

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Análisis del proceso combinado de coagulación
química y electrocoagulación en el tratamiento de
aguas residuales de matadero, Huancayo - 2024**

Medalid Ingrid Venturo Zuñiga

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Huancayo, 2025

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

A : Decano de la Facultad de Ingeniería
DE : Steve Dann Camargo Hinostraza
Asesor de trabajo de investigación
ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de trabajo de investigación
FECHA : 22 de Julio de 2025

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para informar que, en mi condición de asesor del trabajo de investigación:

Título:

“ANÁLISIS DEL PROCESO COMBINADO DE COAGULACIÓN QUÍMICA Y ELECTROCOAGULACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE MATADERO, HUANCAYO – 2024”

Autor:

Medalid Ingrid Venturo Zuñiga – EAP. Ingeniería Ambiental

Se procedió con la carga del documento a la plataforma “Turnitin” y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 20 % de similitud sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
Nº de palabras excluidas (**en caso de elegir “SI”**): 19 SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que el trabajo de investigación constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad Continental.

Recae toda responsabilidad del contenido del trabajo de investigación sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos conducentes a Grados y Títulos – RENATI y en la normativa de la Universidad Continental.

Atentamente,

La firma del asesor obra en el archivo original

(No se muestra en este documento por estar expuesto a publicación)

DEDICATORIA

A mi mamá Jakeline Zuñiga Miguel, cuyo apoyo incondicional ha sido el motor que me ha impulsado a alcanzar mis metas académicas, y a mis abuelos, Elías Zuñiga y Juana Miguel, cuya presencia constante y sabios consejos me han guiado en este camino. Gracias por creer en mí y por brindarme las herramientas necesarias para alcanzar el éxito.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más sincero agradecimiento al Mg. Ing. Steve Dann Camargo Hinostraza por su invaluable guía y apoyo durante la elaboración de este plan de tesis. Agradezco también a la Universidad Continental por brindarme las herramientas y el ambiente académico necesarios para llevar a cabo esta investigación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	xv
CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.....	16
1.1 Planteamiento y formulación del problema:.....	16
1.2 Formulación del problema.....	17
1.2.1 Problema General.....	17
1.2.2 Problemas específicos.....	17
1.3 Objetivos.....	17
1.3.1 Objetivo general.....	17
1.3.2 Objetivos específicos.....	17
1.4 Justificación e importancia:.....	18
1.4.1 Justificación.....	18
1.4.2 Importancia.....	19
1.5 Hipótesis y variables.....	19
1.5.1 Hipótesis General.....	19
1.5.2 Variables.....	19
1.5.3 Operacionalización de variables.....	19

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 Antecedentes del problema.....	21
2.2 Bases Teóricas	24
2.2.1 Mataderos	24
2.2.2 Etapas del proceso de la industria de los mataderos.....	24
2.2.3 Contaminación del agua por la industria de mataderos	25
2.2.4 Coagulación.....	26
2.2.5 Electrocoagulación	27
2.3 Marco conceptual	28
CAPITULO III. METODOLOGÍA.....	29
3.1 Método, tipo o alcance de la investigación.....	29
3.1.1 Método.....	29
3.1.2 Alcances de la investigación.....	29
3.1.3 Diseño de la investigación.....	29
3.2 Población y Muestra	31
3.2.1 Población	31
3.2.2 Muestra.....	31
3.3 Técnicas e instrumentos	32
3.4 Técnicas.....	32
3.5 Instrumentos	32
3.6 Procedimientos	33
3.6.1 Muestreo del agua para agua residual de camal	33
3.6.2 Preparación de la muestra.....	34
3.6.3 Variación de pH.....	34
3.6.4 Coagulación.....	34
3.6.5 Electrocoagulación	35

3.6.6	Cálculo del % de remoción.....	35
3.7	Procesamiento de la información	35
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIONES		36
4.1	Presentación de resultados.....	36
4.1.1	Parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024.	36
4.1.2	Masa de coagulante, voltaje y distancia de electrodos en la remoción de materia orgánica (DQO) en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación	36
4.1.3	Masa de coagulante, voltaje y distancia de electrodos en la remoción de materia orgánica (DBO ₅) en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación	40
4.1.4	Masa de coagulante en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga	43
4.1.5	Variación del voltaje en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga	46
4.1.6	Distancia entre los electrodos en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga.....	48
4.1.7	Estudio de isotermas de adsorción de DQO	54
4.2	Prueba de hipótesis	57
4.2.1	Prueba de normalidad	57
4.2.2	Contrastación de hipótesis para la remoción para la remoción de materia orgánica (DQO) de aguas residuales de matadero de Sapallanga	58
4.2.3	Contrastación de hipótesis para la remoción DBO ₅ para la remoción de materia orgánica (DBO ₅) de aguas residuales de matadero de Sapallanga ..	60

4.2.4	Análisis de contorno para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga	62
4.3	Discusión de resultados	66
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		70
5.1	Conclusiones.....	70
5.2	Recomendaciones	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		72
ANEXOS.....		76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Operacionalización de variables</i>	19
Tabla 2. <i>Niveles de las variables</i>	30
Tabla 3. <i>Arreglo factorial 2³</i>	30
Tabla 4. <i>Parámetros iniciales del agua</i>	36
Tabla 5. <i>Resultados de concentración final del DQO en cada tratamiento</i>	37
Tabla 6. <i>Resultados de % de remoción de DQO</i>	37
Tabla 7. <i>Resultados de concentración final del DBO₅ en cada tratamiento</i>	40
Tabla 8. <i>Resultados de % de remoción de DBO₅</i>	41
Tabla 9 <i>Parámetros obtenidos del ajuste lineal de modelos de isoterma</i>	56
Tabla 10. <i>Análisis de Varianza para la remoción de DQO</i>	58
Tabla 11. <i>Resumen del modelo</i>	59
Tabla 12. <i>Análisis de Varianza para la remoción de DBO₅</i>	60
Tabla 13. <i>Resumen del modelo</i>	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Coagulación. Tomado de Pérez y Urrea 2014 (20).....	26
Figura 2. Reactores de electrocoagulación. Obtenida de (21).....	27
Figura 3. % Concentración final de DQO	38
Figura 4. Concentración promedio final de DQO	39
Figura 5. % de Remoción de DQO para cada tratamiento	39
Figura 6. Concentración final de DBO ₅	42
Figura 7. Concentración promedio final de DBO ₅	42
Figura 8. % de Remoción de DBO ₅ para cada tratamiento	43
Figura 9. % de Remoción de DQO a 500 mg.....	43
Figura 10. % de Remoción de DQO a 1000 mg.....	44
Figura 11. % de Remoción de DBO ₅ a 500 mg.....	45
Figura 12. % de Remoción de DBO ₅ a 1000 mg.....	45
Figura 13. % de Remoción de DQO a 12 V	46
Figura 14. % de Remoción de DQO a 24 V	47
Figura 15. % de Remoción de DBO ₅ a 12 V	47
Figura 16. % de Remoción de DBO ₅ a 24 V	48
Figura 17. % de Remoción de DQO a 2 cm.....	49
Figura 18. % de Remoción de DQO a 3 cm.....	49
Figura 19. % de Remoción de DBO ₅ a 2 cm.....	50
Figura 20. % de Remoción de DBO ₅ a 3 cm.....	51
Figura 21. Efectos principales para la remoción de DQO.....	51

Figura 22. Interacción de factores para la remoción de DQO	52
Figura 23. Efectos principales para la remoción de DBO ₅	53
Figura 24. Interacción de factores para la remoción de DBO ₅	53
Figura 25. Isoterma de Freundlich.....	55
Figura 26. Isoterma de Langmuir	56
Figura 27. Gráfica de probabilidad normal para la remoción de DQO	57
Figura 28. Gráfica de probabilidad normal para la remoción de DBO ₅	58
Figura 29. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados	60
Figura 30. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados	61
Figura 31. Análisis de contorno de masa y voltaje para % de remoción de DQO	62
Figura 32. Análisis de contorno de masa y distancia para % de remoción de DQO	63
Figura 33. Análisis de contorno de voltaje y distancia para % de remoción de DQO ..	63
Figura 34. Análisis de contorno de voltaje y distancia para % de remoción de DBO ₅ .	64
Figura 35. Análisis de contorno de voltaje y masa para % de remoción de DBO ₅	65
Figura 36. Análisis de contorno de distancia y masa para % de remoción de DBO ₅	66

RESUMEN

El presente trabajo de investigación busca analizar el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para tratamiento de aguas residuales de matadero. El diseño de investigación fue experimental factorial considerando masa de coagulante de 500 y 1000 mg; voltaje de 12 y 24 V; distancia de electrodo de 2 y 3 cm, en la remoción de DQO y DBO; ajustándose al diseño factorial de 2^3 por triplicado de 24 tratamientos. Como resultado se tuvo que el agua residual de matadero presentaba 17250,3 mg/L de DQO y 8997,8 mg/L de DBO, superando ampliamente los valores máximos admisibles de DQO: 1000 mg/L y DBO: 500 mg/L. Después de la electrocoagulación, se determinó que, a mayor masa de coagulante de 1000 mg, voltaje a 24 V, distancia de electrodo a 3 cm hubo un incremento en el porcentaje de remoción de 94,64% de DBO y 94,44% de DQO. En conclusión, la mayor masa de coagulante, voltaje y distancia de electrodo favorecen la mayor remoción de la materia orgánica con la reducción de DQO y DBO, y a su vez fueron significativos en tratamiento de aguas residuales de matadero.

Palabra clave: agua de matadero, electrocoagulación, materia orgánica

ABSTRACT

The present research work seeks to analyze the combined process of chemical coagulation and electrocoagulation for the treatment of slaughterhouse wastewater. The research design was experimental factorial considering coagulant mass of 500 and 100 mg; voltage of 12 and 24 V; electrode distance of 2 and 3 cm, in the removal of COD and BOD; adjusting to the factorial design of 23 in triplicate of 24 treatments. As a result, the slaughterhouse wastewater showed 17250.3 mg/L of COD and 8997.8 mg/L of BOD, far exceeding the maximum admissible values of COD: 1000 mg/L and BOD: 500 mg/L. After electrocoagulation, it was determined that the higher the coagulant mass of 1000 mg, voltage at 24 V, electrode distance at 3 cm, there was an increase in the removal percentage of 94.64% of BOD and 94.44% of COD. In conclusion, the higher mass of coagulant, voltage and electrode distance favor the higher removal of organic matter with the reduction of COD and BOD, and in turn were significant in slaughterhouse wastewater treatment.

Keyword: slaughterhouse water, electrocoagulation, organic matter

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, con el desarrollo de la urbanización y los requisitos asociados, junto con los avances en las industrias y las crecientes demandas, se vierten contaminantes al medio ambiente que causan problemas de salud a corto o largo plazo. Entre ellas, las industrias de producción de proteínas, como los mataderos y las aguas residuales asociadas, pueden causar daños notables al medio ambiente (1). Los mataderos industriales son uno de los principales centros de productos cárnicos que producen una gran cantidad de aguas residuales con una alta carga orgánica, sangre residual, heces animales y grasas. En estas unidades, el consumo de agua por animal muerto es diferente según el animal, y el método utilizado es de 1 a 8 m³ (2). La eliminación insalubre de las aguas residuales de los mataderos puede causar graves efectos adversos en la salud pública de la región y la contaminación del suelo, el aire, los productos agrícolas y el agua. Los compuestos orgánicos en las aguas residuales generaron riesgos irreversibles para la salud pública, ya que son principalmente mutagénicos, tóxicos y disruptores endocrinos o tienen potencial cancerígeno para los seres humanos, los animales y los ambientes acuáticos. Incluso las concentraciones bajas de contaminantes orgánicos son tóxicas y peligrosas. Las características de las aguas residuales de los mataderos son diferentes, las cuales deben ser vertidas a fuentes receptoras con base en los estándares de calidad permitidos (3).

El Perú no es ajeno a esta problemática, diversos mataderos tienen indicios del mal funcionamiento del tratamiento, corroborado por visitas al área de estudio donde se evidencia la emisión de malos olores, presencia de vectores e infiltraciones (4). Por lo tanto, el objetivo de esta tesis es analizar el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024.

