, seguido de la intensidad de corriente y el tiempo. Alcanza los mejores puntajes en cuatro amperios de corriente, 20 minutos de tiempo y la distribución de electrodos Al:Al.

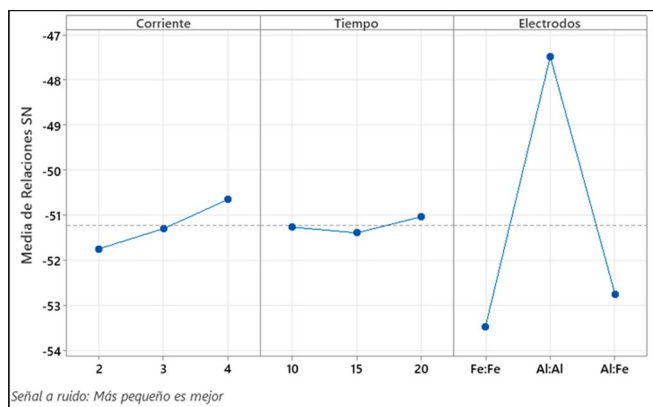


Figura 5. Efectos principales para relaciones SN para DBO₅

En la Tabla 11 se presentan los resultados obtenidos de los nueve tratamientos por electrocoagulación aplicados a las muestras de efluentes de la industria láctea. Estos resultados demuestran que el parámetro evaluado, SST, cumple satisfactoriamente con los límites máximos permisibles establecidos en el Decreto Supremo 010-2019-Vivienda para este tipo de efluentes.

Tabla 11. Resultados de la remoción de SST

Tratamientos	Factor 1 A: Corriente eléctrica (amperios)	Factor 2 B: Tiempo (minutos)	Factor 3 C: Distribución de electrodos	Variable SST mg/L
1	2	10	Fe:Fe	31 ± 1.23
2	2	15	Al:Al	7 ± 0.54
3	2	20	Al:Fe	16 ± 1.01
4	3	10	Al:Al	2 ± 1.56

5	3	15	Al:Fe	10 ± 0.08
6	3	20	Fe:Fe	22 ± 1.03
7	4	10	Al:Fe	9 ± 1.24
8	4	15	Fe:Fe	20 ± 0.06
9	4	20	Al:Al	1 ± 0.08

Nota. SST = sólidos suspendidos totales; A = corriente eléctrica; B = tiempo de tratamiento; C = distribución de electrodos; Fe = electrodos de hierro; Al = electrodos de aluminio. Los valores se presentan como promedio ± desviación estándar.

En la Figura 6, sobre el análisis de ANOVA de un factor aplicado al análisis SST para efluentes de la industria láctea, se evidenciaron diferencias significativas entre nueve tratamientos.

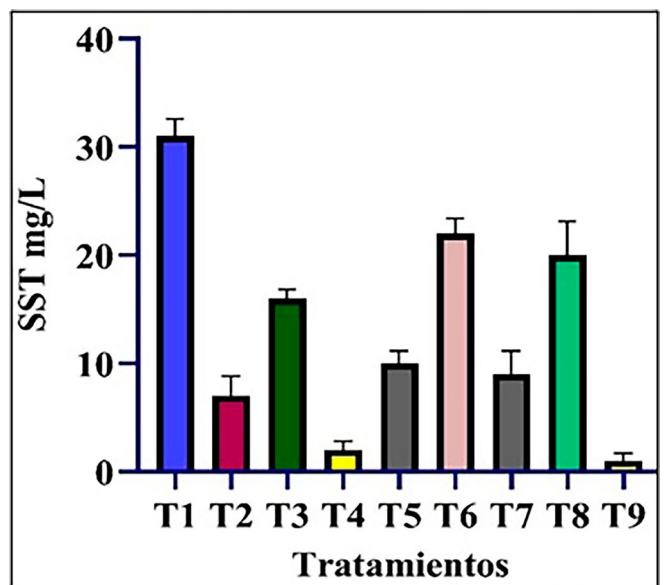


Figura 6. ANOVA unidireccional ordinario para SST

De acuerdo con la Tabla 12, los principales factores que afectan significativamente el proceso de electrocoagulación son la intensidad de corriente y la disposición de los electrodos, con valores de p inferiores a 0,05. Esto indica que estos parámetros juegan un papel crucial en la eficacia y el rendimiento del proceso.

