

ELECTROCOAGULACIÓN EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LAS PLANTAS QUESERAS

ELECTROCOAGULATION IN RESIDUAL WATERS OF QUESERAS PLANTS

Ronald Astete-Tebes¹, Edgar Gallegos Rojas², Faustino Huanca Apaza³ Edward Torres Cruz⁴

¹ Docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNA-Puno

ID [0000-0003-1007-9982](#)

²Docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNA-Puno

ID [0000-0003-1280-4711](#)

³Investigador independiente

⁴Estudiante de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la UNA-Puno

ID [0000-0001-7380-805X](#)

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, se realizó con el objetivo de evaluar el efecto de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales procedente de las plantas queseras. Se construyó un reactor a escala de laboratorio, cuyas características son: tipo de operación discontinua (batch), distancia entre electrodos 1,00 cm, electrodos de aluminio (3 ánodos y 3 cátodos), área de reacción 49 cm² y volumen de la celda 1,30 L. Las variables son: tiempo de residencia, voltaje y concentración inicial, en los cuales se evaluó el porcentaje de remoción del DBO y DQO. La remoción cuantitativa de DBO logrado en el proceso de electrocoagulación reporta que de una concentración inicial diluida (823,45 mg/L) se logra remover el 76,25% llegando a una concentración final de 195,56 mg/L, en 45 min a 10 V; de igual manera en la remoción de la DQO de una concentración inicial diluida (1068,56mg/L), se logra remover el 47,67%, obteniendo una concentración final de 497,46 mg/L, en 45 min a 10 V. En estas condiciones se obtuvo incremento en el pH de 3,87 a 6,54; temperatura de 15 a 38°C y una disminución ligera en la conductividad de 42,02 a 40,50 mS/cm. Los parámetros de mayor influencia en el aumento de la eficiencia de la remoción de DBO fueron la concentración inicial, voltaje, tiempo de residencia y la interacción tiempo de residencia – voltaje; asimismo para la remoción de DQO, los factores de mayor influencia en el proceso son: tiempo de residencia, concentración inicial y voltaje.

Palabras claves: Concentración Electrocoagulación, Remoción,

¹ Email: rastete@unap.edu.pe

ABSTRACT

The present research work was carried out with the objective of evaluating the effect of electrocoagulation for the treatment of wastewater from the cheese plants. A reactor was built on a laboratory scale, whose characteristics are: type of discontinuous operation (batch), distance between electrodes 1.00 cm, aluminum electrodes (3 anodes and 3 cathodes), reaction area 49 cm² and volume of the cell 1.30 L. The variables are: residence time, voltage and initial concentration, in which the percentage of BOD and COD removal was evaluated. The quantitative removal of BOD achieved in the electrocoagulation process reports that from a diluted initial concentration (823.45 mg / L) it is possible to remove 76.25%, reaching a final concentration of 195.56 mg / L, in 45 min. at 10 V; Similarly, in the removal of COD from a diluted initial concentration (1068.56 mg / L), 47.67% was removed, obtaining a final concentration of 497.46 mg / L, in 45 min at 10 V. Under these conditions an increase in pH was obtained from 3.87 to 6.54; temperature of 15 to 38 ° C and a slight decrease in conductivity from 42.02 to 40.50 mS / cm. The parameters with the greatest influence on increasing the efficiency of the BOD removal were the initial concentration, voltage, residence time and residence-voltage time interaction; also for the removal of COD, the factors of greatest influence in the process are: residence time, initial concentration and voltage.

Keywords: Concentration Electrocoagulation, Removal.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuestra sociedad conlleva un elevado costo medioambiental, de cuya magnitud el ser humano sólo ha empezado a ser consciente en la última década(Perez Espinoza et al., 2016; Severiche-Sierra et al., 2016). El conocimiento, cada vez más profundo, de los complejos mecanismos que rigen la interacción de la actividad humana - medio ambiente y de las tendencias de cambio que sigue nuestro planeta, ha provocado la sensibilización social y ha convertido en la actualidad a la Ingeniería en un importante campo de investigación(Polo Campos, 2019; Rodríguez & Rodríguez, 2021; Severiche-Sierra et al., 2016).