La tesis desarrolla 5 capítulos. En el primero, se realiza el planteamiento y formulación del problema, los objetivos, la justificación e importancia del trabajo de investigación, la hipótesis y la descripción de variables. En el segundo capítulo se trabaja el marco teórico. El tercer capítulo se ocupa de la metodología; el capítulo cuatro trata de los resultados y discusión; finalmente el capítulo cinco de las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1 Planteamiento y formulación del problema:

En la actualidad el crecimiento de la población ha llevado consigo el aumento de diversas actividades económicas las cuales debido a la falta de educación y concientización ambiental tiende a ser uno de los principales factores del deterioro de la calidad de suelo, aire y agua (5).

Una de estas actividades es la de beneficio animal, es decir los mataderos municipales, clandestinos entre otros los cuales no solo generan problemas ambientales sino también sociales y económicos por lo cual es motivo necesario de estudio (6).

La función principal de esta actividad es el sacrificio de diferentes animales, teniendo como procesos el sacrificio, sangrado, evisceración, refrigeración y sus respectivos subproductos. Es por ello que las aguas residuales generadas por estos procesos llegan a tener valores altos en concentración de turbidez, fosfatos; DQO; DBO₅ y la carga bacteriana (6), las cuales al ser vertidas sin previo tratamiento en los cuerpos receptores está asociado a la aparición del fenómeno de eutrofización el cual afecta al ecosistema acuático y puede ser puntos de infección que llegue afectar a animales y familias cercanas al lugar.

Debido a lo mencionado anteriormente muchos trabajos de investigación señalan diferentes alternativas de tratamiento desde el proceso fisicoquímico, biológico y hasta electroquímicos, pero muchos de estos llevan una alta inversión y costo de operación sin tener porcentajes de remoción adecuadas como para poder cumplir con los LMP que les impone el estado en el Decreto Supremo N°010-2019-VIVIENDA.

Dado a ello es que el presente trabajo busca combinar dos procesos como es la coagulación química la cual es de bajo costo y simplicidad con la electrocoagulación para así poder obtener mejores resultados y cumplir con los LMP.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema General

¿Cuál es el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuáles son los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024?
- ¿Cuál es la masa de coagulante en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024?
- ¿Cuál es la variación del voltaje en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024?
- ¿Cuál es la distancia entre los electrodos en la coagulación química y electrocoagulación como proceso combinado para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024.
- Determinar la masa de coagulante en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024.

- Determinar la variación del voltaje en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024.
- Determinar la distancia entre los electrodos en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024.

1.4 Justificación e importancia:

1.4.1 Justificación

A nivel nacional se considera un problema grave las aguas residuales de matadero debido a que la mayoría de estas no cuenta con un tratamiento previo a su vertimiento en alcantarillados y/o cuerpos receptores ocasionando así problemas en el medio ambiente y hasta en la salud de la población que pueda tener contacto directo con estas, pues son efluentes con alta carga de DQO, DBO₅, turbiedad y bacteriológica(5). Dado a ello es que se busca el proceso de tratamiento adecuado para estas aguas como la coagulación química la cual se usa para limpiar el agua de partículas suspendidas debido al uso de químicos que ayudan a agrupar los sólidos suspendidos que contiene el agua acelerando el proceso de sedimentación, disminuyendo así la carga bacteriana, el color y el sabor, otro método que se resalta es la electrocoagulación la cual es una técnica que toma como ayuda la corriente eléctrica a través de materiales conductores con la finalidad de remover contaminantes como materia orgánica.(7)

Es por ello que se toma ambos métodos en este caso de estudio para poder combinarlos y de esta manera tener mejores resultados en tratamiento pues se sabe que la electrocoagulación tiene mayor eficiencia de remoción de DQO comparada con la coagulación química, pero si se usan ambos procedimientos a la par el porcentaje de remoción que se puede lograr obtener es mayor al 90%. (8). Con lo cual lograremos que estas aguas residuales se encuentren dentro de LMP y eviten afectar en el ambiente y salud a la hora de su vertimiento.

1.4.2 Importancia

La investigación es de suma importancia porque se brinda una propuesta de tratamiento combinado la cual dará resultados con mayor eficiencia a los convencionales que será de utilidad para futuras investigación y/o empresas que quieran dar uso a este proceso para el tratamiento de sus aguas residuales.

1.5 Hipótesis y variables

1.5.1 Hipótesis General

Ho: El proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024, no es significativo.

Ha: El proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024, es significativo.

1.5.2 Variables

- a. Variable independiente:
 - Masa de coagulante
 - Voltaje
 - Distancia de electrodos
- b. Variable dependiente:
 - Materia Orgánica

1.5.3 Operacionalización de variables

Tabla 1. *Operacionalización de variables*

Variables	Dimensiones	Indicadores	Unidad de medida
Variables Independientes			

Masa de coagulante	Cantidad del coagulante	Miligramos	mg
Voltaje	Voltaje	Volteos	V
Distancia de electrodos	Distancia entre electrodos	Centímetros	cm
Variable Dependiente			
Materia Orgánica	Remoción de materia orgánica	Porcentaje de remoción de DQO y DBO ₅	%

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del problema

Según Zarei, et al. en el estudio tuvieron como objetivo principal el determinar la eficiencia de del proceso de electrocoagulación utilizando electrodos de cobre en la desinfección de aguas residuales de mataderos avícolas, para ello en la parte experimental se expuso al agua residual a electrocoagulación con electrodos de cobre en diferentes potencias de 10 V, 20 V y 30 V durante un periodo de 60 min. Después de ello se examinó la eficiencia del proceso analizando los coliformes totales. Dando así resultados de que la máxima eficiencia de remoción de coliformes totales fue del 100% en diferencia de potencial, igual a 30 V en el tiempo de reacción de 10 min. (9)

Según Ali, et al. en el estudio tuvieron como objetivo principal evaluar la eficiencia del tratamiento del proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación en las aguas residuales con tintes producidos sintéticamente, teniendo como parámetros de calidad de agua el DQO, TDS y EC. Por lo tanto, esta opción de tratamiento mejorará la eficiencia general del agua en la industria textil. se observó una disminución en los valores de pH después del tratamiento; sin embargo, se observó una tendencia creciente en los casos de DQO, TDS y EC. Por lo tanto, esta opción de tratamiento mejorará la eficiencia general del agua en la industria textil. este estudio concluye que el tratamiento combinado de química y electrocoagulación es muy eficiente para decolorar las aguas residuales de tinte. (10)

Según Gökçek , et al. en el estudio tuvieron como objetivo principal el optimizar el proceso de coagulación-floculación examinando los efectos de los factores experimentales entre sí como, el pH, la concentración de dos coagulantes diferente (cloruro de hierro y alumbre), velocidad de mezcla rápida y tiempo de sedimentación. Usando como fuente a tratar el agua residual de matadero y como metodología la superficie de respuesta siendo sus variables dependientes el DQO, turbidez y sólidos suspendidos. Dando así resultados el mejor coagulante es el alumbre y sus condiciones óptimas son pH de 6,5, la concentración de alumbre de

1000 mg/L, la velocidad de mezcla rápida de 150 rpm y el tiempo de sedimentación de 10 min. Así mismo el porcentaje de remoción obtenido para el DQO, SS y turbidez fue 75,25%; 90,16 % y 91,18%, respectivamente. (11)

Según Nugroho et al. en su estudio evaluaron el utilizar la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de mataderos y para ello lo que realizó en la parte experimental es que se neutralizo el agua agregando hidróxido de calcio y varió las corrientes en 933 mA/dm² y 1400 mA/dm², así mismo se configuro los electrodos en 3 ánodos, 3 cátodos y 4 ánodos, 2 cátodos. Dando así resultados de que la densidad de corriente de 1400 mA/dm² y la configuración de electrodos de 4 ánodos-2 cátodos redujo la DBO en un 56,4 %, los TDS en un 20,25 % y los TSS en un 99,47 %. (12)

Según Vutivi et al. en su estudio tuvo como principal objetivo estudiar la a viabilidad de la técnica de electrocoagulación en la eliminación de la demanda química de oxígeno (DQO) y grasas, aceites y grasas utilizando electrodos de hierro en aguas residuales de matadero de aves. Para ello las variables que se usaron fueron o densidad de corriente, pH, tiempo de reacción y Ecoflush™ (con o sin), realizándose así 40 corridas. Dando resultados que las mejores condiciones son pH de 3,0 y 74 minutos de tiempo de tratamiento y sin Ecoflush™, con un porcentaje de reducción del DQO al 92,4 % y aceites y grasas al 99 %. (13)

Según Reilly et al. en su estudio evaluaron como objetivo principal el realizar una revisión del proceso de electrocoagulación del procesamiento de lácteos y aguas residuales de mataderos. Demostrándonos que la electrocoagulación tiene un buen potencial para su uso en el tratamiento de efluentes de aguas residuales de procesamiento de lácteos y de la industria cárnica de mataderos. Por lo general, los investigadores han podido eliminar más del 75 % de la DQO de los efluentes de desechos lácteos y cárnicos al usar electrodos de Al y Fe en lote durante menos de 1 hora. (14)

Según Akarsu et al. desarrollaron un estudio con el objetivo principal de investigar el método de electrocoagulación-electroflotación para la eliminación simultánea de la demanda química de oxígeno, el fósforo total, el nitrógeno Kjeldahl total y el color a través de la metodología de superficie de respuesta. Para ello se tomaron

factores como la combinación de electrodos (Fe y Al), densidad de corriente 10 mA/cm² y 20 mA/cm², pH de 3 a 9 y distancia de electrodos de 1 cm a 3 cm. Se determinó que la demanda química de oxígeno, el nitrógeno Kjeldahl total, el fósforo total y la remoción de color alcanzaron hasta 94,0%, 77,5%, 97,0% y 99,0%, respectivamente. (15)

Según Nuqman et al. en el estudio con el objetivo principal de realizar el estudio del proceso de electrocoagulación en aguas residuales de matadero para se realizaron pruebas experimentales donde se determinó que bajo el conjunto de electrodos Zn-Zn, 24 V, 6 min de tiempo de operación y distancia entre electrodos a 1 cm indicada como (a) parámetro condicional, donde el porcentaje de remoción y remoción de DQO de esta condición de parámetro ha mostrado la valor más alto (81,48% y 91,30% respectivamente) en comparación con otros. (16)

Según Al-Qodah et al. en el estudio el objetivo principal fue realizar una revisión de los enfoques nuevos que utiliza la integración de la electrocoagulación con uno o más tratamientos como adsorción, coagulación química, magnético campo, ósmosis inversa y filtración por membrana, demostrando así que el proceso combinado tiene hasta un 20% más de eficiencia de eliminación en comparación con electrocoagulación sola. Además, se menciona que la mayoría de los estudios realizados utilizaron los electrodos convencionales de Al y Fe. A pesar de que el desempeño de los electrodos de Al mostró una mayor eficiencia de eliminación en muchos casos en comparación con los electrodos de Fe. (17)

Según Araujo et al. en su estudio tuvieron como principal objetivo el desarrollar un proceso de tratamiento combinado para tratar aguas de camal, para ello se uso un coagulante de polímero de aluminio y un reactor acrílico de 6 electrodos de dimensiones de 10 cm x 10 cm y la distancia entre ellos de 1 cm , realizándose de esta manera 9 corridas donde se obtuvo resultados de condiciones óptimas de concentración de coagulante 261,4 ppm, tiempo de agitación 25 minutos, en la coagulación química; caída de tensión 12 Voltios y tiempo de reacción 30 minutos en la electrocoagulación. Y un porcentaje de remoción de 78.5% (296,3 mg/L) DQO, 79.04% (134,3 mg/L) DBO₅ y 51.31% (40,9 mg/L) TSS. (18)

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Mataderos

Los mataderos o industrias del camal son el conjunto de operaciones mecánicas, físicas y entre otras, que tienen por finalidad transformar animales sanos en carne y productos cárneos comestibles de calidad, tal que satisfagan exigencias y preferencias del consumidor. Se puede clasificar como una industria de proceso con la particularidad de predominar las operaciones de desarme de la materia prima en partes distintas acompañadas en mayor o menor grado por reducciones de tamaño, por lo tanto, se trata principalmente de trabajar con materia orgánica que va a servir de alimento a seres vivos. Esta industria está asociada a una alta carga de materia orgánica (5).