Tabla 12. Análisis de varianza de relaciones SN para la variable SST

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Corriente	2	10.6135	10.6135	5.30676	406.04	0.002
Tiempo	2	0.2587	0.2587	0.12936	9.90	0.092
Electrodos	2	8.1703	8.1703	4.08517	312.57	0.003
Error residual	2	0.0261	0.0261	0.01307		
Total	8	19.0687				

En la Tabla 13 se muestra la relación señal y ruido, que se considera para la variable respuesta el criterio «más

pequeño es mejor». Este criterio se utiliza cuando el objetivo es minimizar la variable de respuesta, es decir, se busca obtener un valor lo más pequeño posible.

Tabla 13. Respuesta para relaciones de señal a ruido para SST

Nivel	Corriente	Tiempo	Electrodos
1	-31.15	-29.90	-30.03
2	-29.24	-29.53	-30.61
3	-28.60	-29.56	-28.36
Delta	2.56	0.37	2.25
Clasificar	1	3	2

La Figura 7 muestra los efectos principales para la relación SN, donde se observa que los tres factores influyen en la eliminación de sólidos suspendidos totales SST. Sin embargo, la intensidad de la corriente eléctrica y la distribución de los electrodos tienen una mayor influencia, ya que alcanzan los mejores puntajes en cuatro amperios de corriente, 20 minutos de tiempo y la distribución de electrodos Al:Al.

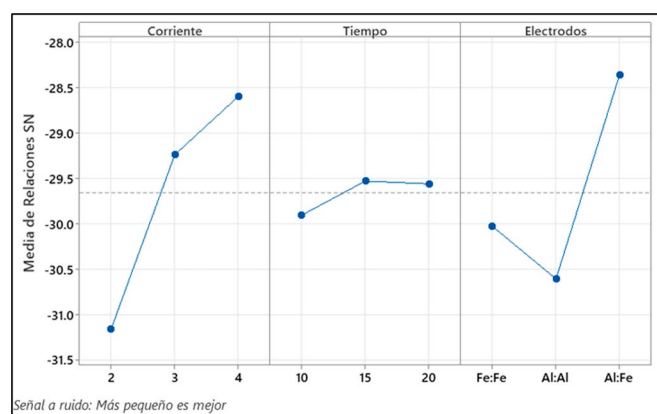


Figura 7. Efectos principales para relaciones SN para SST

Discusión

El análisis de los resultados presentados en la Figura 4 revela que los tres factores evaluados (distribución de electrodos, intensidad de corriente y tiempo) desempeñan un papel crucial en la reducción de la DQO en el proceso de tratamiento. En particular, destaca que la distribución de los electrodos Al:Al se asocia con los mejores resultados en términos de eficacia, ya que alcanzan una notable eficiencia de eliminación de DQO cuando se aplican cuatro amperios de corriente durante 20 minutos. Estos hallazgos sugieren que la configuración del sistema juega un papel determinante en la optimización del proceso de tratamiento, lo que confirma la importancia del diseño operativo en la remoción de contaminantes.

Al comparar estos resultados con los de Bedoya y Sanches (2009), se evidencia una analogía importante. En

su investigación sobre el uso de un reactor anaerobio de lecho de lodo para la eliminación de materia orgánica del suero de queso, lograron una reducción del 98 % en DQO bajo condiciones específicas, mientras que, en este estudio, los mejores resultados se obtuvieron bajo parámetros optimizados mediante el diseño de Taguchi. Es relevante destacar que en el trabajo de Bedoya y Sanches se logró una reducción significativa, pero también se observó una caída en la eficiencia (77 %) al aumentar la carga orgánica a 18,6 g DQO/L, lo que coincide con nuestras observaciones sobre la relación entre la carga orgánica y la eficiencia de eliminación.

Estos resultados sugieren una tendencia similar en ambos enfoques, donde una carga orgánica más elevada puede comprometer la eficiencia del tratamiento. La relación entre las variables experimentales y los niveles de DQO resalta la necesidad de optimizar cada uno de los parámetros de operación, especialmente cuando se busca maximizar la remoción de materia orgánica en sistemas de tratamiento. Además, la evidencia sugiere que hay un límite operable donde la eficiencia desciende, lo que enfatiza la importancia de un control cuidadoso y un diseño adecuado en el manejo de efluentes.