Actualmente con el crecimiento de la población mundial se ha vuelto un reto proveer agua limpia para toda la población, especialmente en los países en vía de desarrollo, a causa de que los cuerpos de agua están siendo contaminados por residuos industriales y otras actividades que realiza el hombre(Perez Espinoza et al., 2016; Villena Chávez, 2018). El reúso del agua residual es ahora una necesidad, la cual está en busca de tecnologías efectivas y de bajo costo(Díaz-Cuenca et al., 2012).

Las industrias relacionadas con el sector lácteo son muy variadas, tanto como los productos lácteos presentes en el mercado(Valdivia et al., 2021), debido a su complejidad, no es posible generalizar sobre la contaminación generada, que es muy específica del tipo de industria que se considere. Por lo general, la leche es recibida en las primeras horas de la mañana, y se procesa en las horas siguientes(Fernando Herrera & Javid Corpas, 2013). Así pues, los residuos líquidos se producen de manera no continua a través del día permitiendo grandes variaciones en la carga contaminante durante el proceso de producción(Gonzales, 2012).

Los efluentes del proceso de elaboración y Producción de quesos de las plantas, alcanzan concentraciones de DBO hasta de 1650,00 mg/L, superando las disposiciones de la Organización Mundial de la Salud para aguas de consumo, que especifica un máximo de 200,00 mg/L(Arteaga Solórzano et al., 2021; Barrenechea, 2004).

En la presente investigación se evaluó el efecto de la electrocoagulación para la remoción de, Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno; de las aguas residuales provenientes de las plantas queseras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ámbito de Estudio: El trabajo de investigación, se llevó acabo en el Laboratorio de Control de Calidad de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano.

Análisis de la Muestra: Se muestra el reporte del análisis fisicoquímico del agua residual del proceso de elaboración de Quesos², correspondiente al primer lote de producción del 2014, en el cual se procesaron 1000litro de leche, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 1. Características del agua residual utilizada en la investigación

Nº	Parámetro	Unidad	Resultado
1	DBO ₅	mg/L	1650,00
2	DQO	mg/L	65200,00
3	pH	Unid	3,53
4	Conductividad	mS/cm	40,05
5	Nitrógeno amoniacal	mg/L	82,00
6	Temperatura	°C	15,00
7	SST	mg/L	1600,00
8	tds ³	ppt	17,36

Fuente: Elaboración propia

² Planta quesera San José Asillo- Azángaro - Puno

³ tds, Sales totales disueltas

Determinación de DBO₅: La determinación de DBO₅ se realizó en el laboratorio de control de calidad de aguas.

Se evaluaron los valores de tiempo de residencia, voltaje y concentración inicial; el método Utilizado fue el Método Estándar (APHA, AWWA, WPCF. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales 1992). La cantidad de oxígeno consumido por los microorganismos para degradar la materia orgánica (DBO₅) en los efluentes se determinó en un periodo de incubación de 5 días a 20°C., en botellas Winkler de 300ml se agregaron 1ml de inoculo, la cantidad de muestra según el valor de DBO5 estimado y el resto se con aguas de disolución.

Tabla 2. Variables del diseño experimental para el DBO

VARIABLE	NIVEL BAJO	NIVEL ALTO
	(-1)	(+1)
Tiempo de residencia (min)	15	45
Voltaje (V)	5	10
Concentración inicial DBO (mg/L)	823.45	1086.45

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 2, el nivel bajo de concentración inicial de DBO es una dilución de (1/2) o sea (1 agua residual original/2 agua) = 823,45 y el nivel alto es la muestra original con una concentración de 1086,45 mg/L de DBO.