2.2.2 Etapas del proceso de la industria de los mataderos

Las etapas de los mataderos son (19):

- **Inspección ante-mortem:** Luego del arribo de los animales al camal, éstos pasan a los corrales en los que el médico veterinario realiza la verificación sanitaria previa al sacrificio, para lo cual los animales deben tener las siguientes características sostenerse en sus cuatro miembros mientras se encuentre parado, caminar normalmente, piel elástica y suave, respirar 10 veces/min - 20 veces/min, fosas nasales húmedas y frescas, pulso de 80 latidos/min - 90 latidos/min y una temperatura corporal entre 35 °C - 40 °C.
- **Baño de los animales aptos:** La importancia sanitaria del bañado de los animales antes del sacrificio, radica en la eliminación o reducción de la suciedad presente en el cuero de los mismos evitando que al momento del sacrificio, exista una contaminación excesiva en el lugar de trabajo y la sangre para consumo humano.
- **Noqueo o aturdimiento:** El animal pasa a la caja de insensibilización, mediante una rampa de conducción, donde se realiza el proceso de aturdimiento, que consiste en ocasionar la pérdida del conocimiento de los animales antes de ser desangrados.

- **Izado:** Se realiza colocando un grillete en la pata izquierda y elevando el conjunto, con la ayuda de un diferencial, que consiste en una grúa que es accionada eléctricamente a fin de elevar el animal hasta enganchar el grillete de sangría en el respectivo riel.
- **Desangrado:** Una vez aturdido e izado el animal, se procede a realizar un desangrado lo más completo posible, en un lapso de 3 min a 5 min, procedimiento que se hace mediante el corte de las arterias carótidas y la vena yugular en la base del cuello.
 - **Remoción de cabeza:** Esta labor se efectúa manualmente con la ayuda de un cuchillo.
- **Corte de patas:** Con un cuchillo se separan las patas, éstas son colocadas en su área respectiva y al igual que la cabeza, se asegura su identificación.
- **Desollado:** Se desprende la piel que se encuentra adherida a lo largo de las regiones ventral y dorsal. La piel se retira en su totalidad con la ayuda de procedimientos mecánicos o manualmente con cuchillos.
- **Apertura de la cavidad abdominal y esternón:** Con un hacha se hace incisión en la línea blanca del pecho y se introduce una sierra eléctrica, para cortar los huesos del esternón.
- **Retiro de vísceras:** Se trata de separar del animal los órganos genitales, las vísceras blancas y rojas
- **Aserrado de la canal:** Separadas las vísceras, se procede a practicar la división de la canal en dos mitades o medias canales. Esta labor se efectúa con la ayuda de una sierra eléctrica.

2.2.3 Contaminación del agua por la industria de mataderos

Los mataderos para sus procesos de limpieza y faenamiento se requieren grandes volúmenes de agua, esto ocasiona a su vez que se produzcan en cantidad descargas de agua residual, presentando elevadas concentraciones de:

- Materia orgánica las cuales contienen grasa, proteína y celulosa, expresadas en DQO y DBO, la cual varía dependiendo la cantidad de animales sacrificados en el día.

- Además, contiene gran cantidad de nutrientes provenientes de la sangre propia de la matanza de ganado asimismo con un contenido importante de sólidos en suspensión, grasas y aceites (5).

2.2.4 Coagulación

La coagulación es el proceso de desestabilización y posterior agregación de partículas en suspensión coloidal presentes en el agua, para potenciar la etapa de decantación o espesado en la que esas partículas deben separarse del agua. Y su objetivo principal como proceso previo a la decantación es cambiar las propiedades de los elementos insolubles de modo que sean más fácilmente propiedades de los elementos insolubles, de modo que sean más fácilmente separables (20).



Figura 1. Coagulación. Tomado de Pérez y Urrea 2014 (20).

Factores que influyen en el proceso

- Tipo y cantidad de coagulante: la cantidad exacta se debe determinar mediante ensayos para evitar sobredosificaciones que rompan la adsorción superficial.
- pH del agua: Para cada coagulante, existe una zona de pH donde se produce una buena floculación en plazo corto y con una dosis dada de coagulante
- Tiempo de mezclado y floculación: Es el tiempo transcurrido entre la adición de coagulante y el final de la agitación
- Temperatura del agua: La temperatura influye en el tiempo requerido para la formación de coágulos.

2.2.5 Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso que utiliza la electricidad para eliminar contaminantes en el agua que se encuentran suspendidos, disueltos o emulsificadas. Esta técnica consiste en inducir corriente eléctrica en el agua residual a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, dentro de los más comúnmente están el hierro y el aluminio. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los contaminantes se encuentran presentes forman agregados, produciendo partículas sólidas que son menos coloidales y menos emulsificadas que en estado de equilibrio. Y es así que los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y se pueden remover fácilmente por algún método de separación de tipo secundario (21).

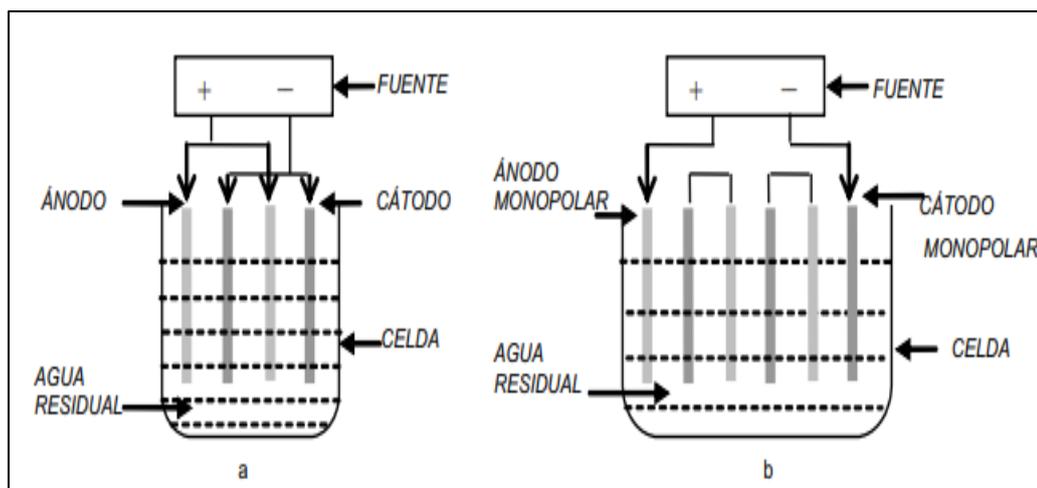


Figura 2. Reactores de electrocoagulación. Obtenida de (21)

Factores que afectan de electrocoagulación

- Densidad de corriente: El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o hierro Fe^{+2} liberados por los respectivos electrodos. Una densidad de corriente demasiado grande produciría una disminución significativa en la eficacia.
- Presencia de NaCl: La sal aumenta la conductividad del agua residual por lo que se recomienda que se mantenga en cantidades del 20%.

- **pH:** El efecto del pH en la electrocoagulación se refleja en la eficiencia de la corriente y se relaciona con la disolución del hidróxido del metal y la mejor remoción se ha observado para valores de pH cercanos a 7. No obstante a pH neutral el consumo de energía es alto.

2.3 Marco conceptual

- a. Camal o matadero:** Son establecimientos en los que se da el sacrificio de animales a través de la manipulación de quipos mecánicos adecuados y la preparación del subproducto no comestibles.
- b. Aguas residuales industriales:** Están constituidas por los desechos líquidos provenientes de fábricas o empresas que producen cualquier tipo de material o artículo que se ofrece a la población.
- c. Electrocoagulación:** Procedimiento que usa una corriente eléctrica para desestabilizar los contaminantes del agua por la acción de electrodos de metal que generalmente son de aluminio y hierro.
- d. Coagulación:** Proceso mediante el cual se naturaliza los sólidos suspendidos cargados en el agua y forma una masa gelatinosa que atrapa partículas aumentando su tamaño de modo que pueda sedimentarse.
- e. DQO:** La demanda química de oxígeno es un parámetro que se utiliza para estimar la contaminación orgánica del agua.
- f. DBO₅:** Es una estimación de la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea para oxidar la materia orgánica de una muestra de agua durante un periodo de cinco días

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 Método, tipo o alcance de la investigación

3.1.1 Método

El método de investigación fue el método científico, que integra los pasos ordenados y más para lograr el conocimiento científico (22). En el método específico fue el hipotético-deductivo, el cual se caracteriza por partir de principios generales para abordar situaciones particulares. Este enfoque permite la formulación de hipótesis que se comprueban mediante experimentos, asegurando que los principios generales, los hechos específicos y los resultados obtenidos estén alineados y respalden la validez de las conclusiones (22).

3.1.2 Alcances de la investigación

a. Tipo de investigación

El tipo de investigación fue aplicada debido a que busca la solución práctica de un determinado problema como es en este caso el tratamiento de las aguas residuales de matadero mediante un procedimiento combinado de coagulación química y electrocoagulación (22, 23).

b. Nivel de investigación

El nivel de la investigación fue explicativo, que se sustenta en problemas bien formulados y tiene la finalidad de buscar la relación de causa-efecto. Se sustenta hipótesis, que explican el resultado del efecto de las variables manipuladas en la variable dependiente (22).

3.1.3 Diseño de la investigación

El diseño de la investigación fue el experimental junto con un diseño experimental factorial con un arreglo factorial de 2^3 ya que consta de dos niveles y 3 variables, presentados en la tabla 2. Así mismo se trabajó un total de 3 réplicas por lo que se obtuvo un total de 24 corridas experimentales. En este diseño se manipulan y se prueban tratamientos, así como los estímulos e influencias de las variables

independientes en condiciones rigurosamente controladas para observar las consecuencias sobre las otras variables que son las dependientes (22).

Tabla 2. Niveles de las variables

	Bajo (-)	Alto (+)
Masa de coagulante (mg)	500	1000
Voltaje (V)	12	24
Distancia de electrodos (cm)	2	3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Arreglo factorial 2^3

Masa de coagulante (mg)	Voltaje (V)	Distancia de electrodos (cm)	DQO			DBO ₅			Promedio de DQO	Promedio de DBO ₅
			R1	R2	R3	R1	R2	R3		
500	12	2	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DQO	Cf_DBO ₅
		3	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DQO	Cf_DBO ₅
	24	2	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DQO	Cf_DBO ₅
		3	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DQO	Cf_DBO ₅
	12	2	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DQO	Cf_DBO ₅
		3	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DQO	Cf_DBO ₅
1000	24	2	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DQO	Cf_DBO ₅
		3	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DQO	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DBO ₅	Cf_DQO	Cf_DBO ₅

Nota. Esta tabla muestra los arreglos del diseño factorial en función a las 3 variables independientes y la variable dependiente.

3.2 Población y Muestra

3.2.1 Población

La población estuvo compuesta por todas las aguas residuales del matadero de Sapallanga

3.2.2 Muestra

Es la parte seleccionada de la población para su estudio, al cual se medirá y se observará. Se aplicó la fórmula propuesta para la determinación de la muestra de una población infinita:

$$n = \frac{n_o}{1 + \frac{n_o}{N}} \quad (1)$$

$$n_o = \frac{Z_{\alpha}^2 \times \sigma^2}{E^2} = \frac{Z_{\alpha}^2 \times P \times Q}{E^2} \quad (2)$$

Dónde:

n : Tamaño de la muestra.

n_o : Tamaño de la muestra aproximado.

N : Población infinita.

Z_{σ} : Valores respecto al valor de significancia para un 95 %.

E : Error de la investigación.

P : probabilidad (0,993)

Q : 1-P (0,007)

Para el cálculo del valor de significancia z , se halla el valor normal para $\alpha = 0,05$

$$V_N = \left(1 - \frac{\alpha}{2}\right)$$

$$V_N = \left(1 - \frac{0,05}{2}\right) = 0,975$$

Se obtiene el valor de $Z = 1,96$ de tablas de distribución.

Reemplazando se tiene:

$$n_o = \frac{(1,96)^2 * 0,993 * 0,007}{0,0052^2}$$

$$n_o \cong 997.53 \text{ mL}$$

Luego en (1):

$$n = \frac{n_o}{1 + \frac{n_o}{N}}$$

Como se tiene una población infinita, la expresión $\frac{n_o}{N}$ tiende a ser cero, por lo tanto:

$$n = n_o$$

$$n \approx 997.53 = 1000 \text{ mL}$$

Por lo tanto, se la muestra de agua residual del camal que se trabajará será de 1000 ml para cada corrida experimental.

3.3 Técnicas e instrumentos

3.4 Técnicas

- Se realizó el muestreo de aguas residuales
- Se realizó los análisis fisicoquímicos de laboratorio.

3.5 Instrumentos

Los instrumentos de investigación que se utilizaron en el estudio fueron:

- Hojas de campo para monitoreo
- Reportes de laboratorio con respecto a los análisis necesarios.
- Resúmenes de los trabajos de investigación.