La combinación de los resultados de la presente investigación y los de Bedoya y Sanches sugiere que, si bien hay similitudes en los patrones de desempeño, cada sistema presenta características únicas que deben ser consideradas para el diseño de procesos de tratamiento eficientes. Se recomienda realizar estudios adicionales que aborden la interacción entre estas variables, de manera que se puedan delinear estrategias más efectivas para optimizar la eliminación de DQO en efluentes orgánicos.

También cabe precisar los factores que influyen significativamente en la eliminación de grasas y aceites mediante el proceso de electrocoagulación. La Figura 2 ilustra claramente los efectos principales del sistema de electrocoagulación (SN), y destaca la intensa influencia de la intensidad de la corriente eléctrica y la distribución de los electrodos. Los hallazgos sugieren que el mejor rendimiento en la eliminación de contaminantes se logra bajo condiciones óptimas de cuatro amperios, una duración de 10 minutos, y el empleo de una configuración de electrodos compuesta por aluminio y hierro (Al:Fe). Estos resultados son coherentes con la perspectiva de que un control preciso de la corriente y la disposición de los electrodos puede maximizar la efectividad del tratamiento.

En contraste, los resultados de López y Harnisth (2016) proporcionaron un contexto valioso al mencionar el desarrollo de un electrocoagulador de bajo costo, en el cual se identificaron también factores críticos que afectan la eficacia de la electrocoagulación, como el tiempo de reacción, la tensión aplicada y el diseño del sistema con múltiples placas. De manera importante, corroboran que tanto el tiempo de reacción como la tensión

son determinantes clave para lograr una reducción significativa de la turbidez y otros contaminantes en el efluente tratado.

Los resultados de López y Harnisth (2016) son contundentes en mostrar que la turbidez, que inicialmente se situaba en 770 NTU, se redujo a 19,9 NTU, lo que indica un descenso superior al 97 % en la turbidez. Adicionalmente, las tasas de eliminación alcanzadas, aproximadamente, 93 % para la demanda química de oxígeno (DQO), 82 % para la demanda biológica de oxígeno (DBO) y 76 % para la recuperación de sólidos, subrayan no solo la efectividad del método, sino también la relación inversa entre los parámetros del proceso y la contaminación residual.

La convergencia de estos resultados sugiere que la electrocoagulación es una técnica prometedora para el tratamiento de aguas residuales, y enfatiza la necesidad de realizar estudios adicionales que exploren otras configuraciones de electrodos, diferentes temperaturas y la posible integración de coagulantes adicionales. Asimismo, es vital considerar el costo en la implementación de estos sistemas tratando de equilibrar la eficiencia con la viabilidad económica, con el objetivo de ampliar su aplicación en el tratamiento de efluentes industriales y municipales.

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten establecer que la electrocoagulación constituye una tecnología eficaz para el tratamiento de efluentes de la industria láctea, por lo que es posible identificar las condiciones operativas óptimas para la remoción de diferentes contaminantes. En el caso específico de la eliminación de grasas y aceites, se determinó que las condiciones ideales corresponden a una corriente de cuatro amperios, un tiempo de tratamiento de 10 minutos y la configuración de electrodos Al:Fe. Esta combinación de parámetros sugiere que los esfuerzos deben enfocarse en estos valores específicos para maximizar la eficiencia del proceso en la remoción de este tipo de contaminantes.

Para la reducción de la demanda biológica de oxígeno (DBO₅), los factores que permiten lograr la máxima eficiencia fueron identificados como cuatro amperios de corriente eléctrica, 20 minutos de tratamiento y una configuración de electrodos Al:Al. De manera similar, los tres principales factores que influyen en la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) mostraron que los mejores resultados se obtienen con 4 amperios de corriente, 20 minutos de tiempo de tratamiento y la configuración de electrodos Al:Al.

En cuanto a la eliminación de sólidos suspendidos totales (SST), se determinó que, aunque los tres factores evaluados ejercen influencia en el proceso, la intensidad de la corriente eléctrica y la configuración de los electrodos tienen un mayor impacto en la eficiencia de remoción. Los

resultados óptimos para este parámetro se alcanzaron con 4 amperios de corriente, 20 minutos de tiempo de tratamiento y la configuración de electrodos Al:Al, lo que confirma un patrón consistente con los parámetros de DQO y DBO₅.