a. Determinación de DQO

Se evaluaron los valores de tiempo de residencia, voltaje y concentración inicial; el método Utilizado fue el método HACH 8000 (APHA, AWWA, WPCF. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales 1992), la oxidación posee en el inicio su proceso en el tubo de digestión, el cual contiene combinación de oxidante de reacción compuesta por dicromato de potasio, ácido sulfúrico, sulfato de plata y sulfato de mercurio (Rodríguez-Heredia, 2017). Asimismo la sal de plata interviene a modo de catalizador de la oxidación de los compuestos orgánicos, y el sulfato de mercurio impide las interferencias causadas por los cloruros (Peña & Díaz, 2020). En el proceso, se agregan dos mililitros de la muestra a analizar pen el tubo de digestión, después de ello, se mantiene dos horas a 150 °C, luego, el tubo se deja

enfriar a temperatura ambiente y se mide el valor de la DQO directamente en un espectrofotómetro DRB-200, generalmente, el error de la medida es siempre inferior al 10%.

Tabla 3. Variables del diseño experimental para el DQO.

VARIABLE	NIVEL BAJO		NIVEL ALTO
	(-1)	(+1)	
Tiempo de residencia (min)	15	45	
Voltaje (V)	5	10	
Concentración inicial DQO (mg/L)	1068.56	4676.65	

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 4, el nivel bajo de la concentración inicial de DQO es una dilución de (1/2) o sea (1 agua residual original/2 agua) = 1068,56; y el nivel alto es la muestra original con una concentración de 4676,65 mg/L de DQO.

Diseño experimental: Para procesar los datos obtenidos durante la investigación se empleó el diseño de experimento factorial 2^k . Los datos observados se sometieron a un ANVA⁴, para detectar si existen significancia o no, la prueba de comparación múltiple a $p=0,05$. El modelo matemático que representa al diseño experimental es el siguiente:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \varepsilon$$

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Diseño de Experimento de los ensayos: Los ensayos en el presente trabajo de investigación se desarrollaron según el diseño de experimentos factorial 2^K , con 3 puntos centrales, los cuales hacen un total de 11 ensayos, en los cuales se estudiaron la remoción de DBO_5 y DQO, para posteriormente realizar un análisis estadístico en el cual se observa el comportamiento de cada variable y sus influencias en el proceso de electrocoagulación en la Tabla 4.

⁴ ANVA: Análisis de varianza

Tabla 4. Porcentajes de remoción de DBO₅ de las aguas residuales de las plantas queseras

Ensayo	Código	Factores en estudio				% Remoción
		Tiempo (min)	Voltaje (V)	C _i ⁵ DBO (mg/L)	C _f ⁶ DBO (mg/L)	
1	EC 01	15	5	823.45	497.75	39.55
2	EC 02	45	5	823.45	426.37	48.22
3	EC 03	15	10	823.45	367.61	55.35
4	EC 04	45	10	823.45	195.56	76.25
5	EC 05	15	5	1086.45	934.90	13.94
6	EC 06	45	5	1086.45	867.87	20.11
7	EC 07	15	10	1086.45	824.32	24.12
8	EC 08	45	10	1086.45	485.34	55.32
9	EC 09	30	7,5	976.72	602.38	38.32
10	EC 10	30	7,5	976.72	601.40	38.42
11	EC 11	30	7,5	976.72	611.44	37.39

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4 podemos observar, valores del porcentaje de remoción de DBO obtenidos en los 11 ensayos experimentales para las aguas residuales de las plantas queseras, para cada interacción entre tiempo de residencia, voltaje y concentración inicial. Se puede demostrar que el máximo porcentaje de remoción de DBO₅ fue del 76,25% el cual se obtuvo en las condiciones de 45 min, 10 V y 195,56mg/L de DBO

Tabla 5. Porcentajes de remoción de DQO de las aguas residuales de las plantas queseras.