3.6 Procedimientos

3.6.1 Muestreo del agua para agua residual de camal

Para la toma de muestra se ha seguido los pasos realizados en el antecedente (18).

a) Antes de la toma de muestra (*ver Anexo 2*)

- Se contó con los equipos de protección personal para el respectivo muestreo (guardapolvo, guantes de látex, cofia, mascarilla).
- Se contó con una cadena de custodia para anotar datos de campo.
- El frasco para la caracterización estuvo rotulado especificando el lugar, fecha y hora de toma de muestra, y se cubrió el rótulo con cinta adhesiva transparente.

b) Durante la toma de muestra (*ver Anexo 2*)

- Se tomaron las coordenadas del punto de monitoreo con ayuda del GPS y se anotaron en la cadena de custodia.
- Se colocaron los equipos de protección personal.
- Se tomó una muestra para medir los parámetros de campo.
- Para la toma de muestra, se colocó el frasco en el brazo muestreador, se aseguró y se retiraron la tapa y contratapa sin tocar la superficie interna del frasco.
- Se sumergió el frasco y se enjuagó 2 veces.
- Se sumergió el frasco hasta 20 cm – 30 cm de profundidad y se tomó la muestra.
- Se colocaron los frascos sellados en el cooler con los refrigerantes a 5°C mientras duró el muestreo y el transporte al laboratorio.
- Así mismo, para las corridas experimentales, se tomó una muestra total de 20 L.

c) Después de la toma de muestra

- Finalmente, se revisó si las muestras están correctamente para el transporte al laboratorio. Las muestras fueron llevadas al laboratorio lo más antes posible después de recolectadas.

3.6.2 Preparación de la muestra

El proceso experimental del cual se basó la presente investigación fue (15) y (11) (ver Anexo 3):

- a) Los experimentos se realizaron en un vaso de precipitación de 2000 mL con un volumen de muestra de 1000 mL

3.6.3 Variación de pH

- a) Se realizó la modificación del pH a 6,5 con ayuda de NaOH y/o HCl ((ver Anexo 3).

Para alcalinizar el pH: Hidróxido de sodio 1M. La cantidad a preparar será:

$$W = M(\overline{PM} * V)$$
$$W = 1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} \left(39,98 \frac{\text{g}}{\text{mol}} * 0,1\text{L} \right)$$

$$W = 4 \text{ g de NaOH}$$

Se hizo uso de 4 g de NaOH (1M) en 100 mL de agua destilada

Para acidificar el pH: Ácido clorhídrico 1M. La cantidad a preparar fue:

$$\frac{v^2 * M * \overline{PM}}{\% \frac{p}{p} * \rho}$$
$$V = \frac{100^2 \text{mL} * 1 \frac{\text{mol}}{\text{L}} * 36,5 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{37 * 1119 \frac{\text{g}}{\text{L}}}$$
$$V = 8,82 \text{ mL de HCl}$$

Se hizo uso de 8,82 mL de HCl (1M) en 100 mL de agua destilada.

3.6.4 Coagulación

Para la coagulación se consideró los siguientes pasos (ver Anexo 3)

- a) Se agregó las diferentes masas de coagulante que será el alumbre en 500 mg y 1000 mg por litro de agua residual de matadero a tratar.
- b) Seguidamente se pasó a poner a un test de jarras y se puso a agitación rápida de 150 RPM por 1 min y 45 RPM por 10 min.

- c) Finalmente se dejó en sedimentación por una hora y se retiró el sobrenadante a un vaso de precipitación de litro.

3.6.5 Electrocoagulación

Para la electrocoagulación se consideró los siguientes pasos (*ver Anexo 3*)

- a) Los electrodos de aluminio y hierro fueron sumergidos en una solución ácida durante 5 minutos y se lavaron con agua destilada para eliminar las impurezas superficiales.
- b) Se usó un vaso de precipitación de 1L, se adicionó el agua del proceso de coagulación y se colocaron los electrodos a las distancias de 2 cm y 3 cm.
- c) Seguidamente, se conectaron a la fuente de poder a los diferentes voltajes de 12 V y 24 V, durante un tiempo de trabajo de 60 minutos.
- d) Pasado el tiempo, se retiró con ayuda de una espátula la espuma sobrenadante y se procedió a sacar las muestras para sus análisis respectivos.
- e) Estas muestras fueron almacenadas en botellas de 250 mL y enviadas al laboratorio.

3.6.6 Cálculo del % de remoción

El porcentaje de remoción de DQO y DBO₅ (%) se midió utilizando la ecuación:

$$\text{Eficiencia \%} = \frac{C_i - C_e}{C_i} * 100$$

Donde:

C_i : Concentración inicial de DQO o DBO₅

C_e : Concentración final de DQO o DBO₅

3.7 Procesamiento de la información

Para la comprobación de la hipótesis general en el trabajo de investigación, se empleó una prueba de normalidad con el fin de determinar la distribución de los datos obtenidos. Posteriormente, se realizó un análisis de varianza ANOVA mediante el software Minitab versión 18, ya que se analizó la interacción de las variables independientes manipuladas. Las gráficas y diagramas de la parte descriptiva fueron elaborados con RStudio.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Presentación de resultados

Después del trabajo de campo realizado se obtuvieron los siguientes resultados.

4.1.1 Parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024.

Tabla 4. *Parámetros iniciales del agua*

Parámetro	Valor y unidad
pH	7,6
Temperatura	17,8 °C
Conductividad	7700 μ S/m
SDT	840 mg/L
DQO	17250,3 mg/L
DBO	8997,8 mg/L

En la **Tabla 4**, se observa la concentración de sólidos totales disueltos (SDT) 840 mg/L y un valor elevado concentración de la demanda química de oxígeno (DQO) del 17250,3 mg/L, esta concentración de DQO supera lo establecido según el Reglamento de Valores Máximos Admisibles (VMA) para las descargas de aguas residuales no domésticas en el sistema de alcantarillado sanitario D. S. N° 010-2019-VIVIENDA de 1000 mg/L; además la DBO (8997,8 mg/L) supera el VMA (500 mg/L).

4.1.2 Masa de coagulante, voltaje y distancia de electrodos en la remoción de materia orgánica (DQO) en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación

Las concentraciones iniciales del DQO del agua para los tratamientos en las tres réplicas fueron de 17250,3, 18051,6 y 18098 mg/L. En los tratamientos (**Tabla**

5), se evaluaron las variables, masa de coagulante, voltaje y distancia de electrodos en la remoción de DQO.

Tabla 5. Resultados de concentración final del DQO en cada tratamiento

N ^o	Masa de coagulante (mg)	Voltaje (V)	Distancia de electrodos (cm)	DQO (mg/L)			Promedio
				Replica I	Replica II	Replica III	
1	500	12	2	4072,2	4167,9	4203,6	4147,90
2	500	12	3	2882,4	2904,8	2951,1	2912,77
3	500	24	2	3267,5	3304,3	3355,8	3309,20
4	500	24	3	2287,8	2308,2	2299,9	2298,63
5	1000	12	2	1456,8	1566,8	1592,5	1538,70
6	1000	12	3	1257,9	1353,1	1401,1	1337,37
7	1000	24	2	1858,5	1900,2	1969,3	1909,33
8	1000	24	3	1001,7	998,5	1015,5	1005,23

En la **Tabla 5** se muestra las concentraciones finales de DQO en cada tratamiento y sus réplicas; con concentración mínima de DQO reportada en las tres réplicas del tratamiento 8, en promedio de 1005,23 mg/L; mientras que, la concentración final más alta de DQO fue reportada en las tres réplicas del tratamiento N° 1 de 4147,90 mg/L en promedio.

Para el cálculo del porcentaje de remoción del DQO presentado en la Tabla 6, se empleó la ecuación del ítem 3.6.6. Por ejemplo, para el primer tratamiento y replica I en la remoción de DQO, de la Tabla 6, fue calculado de la siguiente manera:

$$\% \text{ Remocion} = \frac{17250,3 - 4072,2}{4072,2} \times 100 = 76,39\%$$

Tabla 6. Resultados de % de remoción de DQO

N ^o	Masa de coagulante (mg)	Voltaje (V)	Distancia de electrodos (cm)	% de remoción de DQO			Promedio (% remoción)
				Replica I	Replica II	Replica III	
1	500	12	2	76,39	76,91	77,87	77,06

2	500	12	3	83,29	83,91	84,46	83,89
3	500	24	2	81,06	81,70	82,33	81,69
4	500	24	3	86,74	87,21	87,89	87,28
5	1000	12	2	91,55	91,32	91,61	91,50
6	1000	12	3	92,71	92,50	92,62	92,61
7	1000	24	2	89,23	89,47	89,63	89,44
8	1000	24	3	76,39	94,47	94,65	94,44

En la **Tabla 6** se muestra los resultados de % de remoción de DQO; donde la mínima remoción de DQO obtenida en promedio fue de 77,06% en el tratamiento N° 1, lograda una masa de coagulante de 500 mg, voltaje de 12 y distancia de electrodos de 2 cm; mientras que, la máxima remoción de DQO fue en promedio de 94,44% obtenida en el tratamiento N° 8, obtenida con masa de coagulante de 1000 mg, voltaje de 24 y distancia de electrodos de 3 cm.

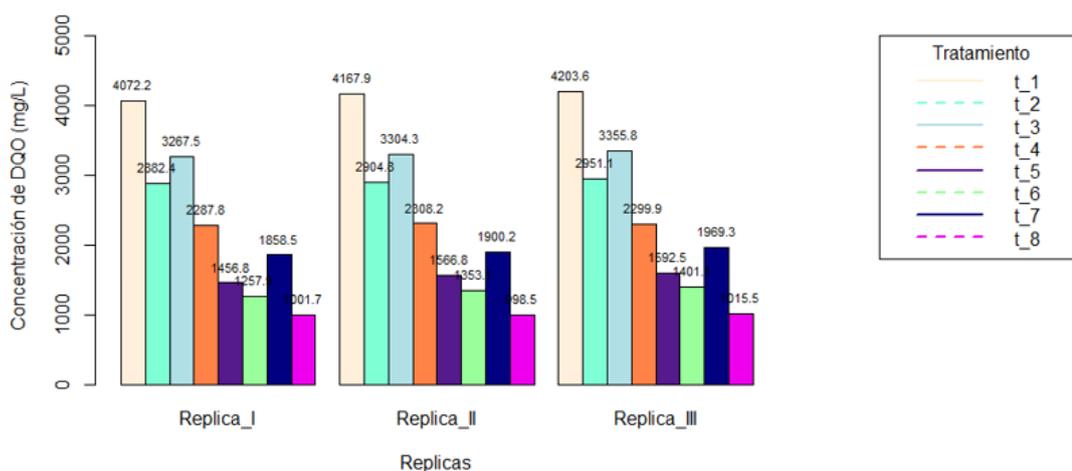


Figura 3. % Concentración final de DQO

En la **Figura 3**, se detalla la concentración final de DQO en cada tratamiento de las tres réplicas, donde se muestra claramente que la concentración final más alta de DQO en la réplica I, fue en el tratamiento 1 (4072,2 mg/L); en la réplica II, fue en el tratamiento 1 (4167,9 mg/L); y en la réplica III, fue en el tratamiento 1 (4203,6 mg/L). Además, la concentración final más baja de DQO en la réplica I, fue en el tratamiento 8 (1001,7 mg/L); en la réplica II, fue en el tratamiento 8 (998,5 mg/L); y en la réplica III, fue en el tratamiento 8 (1015,5 mg/L).