Con base en los hallazgos obtenidos, se considera fundamental ampliar el alcance de la investigación mediante el estudio del uso combinado de electrocoagulación con otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales. La integración con sistemas como biofiltración, lodos activados o tratamientos con ozono podría potenciar la eliminación de compuestos orgánicos y nutrientes, a fin de generar sinergias que optimicen la eficiencia global del proceso de tratamiento.

Para validar la aplicabilidad práctica de los resultados obtenidos en condiciones controladas de laboratorio, resulta indispensable realizar experimentos a escala piloto. Esta fase permitirá evaluar la viabilidad del proceso en condiciones reales de operación, considerando factores como las variaciones en la composición del efluente, las condiciones ambientales y los aspectos económicos asociados con la implementación a mayor escala.

Finalmente, se recomienda investigar el uso de distintos materiales y configuraciones de electrodos que puedan mejorar aún más la eficiencia de la electrocoagulación. La exploración de electrodos recubiertos o fabricados con materiales avanzados, tales como electrodos de carbono o aleaciones metálicas especializadas, podría abrir nuevas posibilidades para optimizar el rendimiento del sistema, reducir costos operativos y aumentar la durabilidad del equipamiento, aspectos fundamentales para la viabilidad comercial de esta tecnología.

Contribución de autoría (CRediT)

Wilber Quispe Prado: conceptualización, metodología, *software*, validación, análisis formal, investigación, recursos, curación de datos, redacción (borrador original), visualización, supervisión y administración del proyecto.

Patricia Milagros Quispe Barrantes: conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, recursos, curación de datos, redacción (revisión y edición) y visualización.

Fuente de financiamiento

Este trabajo fue financiado por el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional Federico Villarreal.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés en relación con la investigación, la autoría o la publicación de este artículo.

Referencias bibliográficas

- Arango Bedoya, O. y Sanches Sousa, L. (2009).** «Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea en sistemas anaerobios tipo UASB». *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7, pp. 24-31. Disponible en: <https://revistas.unicauca.edu.co/index.php/bioteologia/article/view/711>
- Arango Ruiz, A. y Garcés Giraldo, L. F. (2007).** «Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea». *Universidad Eafit*, 43(147), pp. 56-67. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/215/21514706.pdf>
- Ballester, A., Rodríguez, A. B. y Geta, J. A. L. (1999).** *Medida y evaluación de las extracciones de agua subterránea*. Madrid: IGME.
- Betancourt, E. y Domínguez, S. (2014).** «Electrocoagulación». Monografías.com. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos99/electrocoagulation/electrocoagulation>
- Fúquene, D. M. y Yate, A. V. (2018).** Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Working paper*, ECAPMA. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://pdfs.semanticscholar.org/eef3/5447f4ccb4f9abbad0a775be13bffe04814.pdf>
- García, F. P., Hernández, J. C., Cruz, V. E. R. y Santillán, Y. M. (2012).** «Electrocoagulación: una alternativa para depuración de lactosuero residual». *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 5(3), pp. 51-77. Disponible en: <https://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/34727>
- Hach Company. (2000).** *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales* APHA-AWWA-WPCF. Madrid: Díaz de Santos.
- López, P. y Harnisth, A. (2016).** «Electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea». *Enfoque UTE*, 7(1), pp. 13-21. Disponible en: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1390-65422016000100013&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Niño, G. E. A., Barrera, C. A. C., García, A. B. y Lumbaque, E. C. (2013).** «La electrocoagulación como un tratamiento eficiente para la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales». *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 9(2), pp. 306-317. Disponible en: <https://doi.org/10.18359/rfcb.389>
- Tenelema Guamán, S. E. (2019).** *Diseño de un electrocoagulador para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea FAMILAC del cantón Chambo*. [Tesis de bachillerato, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
- Villegas, J. B. G. (2013).** «Aplicación de diseño de experimentos para el análisis de secado de un producto». *InnOvaciones de Negocios*, 10, pp. 145-158. Disponible en: <https://doi.org/10.29105/rinn10.19-7>