Ensayo	Código	Factores en estudio				%
		Tiempo (min)	Voltaje (V)	C _i DQO (mg/L)	C _f DQO (mg/L)	
1	EC 01	15	5	1068.56	827.75	21.09
2	EC 02	45	5	1068.56	769.72	39.12
3	EC 03	15	10	1068.56	817.11	26.56
4	EC 04	45	10	1068.56	497.46	47.67

⁵ C_i : Concentración inicial

⁶ C_f : Concentración final

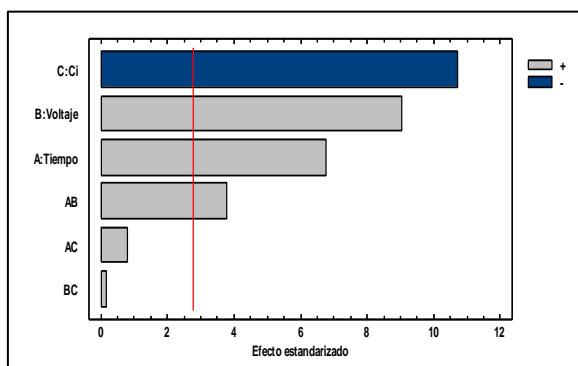
5	EC 05	15	5	4676.65	2945.9	16.44
6	EC 06	45	5	4676.65	2806.21	28.78
7	EC 07	15	10	4676.65	3914.32	19.23
8	EC 08	45	10	4676.65	2685.43	39.45
9	EC 09	30	7,5	2245.23	1502.38	33.43
10	EC 10	30	7,5	2245.23	1512.4	33.56
11	EC 11	30	7,5	2245.23	1491.44	32.23

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 5 podemos ver que las cantidades del porcentaje de remoción de DQO obtenidos durante los 11 ensayos experimentales para las aguas residuales de las plantas queseras, durante cada interacción entre tiempo de residencia, voltaje y concentración con la que se inició. Se puede apreciar que el mayor porcentaje de remoción de DQO fue del 47,67% el cual se consiguió a condiciones de 45min, 10 V y 497,46mg/L de DQO.

Evaluación de DBO₅: La tabla ANOVA (Analysis of variance) divide la variabilidad en el porcentaje de remoción en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos (Montgomery, 2010). Los p-valores comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Dado que 4 resultados alcanzados son inferiores a 0,05, estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en el porcentaje de remoción DBO, para un nivel de confianza de 95%, y estos factores son: tiempo de residencia, voltaje, concentración inicial y la interacción tiempo de residencia-voltaje.

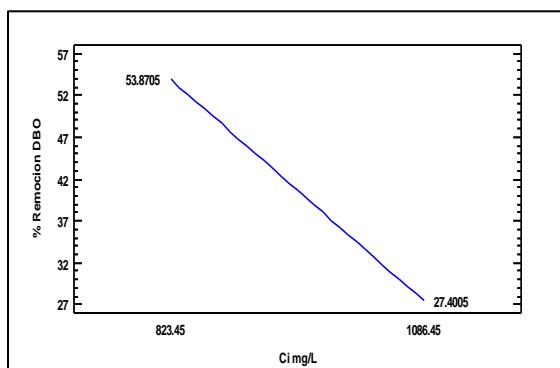
Fig. 1. Diagrama de barras de acuerdo con la remoción de DBO en las aguas residuales de las plantas queseras.



Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 1 se puede Observar la concentración inicial es el factor más significativo en la remoción de DBO, esto debido a que a una menor concentración de DBO la cantidad de hidróxidos y poli hidróxidos generados en la solución son suficientes para reaccionar con las partículas de DBO presentes en la solución, mientras que a altas concentraciones estos iones no son suficientes y queda DBO sin remover.

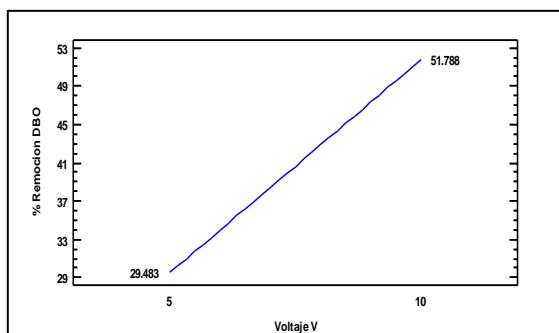
Fig. 2. Efecto de la concentración inicial en la remoción de DBO de las aguas residuales de las plantas queseras.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 2 se muestra el efecto de la concentración inicial en la remoción del DBO, alcanzando una remoción de 53,87%, en una concentración inicial de 823,45 mg/L y una de remoción de 27,40% en una concentración inicial 1086,45 mg/L de DBO, la pendiente es negativa indicando que es inversamente proporcional a la remoción del contaminante, es decir que a menor concentración inicial se obtendrá mayor remoción de DBO

Fig. 3. Efecto del voltaje en la remoción de DBO de las aguas residuales de las plantas queseras.