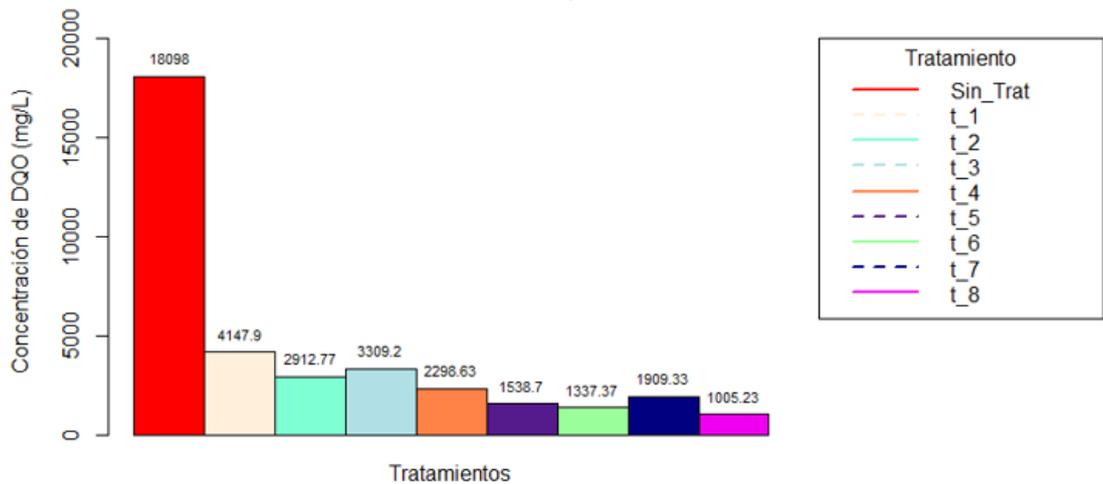


Figura 4. Concentración promedio final de DQO

En la **Figura 4**, se detalla la concentración promedio final de DQO en cada tratamiento, donde se muestra claramente que la concentración promedio final más alta de DQO fue 4147,9 mg/L en el tratamiento 1 (masa de coagulante: 500 mg, voltaje: 12 V, distancia de electrodos: 2 cm). Además, la concentración promedio final más baja de DQO en fue 1005,23 mg/L en el tratamiento 8 (masa de coagulante: 1000 mg, voltaje: 24 V, distancia de electrodos: 3 cm).

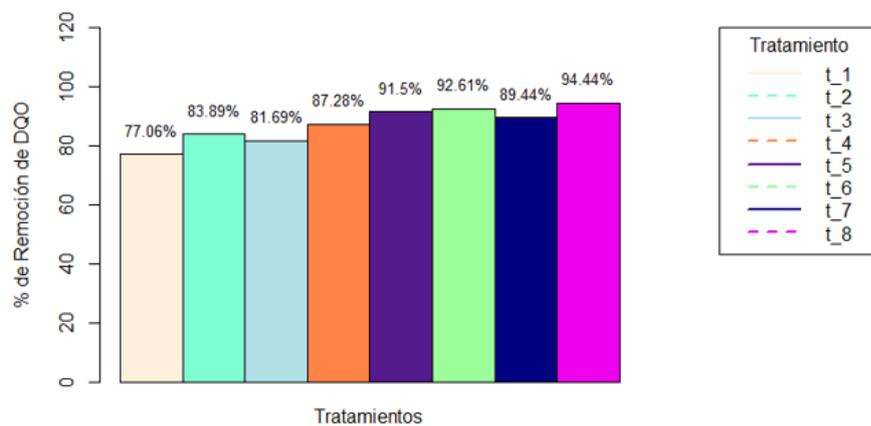


Figura 5. % de Remoción de DQO para cada tratamiento

En la **Figura 5**, se muestra el % promedio de Remoción de DQO de cada tratamiento, donde se observa el máximo % de remoción de DQO en el tratamiento 8 con 94,44% logrado con una masa de coagulante de 1000 mg, voltaje de 24 V y distancia de electrodos de 3 cm. Mientras que el mínimo % de remoción de DQO fue de 77,06 % en el tratamiento 1 con una masa de coagulante de 500 mg, voltaje de 12 V y distancia de electrodos de 2 cm.

4.1.3 Masa de coagulante, voltaje y distancia de electrodos en la remoción de materia orgánica (DBO₅) en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación

Las concentraciones iniciales del DBO del agua para los tratamientos en las tres réplicas fueron de 17250,3, 18051,6 y 18098 mg/L. En los tratamientos (**Tabla 5**), se evaluaron las variables, masa de coagulante, voltaje y distancia de electrodos en la remoción de DBO.

Tabla 7. Resultados de concentración final del DBO₅ en cada tratamiento

N°	Masa (mg)	Voltaje (V)	Distancia (cm)	DBO (mg/L)			Promedio
				Replica I	Replica II	Replica III	
1	500	12	2	2051,7	2004,9	2118,8	2058,47
2	500	12	3	1409,2	1455,5	1447,2	1437,30
3	500	24	2	1653,6	1699,1	1611,5	1654,73
4	500	24	3	1153,4	1137,6	1174,8	1155,27
5	1000	12	2	729,8	788,2	801,1	773,05
6	1000	12	3	629,7	688,2	689,4	669,10
7	1000	24	2	923,4	959,4	999,2	960,67
8	1000	24	3	495,8	503,3	517,9	505,67

En la **Tabla 7** se muestra las concentraciones finales de DBO₅ en cada tratamiento y sus réplicas; con concentración mínima final de DBO reportada en las tres réplicas del tratamiento 8, en promedio de 505,67 mg/L; mientras que, la concentración final más alta de DBO fue reportada en las tres réplicas del tratamiento N° 1 de 2058,47 mg/L en promedio.

Tabla 8. Resultados de % de remoción de DBO₅

N°	Masa (mg)	Voltaje (V)	Distancia (cm)	% de remoción de DBO ₅			Promedio (% remoción)
				Replica I	Replica II	Replica III	
1	500	12	2	77,20	78,66	78,65	78,17
2	500	12	3	84,34	84,51	85,42	84,75
3	500	24	2	81,62	81,92	83,76	82,43
4	500	24	3	87,18	87,89	88,16	87,75
5	1000	12	2	91,89	91,61	91,93	91,81
6	1000	12	3	93,00	92,67	93,05	92,91
7	1000	24	2	89,74	89,79	89,93	89,82
8	1000	24	3	94,49	94,64	94,78	94,64

En la **Tabla 8** se muestra los resultados de % de remoción de DBO₅; donde la mínima remoción de DBO obtenida en promedio fue de 78,17% en el tratamiento N° 1, lograda una masa

de coagulante de 500 mg, voltaje de 12 y distancia de electrodos de 2 cm; mientras que, la máxima remoción de DBO fue en promedio de 94,64% obtenida en el tratamiento N° 8, obtenida con masa de coagulante de 1000 mg, voltaje de 24 y distancia de electrodos de 3 cm.

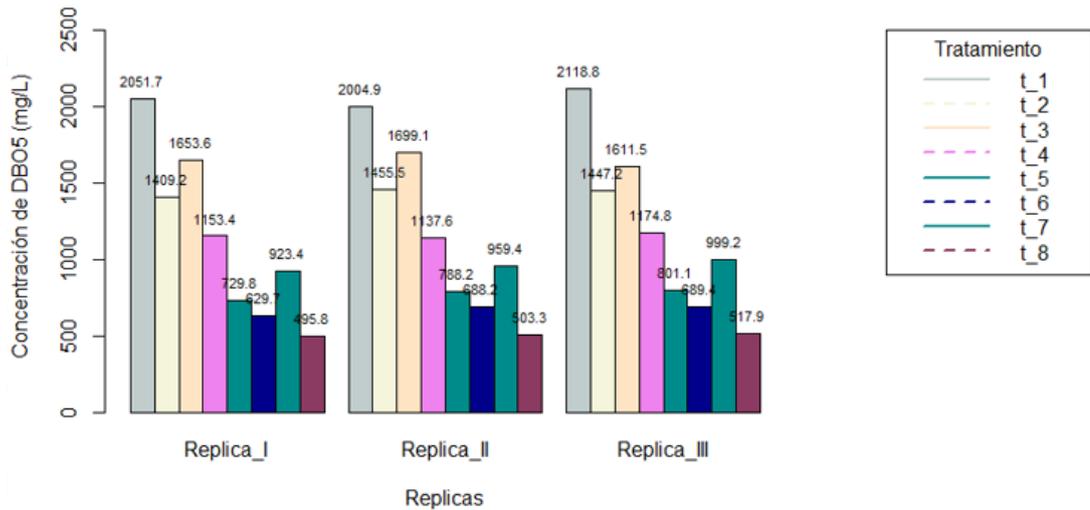


Figura 6. Concentración final de DBO₅

En la **Figura 6**, se detalla la concentración final de DBO₅ en cada tratamiento de las tres réplicas, donde se muestra claramente que la concentración final más alta de DBO₅ en la réplica I, fue en el tratamiento 1 (2051,7 mg/L); en la réplica II, fue en el tratamiento 1 (2004,9 mg/L); y en la réplica III, fue en el tratamiento 1 (2118,8 mg/L). Mientras que, la concentración final más baja de DBO₅ en la réplica I, fue en el tratamiento 8 (495,8 mg/L); en la réplica II, fue en el tratamiento 8 (503,3 mg/L); y en la réplica III, fue en el tratamiento 8 (517,9 mg/L).

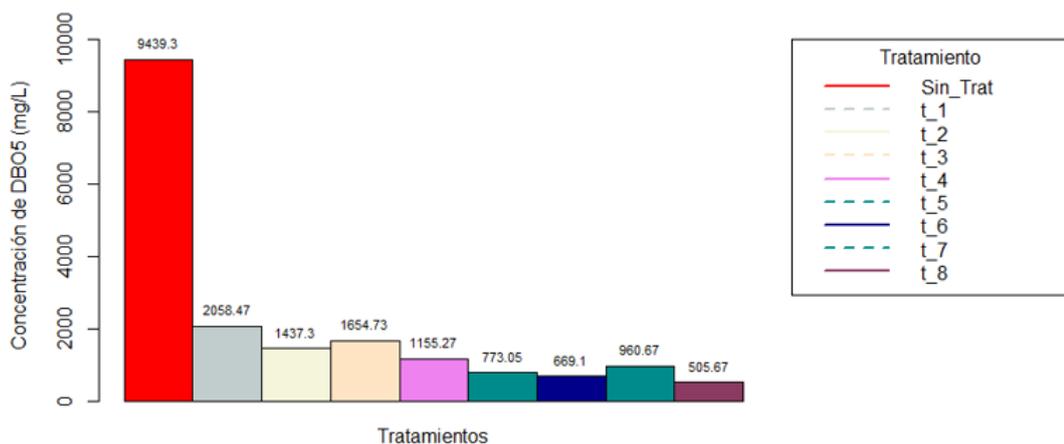


Figura 7. Concentración promedio final de DBO₅

En la **Figura 7**, se detalla la concentración promedio final de DBO₅ en cada tratamiento, donde se muestra claramente que la concentración promedio final más alta de DBO₅ fue 2058,47 mg/L en el tratamiento 1 (masa de coagulante: 500

mg, voltaje: 12 V, distancia de electrodos: 2 cm). Mientras que, la concentración promedio final más baja de DBO_5 en fue 505,67 mg/L en el tratamiento 8 (masa de coagulante: 1000 mg, voltaje: 24 V, distancia de electrodos: 3 cm).

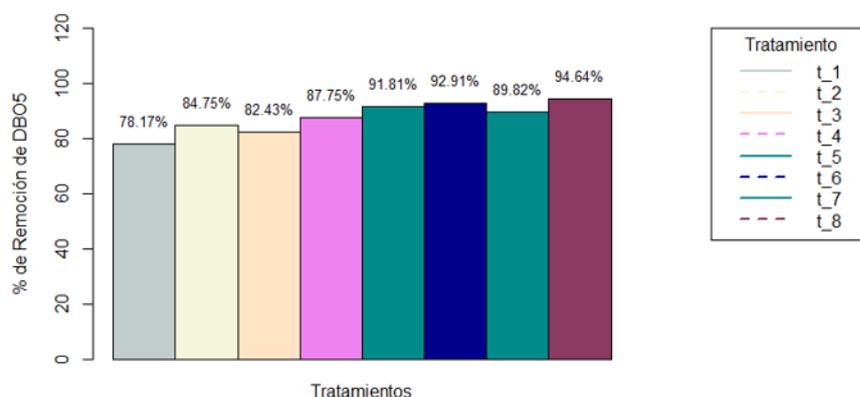


Figura 8. % de Remoción de DBO_5 para cada tratamiento

En la **Figura 8**, se muestra el % promedio de Remoción de DBO_5 de cada tratamiento, donde se observa el máximo % de remoción de DBO_5 en el tratamiento 8 con 94,64% logrado con una masa de coagulante de 1000 mg, voltaje de 24 V y distancia de electrodos de 3 cm. Mientras que el mínimo % de remoción de DBO_5 fue de 78,17% en el tratamiento 1 con una masa de coagulante de 500 mg, voltaje de 12 V y distancia de electrodos de 2 cm.

4.1.4 Masa de coagulante en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga

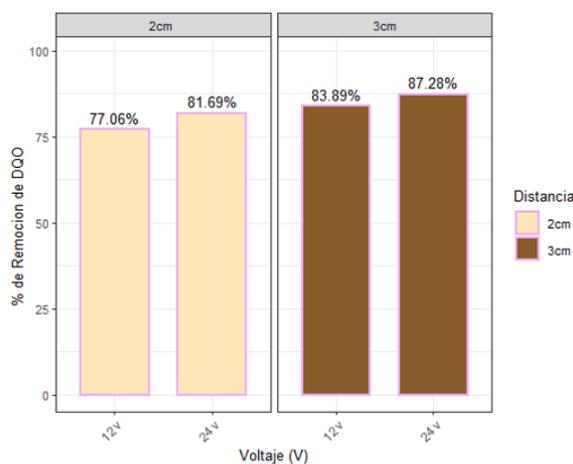


Figura 9. % de Remoción de DQO a 500 mg

La **Figura 9** muestra el % de remoción de DQO a una masa de 500 mg de coagulante a diferentes voltajes y distancia de electrodos; donde la mínima remoción fue 77,06% a un voltaje de 12 V y distancia de electrodos de 2 cm; se alcanzó una máxima remoción de 87,28% a un voltaje de 24 V y distancia de electrodos de 3 cm. A medida que se aumenta el voltaje y la distancia de electrodos, incrementa el % de remoción de DQO.

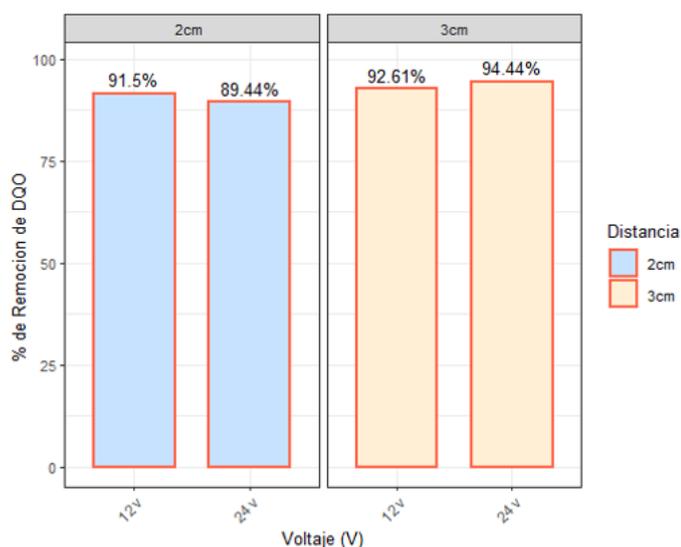


Figura 10. % de Remoción de DQO a 1000 mg

La **Figura 10** muestra el % de remoción de DQO a una masa de 1000 mg de coagulante a diferentes voltajes y distancia de electrodos; donde la mínima remoción fue 89,44% a un voltaje de 24 V y distancia de electrodos de 2 cm; se alcanzó una máxima remoción de 94,44% a un voltaje de 24 V y distancia de electrodos de 3 cm. A medida que se aumenta el voltaje con 2 cm de distancia de electrodos, disminuye el % de remoción de DQO; y medida que se aumenta la distancia de electrodos, incrementa el % de remoción de DQO.

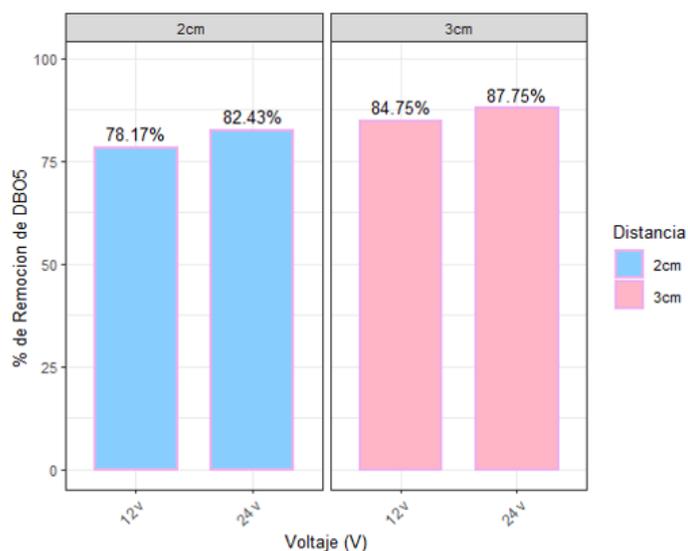


Figura 11. % de Remoción de DBO₅ a 500 mg

La **Figura 11** muestra el % de remoción de DBO₅ a una masa de 500 mg de coagulante a diferentes voltajes y distancia de electrodos; donde la mínima remoción fue 78,17% a un voltaje de 12 V y distancia de electrodos de 2 cm; se alcanzó una máxima remoción de 87,75% a un voltaje de 24 V y distancia de electrodos de 3 cm. A medida que se aumenta el voltaje y la distancia de electrodos, incrementa el % de remoción de DBO₅.

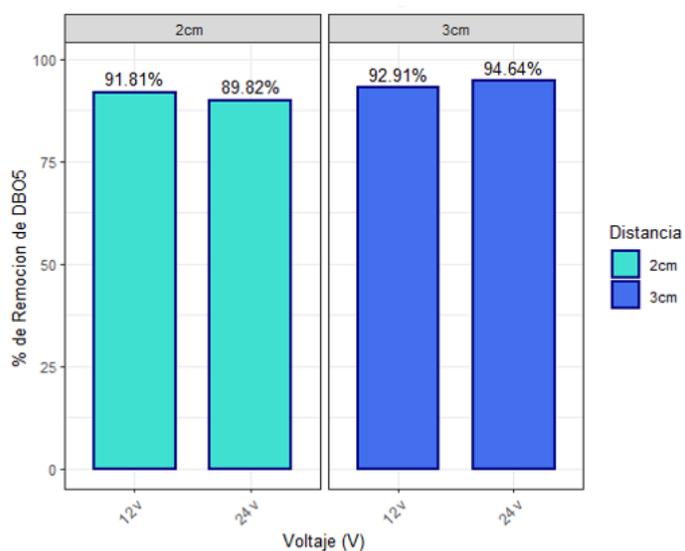


Figura 12. % de Remoción de DBO₅ a 1000 mg

La **Figura 12** muestra el % de remoción de DBO₅ a una masa de 1000 mg de coagulante a diferentes voltajes y distancia de electrodos; donde la mínima

remoción fue 89,82% a un voltaje de 24 V y distancia de electrodos de 2 cm; se alcanzó una máxima remoción de 94,64% a un voltaje de 24 V y distancia de electrodos de 3 cm. A medida que se aumenta el voltaje con 2 cm de distancia de electrodos, disminuye el % de remoción de DBO₅; y medida que se aumenta la distancia de electrodos, incrementa el % de remoción de DBO₅.

4.1.5 Variación del voltaje en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga

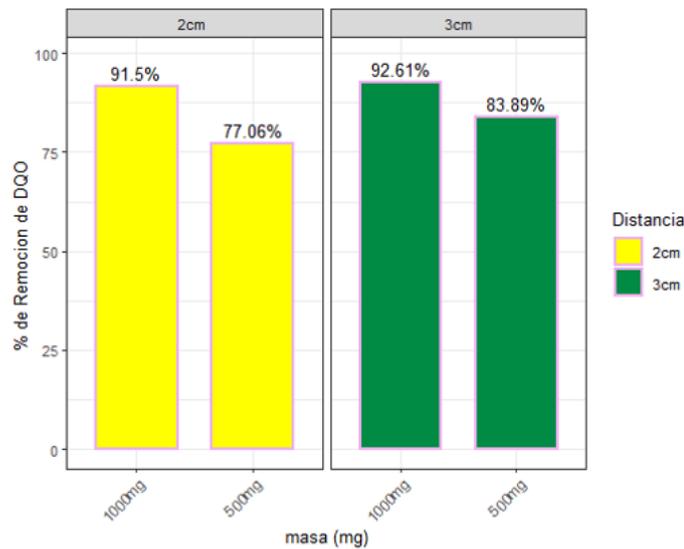


Figura 13. % de Remoción de DQO a 12 V

La **Figura 13** muestra el % de remoción de DQO a un voltaje de 12 V a diferente masa de coagulante y distancia de electrodos; donde la mínima remoción fue 77,06% a una masa de coagulante de 500 mg y distancia de electrodos de 2 cm; se alcanzó una máxima remoción de 92,61% a una masa de coagulante de 1000 mg y distancia de electrodos de 3 cm. A medida que se aumenta la masa de coagulante y la distancia de electrodos, incrementa el % de remoción de DQO.

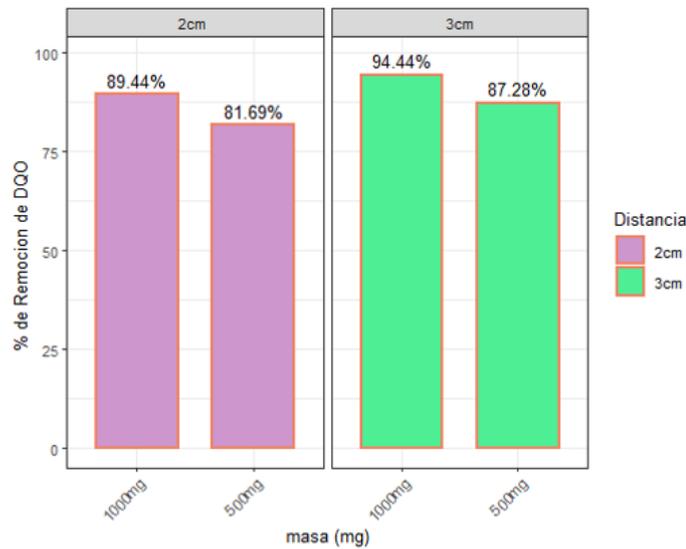


Figura 14. % de Remoción de DQO a 24 V

La **Figura 14** muestra el % de remoción de DQO a un voltaje de 24 V a diferente masa de coagulante y distancia de electrodos; donde la mínima remoción fue 81,69% a una masa de coagulante de 500 mg y distancia de electrodos de 2 cm; se alcanzó una máxima remoción de 94,44% a una masa de coagulante de 1000 mg y distancia de electrodos de 3 cm. A medida que se aumenta la masa de coagulante y la distancia de electrodos, incrementa el % de remoción de DQO.

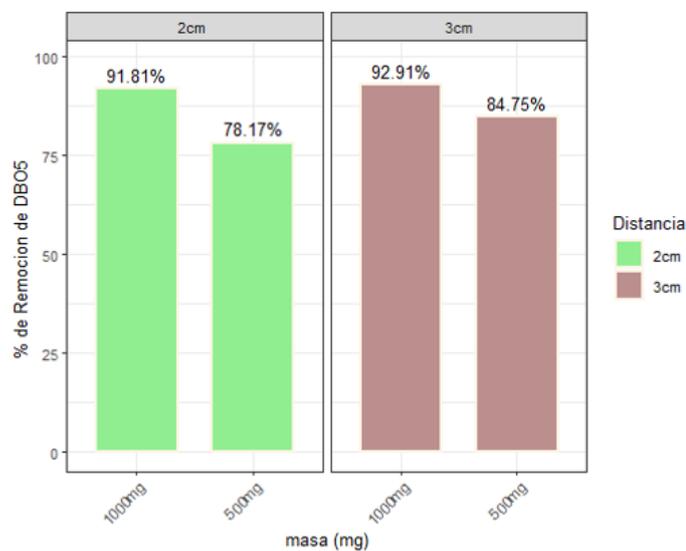


Figura 15. % de Remoción de DBO5 a 12 V

La **Figura 15** muestra el % de remoción de DBO₅ a un voltaje de 12 V a diferentes masas de coagulante y distancia de electrodos; donde la mínima remoción fue

78,17% a una masa de coagulante de 500 mg y distancia de electrodos de 2 cm; se alcanzó una máxima remoción de 92,91% a una masa de coagulante de 1000 mg y distancia de electrodos de 3 cm. A medida que se aumenta la masa de coagulante y la distancia de electrodos, incrementa el % de remoción de DBO₅.