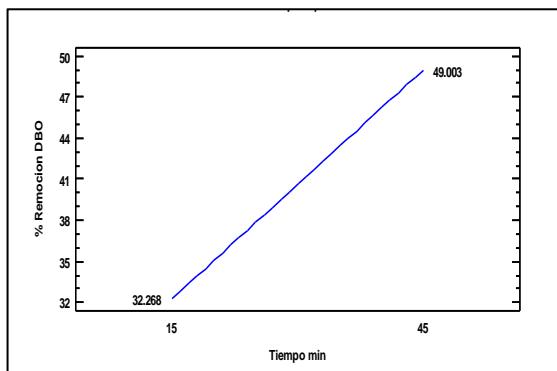


Fuente: Elaboración propia

En la figura 3, se muestra el efecto del voltaje en la remoción del DBO, obteniendo 51,78% en 10 V y 29,48% en 5 V, debido a que a una diferencia de potencial aplicado se logra vencer la resistencia del medio, permitiendo que se genere una corriente que logra el movimiento de los

electrones entre los electrodos y los iones o moléculas de la solución(Hurley & Masterton, 2011).

Fig. 4. Efecto del tiempo de residencia en la remoción de DBO de las aguas residuales de las plantas queseras.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4 se muestra el efecto del tiempo de residencia en la remoción del DBO, lográndose remover 49,00% en 45 min y 32,26% en 15 min, siendo directamente proporcional a la remoción de DBO. Además, se observa que en los primeros 15 minutos existe una considerable remoción de DBO igual al 32,26 %, esto, debido que a medida que transcurre la reacción se acumulan burbujas de H_2 y O_2 en los electrodos, incrementando la resistencia de la solución y disminuyendo la eficiencia de la remoción por la formación de óxido en el electrodo, que disminuye el transporte de masa entre los electrodos y la solución (Mollah, 2010).

Tabla 6. Valor óptimo para la remoción DBO

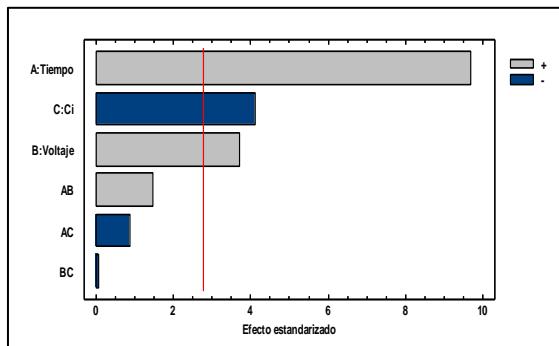
Factor	Inferior	Mayor	Óptimo
Tiempo de residencia (min)	15	45	45
Voltaje (V)	5	10	10
Concentración inicial DBO_5 (mg/L)	823.45	1086.45	823.45

Fuente: Elaboración propia

b. Evaluación de DQO.

Los valores demuestran la significancia estadística de cada uno de los factores. Para lo que 3 p-valores son inferiores a 0,05 estos factores tienen efecto estadísticamente significativo en el porcentaje de remoción de DQO, para un nivel de confianza de 95%.