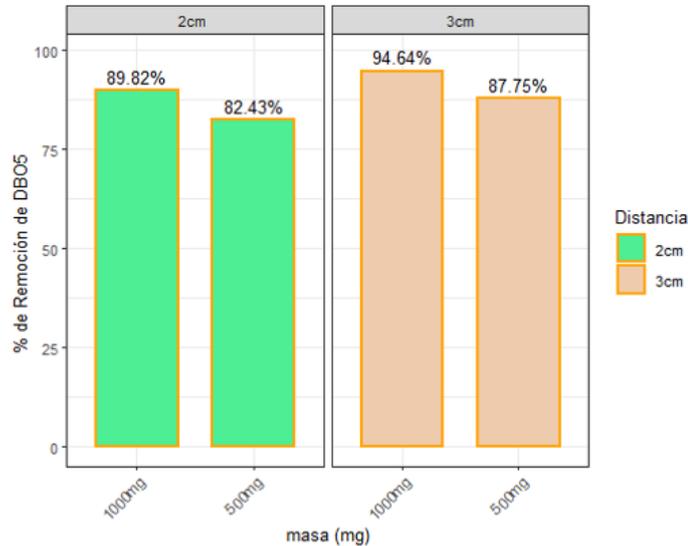


Figura 16. % de Remoción de DBO₅ a 24 V

La **Figura 16** muestra el % de remoción de DBO₅ a un voltaje de 24 V a diferente masa de coagulante y distancia de electrodos; donde la mínima remoción fue 82,43% a una masa de coagulante de 500 mg y distancia de electrodos de 2 cm; se alcanzó una máxima remoción de 94,64% a una masa de coagulante de 1000 mg y distancia de electrodos de 3 cm. A medida que se aumenta la masa de coagulante y la distancia de electrodos, incrementa el % de remoción de DBO₅.

4.1.6 Distancia entre los electrodos en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga

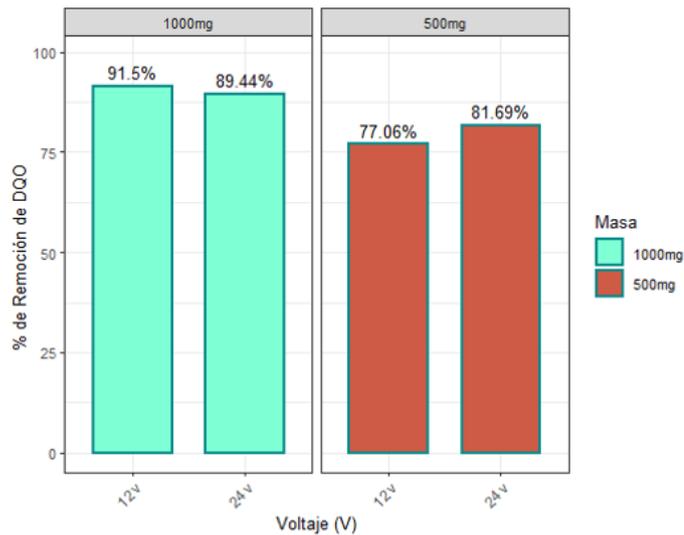


Figura 17. % de Remoción de DQO a 2 cm

La **Figura 17** muestra el % de remoción de DQO a 2 cm de distancia de electrodos a diferentes voltajes y masa de coagulante; donde la mínima remoción fue 77,06% a un voltaje de 12 V y masa de coagulante de 500 mg; se alcanzó una máxima remoción de 91,5% a un voltaje de 12 V y masa de coagulante de 1000 mg. A medida que se aumenta el voltaje con 1000 mg de masa de coagulante, disminuye el % de remoción de DQO; y a medida que se aumenta la masa de coagulante, incrementa el % de remoción de DQO.

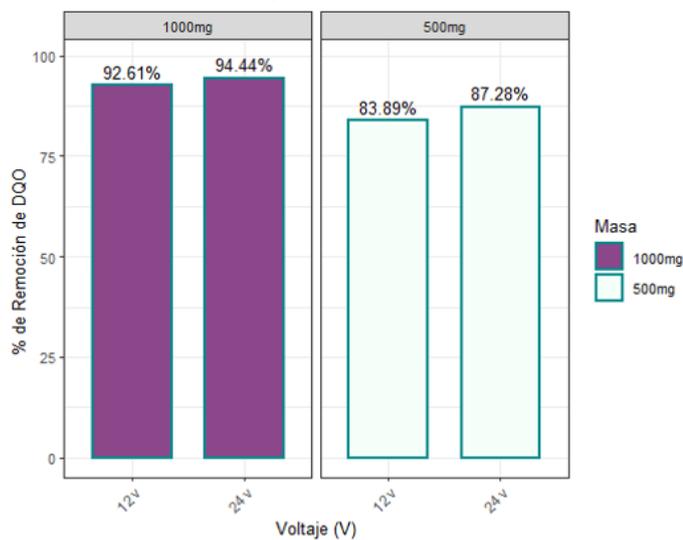


Figura 18. % de Remoción de DQO a 3 cm

La **Figura 18** muestra el % de remoción de DQO a 3 cm de distancia de electrodos a diferentes voltajes y masa de coagulante; donde la mínima remoción fue 83,89%

a un voltaje de 12 V y masa de coagulante de 500 mg; se alcanzó una máxima remoción de 94,44% a un voltaje de 24 V y masa de coagulante de 1000 mg. A medida que se aumenta el voltaje y la masa de coagulante, incrementa el % de remoción de DQO.

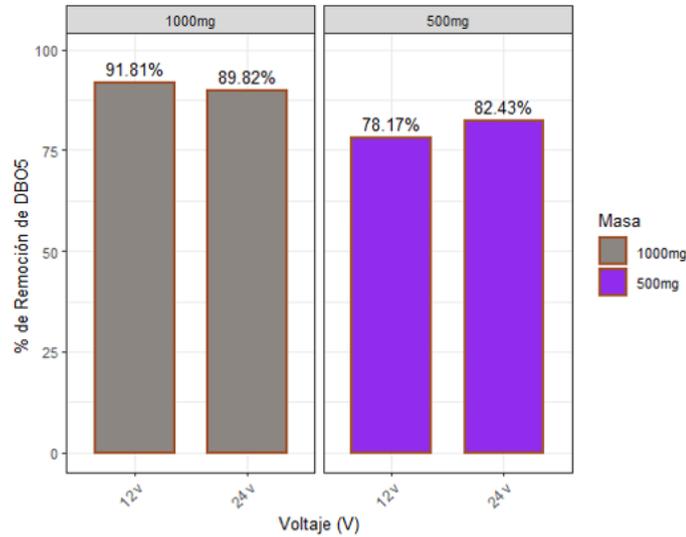


Figura 19. % de Remoción de DBO₅ a 2 cm

La **Figura 19** muestra el % de remoción de DBO₅ a 2 cm de distancia de electrodos a diferentes voltajes y masa de coagulante; donde la mínima remoción fue 78,17% a un voltaje de 12 V y masa de coagulante de 500 mg; se alcanzó una máxima remoción de 91,81% a un voltaje de 12 V y masa de coagulante de 1000 mg. A medida que se aumenta el voltaje con 1000 mg de masa de coagulante, disminuye el % de remoción de DBO₅; y a medida que se aumenta la masa de coagulante, incrementa el % de remoción de DBO₅.

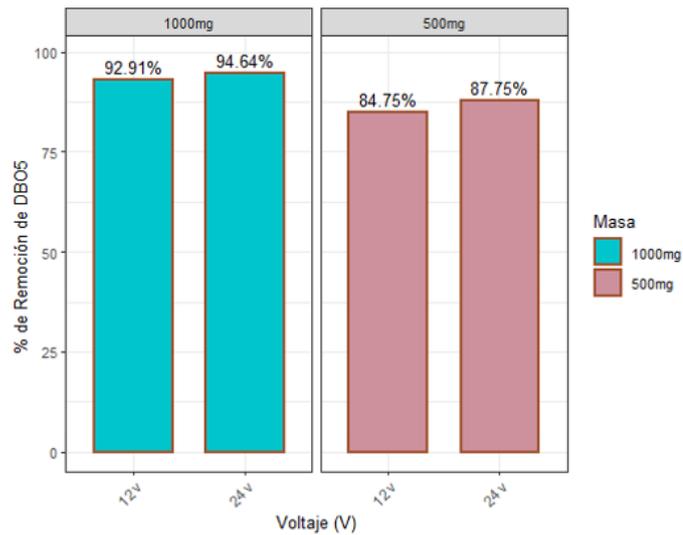


Figura 20. % de Remoción de DBO₅ a 3 cm

La **Figura 20** muestra el % de remoción de DBO₅ a 3 cm de distancia de electrodos a diferentes voltajes y masa de coagulante; donde la mínima remoción fue 84,75% a un voltaje de 12 V y masa de coagulante de 500 mg; se alcanzó una máxima remoción de 94,64% a un voltaje de 24 V y masa de coagulante de 1000 mg. A medida que se aumenta el voltaje y la masa de coagulante, incrementa el % de remoción de DBO₅.

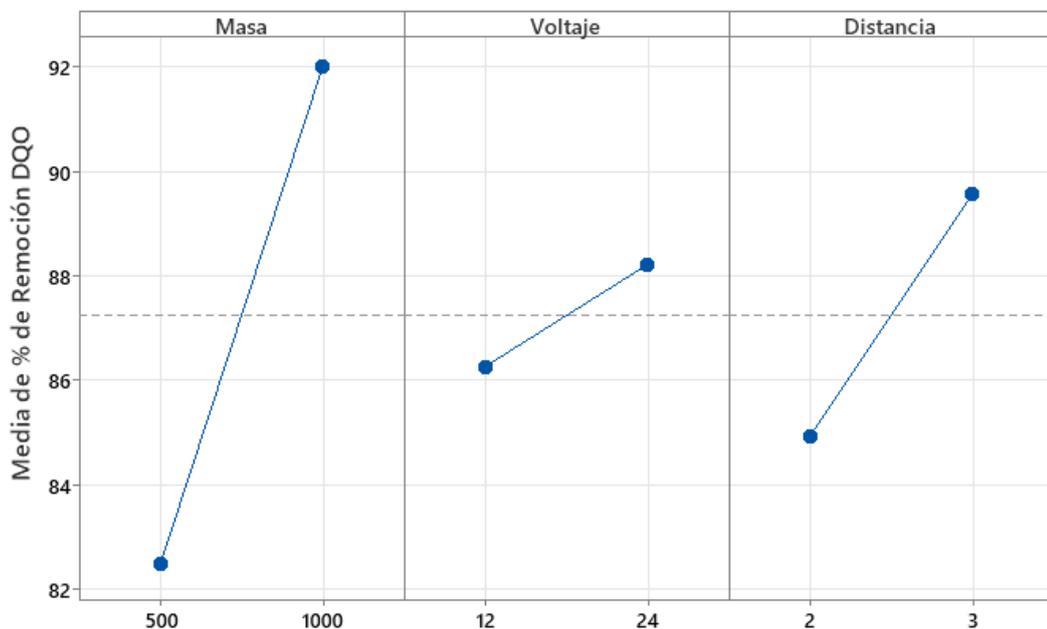


Figura 21. Efectos principales para la remoción de DQO

La **Figura 21** muestra la fuerte influencia de la masa de coagulante, con una pendiente positiva el cual indica que a mayor masa favorece la remoción de DQO; por otro lado, la influencia del voltaje no es fuerte, pero se puede visualizar una tendencia positiva el cual indica que, a mayor voltaje, mayor es la remoción de DQO. Asimismo, la distancia de electrodos fue significativo, favoreciendo la remoción de DQO a una mayor distancia de electrodos.

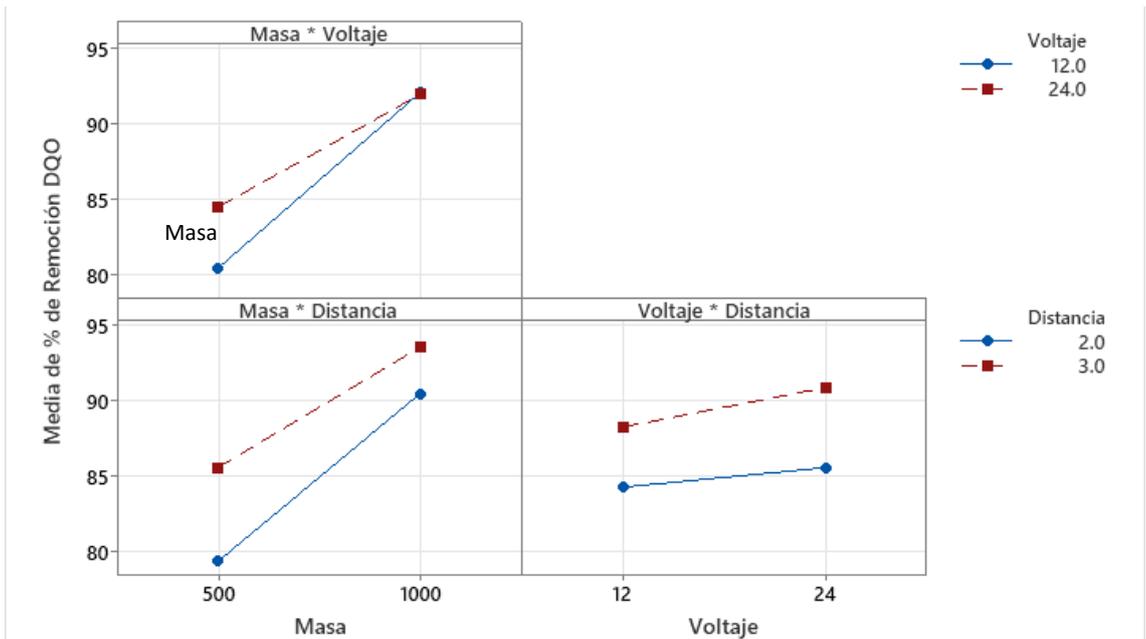


Figura 22. Interacción de factores para la remoción de DQO

La **Figura 22** muestra la interacción masa de coagulante vs voltaje, a mayor masa con ambos niveles de voltaje, hay un incremento en la remoción de DQO; asimismo, en la gráfica de interacción masa de coagulante vs distancia de electrodos, a mayor masa y distancia se tuvo mayor remoción de DQO; por otro lado, en la gráfica de interacción voltaje vs distancia de electrodos, a mayor distancia hay un incremento en la remoción de DQO y este incremento es ligero a mayor masa.