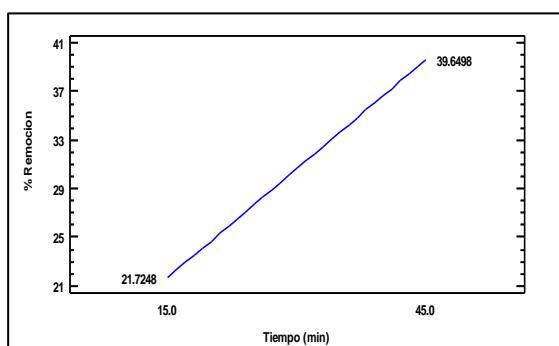
Fig. 5. Diagrama de barras para la remoción de la DQO de las aguas residuales de las plantas queseras.



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 5 se determina la importancia de los factores evaluados durante el diseño de experimentos, donde se observa que el tiempo de residencia, concentración inicial y voltaje influyen en el proceso para la remoción de DQO, un aumento en el tiempo de residencia y voltaje favorece significativamente en la remoción de la DQO, así mismo un aumento de la concentración inicial no favorece la degradación de la DQO.

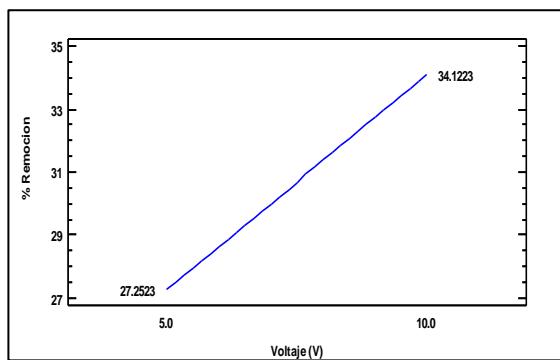
Fig. 6. Efecto del tiempo de residencia en la remoción de la DQO de las aguas residuales de las plantas queseras.



Fuente: Elaboración propia

En la figura 6, se observa que a mayor tiempo de residencia mayor será la remoción de la DQO, así en 15 min la remoción es 21,72% y en 45 min 39,65 %, también se observa que en los primeros minutos la electrocoagulación es eficiente, y luego disminuye la velocidad de reacción, este fenómeno podría deberse a que la superficie del aluminio ha adquirido una capa de óxido de aluminio que impide la electrodisolución en el ánodo, disminuyendo el transporte de masa entre los electrodos y la solución(Mollah, 2010).

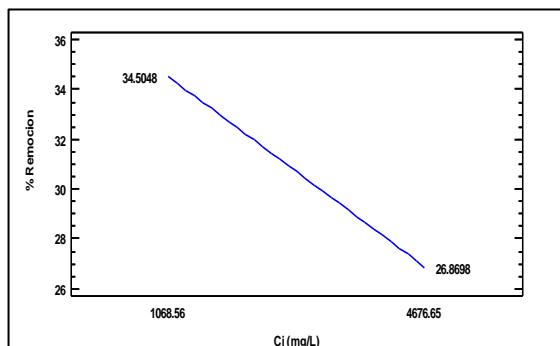
Fig. 7. Efecto del voltaje en la remoción de la DQO de las aguas residuales de las plantas queseras.



Fuente: Elaboración propia

En la figura 7, se observa la influencia del voltaje sobre la remoción de DQO. El voltaje aplicado depende de una manera directa de la corriente y la resistencia del medio, de esta manera, la unión de factores como la conductividad relativamente alta de la solución, distancia entre electrodos y baja agitación da naturalmente en el sistema, hacen que se disminuya la resistencia del medio y se facilite el paso de la corriente a través del mismo(Mollah, 2010).

Fig. 8. Efecto de la concentración inicial en la remoción de la DQO de las aguas residuales de las plantas queseras.



Fuente: Elaboración propia

En la figura 8 podemos ver que a una concentración de 377,00 mg/L DQO, se logra una remoción de 34,50% y a una concentración inicial de 1132,00 mg/L de DQO se remueve el 26,87%, lo que indica que en un agua residual más diluida se obtiene mayor remoción de DQO.

Tabla 7. Valor óptimo para la remoción DQO

Factor	Inferior	Mayor	Óptimo
Tiempo de residencia (min)	15	45	45
Voltaje (V)	5	10	10
Concentración inicial DQO (mg/L)	2245.23	4676.65	2245.23

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 7, se observa las condiciones óptimas para la remoción del DQO del agua residual de las plantas queseras, obtenidas a partir del análisis estadístico.

CONCLUSIONES.

El tratamiento de DBO_5 y DQO, mediante la electrocoagulación es un desarrollo viable desde el punto de vista medio ambiental, donde se obtiene una remoción del 76,25% de DBO_5 , en 45min, 10 V y una concentración inicial de 823,45mg/L de DBO_5 . De igual manera se reporta una remoción de 47,67% de DQO, en 45min, 10 V y una concentración inicial de 1068,56 mg/L de DQO.

Las aguas residuales provenientes de las plantas queseras tienen las siguientes características promedio: Temperatura 15°C; DBO_5 1650,00 mg/L; DQO 65200,00 mg/L; pH 4,22; conductividad 40,05 mS/cm; nitrógeno amoniacal 64,00 mg/L; SST 1600,00 mg/L y tds 17,36ppt.

AGRADECIMIENTO

A nuestra alma mater Universidad Nacional del Altiplano - Puno.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

- Arteaga Solórzano, R. A., Armenteros Amaya, M., Quintana García, D., & Martínez Vasallo, A. (2021). Evaluación de las buenas prácticas en la elaboración de queso artesanal en Manabí , Ecuador. *Revista de Salud Animal*, 43(2), 1–10.
- Barrenechea, A. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Coagulación. *Tratamiento de Agua Para Consumo Humano*, 153–224.
- Díaz-Cuenca, E., Alavarado-Granados, A., Camacho-Calzada, R., & Elizabeth, K. (2012). *El*

tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. 1–21.

Fernando Herrera, O. A., & Javid Corpas, E. I. (2013). REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN EN AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL LÁCTEA UTILIZANDO MICROORGANISMOS BENÉFICOS. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 11(1), 57–67.

Gonzales, S. (2012). Tecnología del Tratamiento de Aguas Residuales. *Chemistry*.

Hurley, & Masterton. (2011). Chemistry Principles and Reaction. *Saunders Golden Sunburts Series*, 498–525.

Mollah, M. (2010). Electrocoagulation (EC)- Science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 29–41.

Montgomery, D. (2010). Diseño y Análisis de Experimentos. *Ed.Iberiamerica*.

Peña, M. R., & Díaz, C. E. B. (2020). Oxidación avanzada en el tratamiento de aguas residuales. In *Tecnología del agua* (Vol. 197).

Perez Espinoza, M. J., Espinoza Carrion, C., & Peralta Mocha, B. (2016). SOCIAL EMPRESARIAL Y SU ENFOQUE AMBIENTAL: UNA VISIÓN SOSTENIBLE A FUTURO. *Revista Científica Universidad y Sociedad*, 8, 150.

Polo Campos, Á. F. (2019). Agroindustrial sustainability in the scope of the third stage of the Chavimochic project: A prospective approach. *Scientia Agropecuaria*, 10(1), 125–135.
<https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2019.01.14>

Rodríguez-Heredia, D. (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados Occupational. *Medisan*, 21(12), 3372–3385.

Rodríguez, J. A. C., & Rodríguez, S. C. B. (2021). Environmental Knowledge Management Model in Agribusiness. Case of Panelero Sector. *Revista Lasallista de Investigacion*, 18(1), 48–64. <https://doi.org/10.22507/rli.v18n1a4>

Severiche-Sierra, C. A., Gómez-Bustamante, E. M., & Jaimes-Morales, J. del C. (2016). La educación ambiental como base cultural y estrategia para el desarrollo sostenible. *Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios En Ciencias Sociales*, 18(2), 266–281.

Valdivia, A., Rubio, Y., & Beruvides, A. (2021). Calidad higiénico-sanitaria de la leche, una prioridad para los productores. *Rev. Prod. Anim.*, 33(2).

Villena Chávez, J. A. (2018). CALIDAD DEL AGUA Y DESARROLLO SOSTENIBLE. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica*, 35(2), 304–308.
<https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>