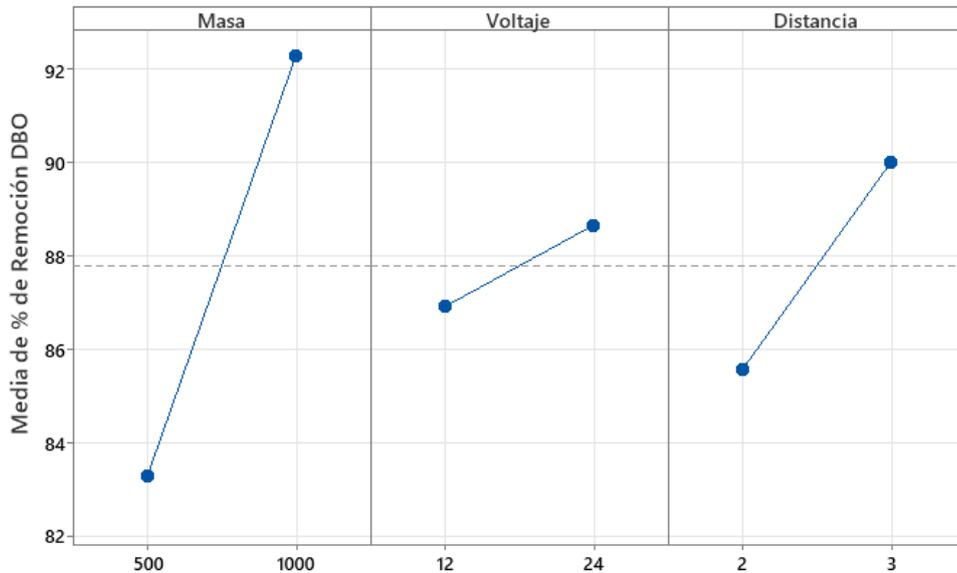


Figura 23. Efectos principales para la remoción de DBO₅

La **Figura 23** muestra la fuerte influencia de la masa de coagulante en la remoción de DBO₅, representada por una pendiente positiva, indicando que a medida que aumenta la masa de coagulante, la remoción de DBO₅ tiende a mejorar. Por otro lado, el efecto del voltaje no es fuerte, pero se observa una tendencia positiva, indicando que, a mayor nivel de voltaje, mayor es la remoción de DBO₅. Asimismo, la distancia de electrodos fue significativo, favoreciendo la remoción de DBO₅ cuando se incrementa la distancia de electrodos.

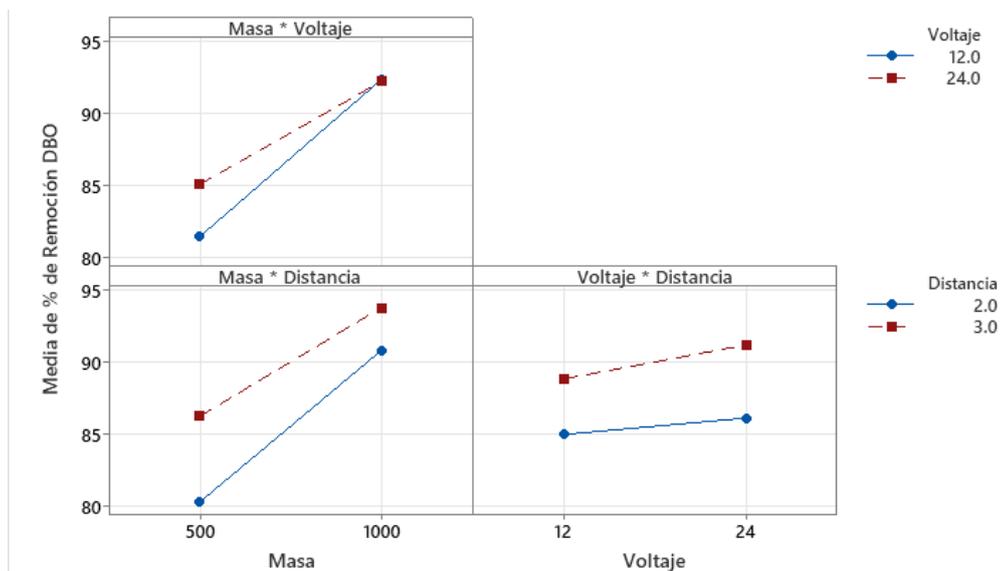


Figura 24. Interacción de factores para la remoción de DBO₅

La **Figura 24** muestra que, en la gráfica de interacción masa de coagulante vs voltaje, se observa un aumento en la remoción de DBO₅ cuando se incrementa la masa en conjunto con ambos niveles de voltaje; además, en la gráfica de interacción masa de coagulante vs distancia de electrodos, se observa un mayor nivel de remoción de DBO₅ al aumentar tanto la masa como la distancia entre electrodos; por otro lado, en la gráfica de interacción voltaje vs distancia de electrodos, se observa un incremento en la remoción de DBO₅ a mayor distancia y este incremento es ligero al aumentar la masa.

4.1.7 Estudio de isothermas de adsorción de DQO

Se realizó el experimento de las isothermas de Langmuir y Freundlich para evaluar la adsorción de DQO en la coagulación química y electrocoagulación

Isoterma de Freundlich

El modelo de isoterma de Freundlich asume que la adsorción ocurre en superficies heterogéneas y no limita la formación de monocapas o multicapas. Esto se describe mediante la ecuación lineal:

$$\text{Log } q_e = \text{Log } K_f + \frac{1}{n} \text{Log } C_e \quad (1)$$

Donde.

C_e : concentración de equilibrio (mg/L)

q_e : cantidad adsorbida en el equilibrio por la cantidad del adsorbente (mg/g)

K_f (mg/g) y n : es una constante que representa la capacidad de adsorción y n es la intensidad de adsorción

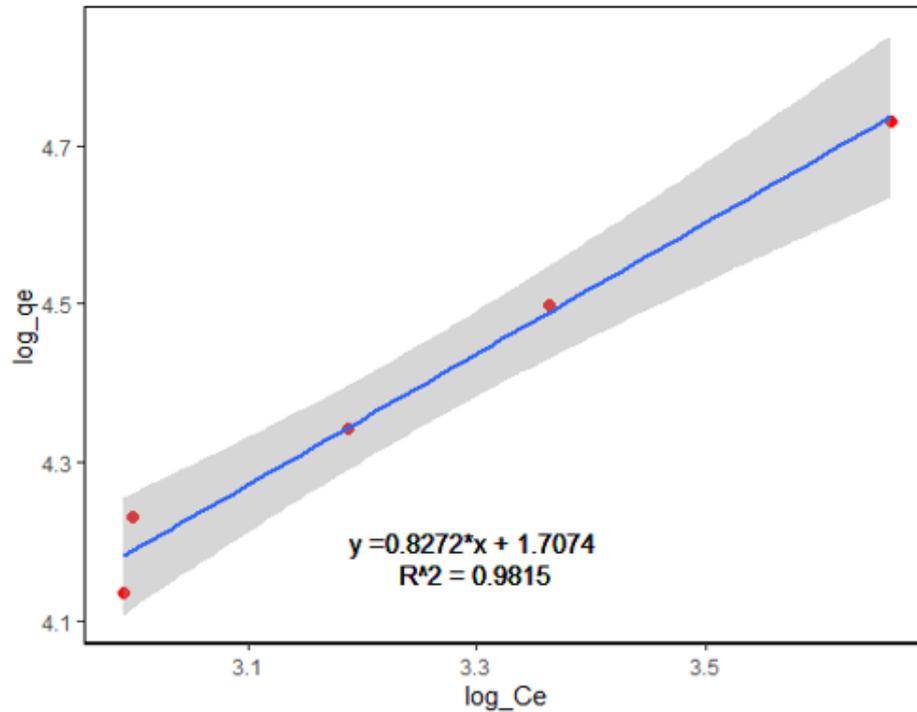


Figura 25. Isoterma de Freundlich

La **Figura 25** muestra el ajuste lineal de la isoterma de Freundlich de los datos experimentales calculados mostrando un coeficiente de correlación (R^2) alta de 0.9815, lo que demuestra que la adsorción de DQO puede expresarse por este modelo.

Isoterma de Langmuir

El modelo de isoterma de Langmuir supone que sólo una especie de soluto ocupará un sitio activo en la superficie homogénea del adsorbente, y que no hay interacciones entre las especies adsorbidas.

El modelo de Langmuir lineal:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_m} + \frac{1}{q_m b C_e} \quad (11)$$

Donde:

C_e : concentración de equilibrio del adsorbato (mg/L),

q_e : la capacidad máxima de adsorción (mg/g)

q_m : capacidad de adsorción de la monocapa de saturación (mg/g)

b : constante relacionada con la energía de adsorción (L/mg).

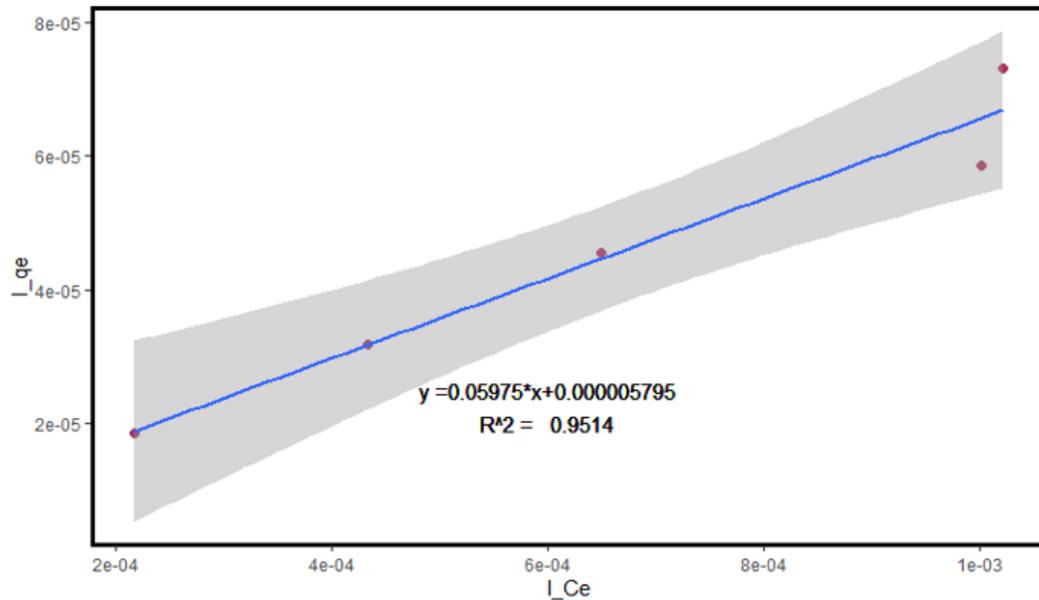


Figura 26. Isoterma de Langmuir

La **Figura 26** muestra el ajuste lineal de la isoterma de Langmuir a datos experimentales, mostrando un coeficiente de correlación (R^2) de 0,9514, lo que explica que los datos experimentales se ajustan al modelo de isoterma de Langmuir, sugiriendo la adsorción de DQO en monocapa sobre una superficie homogénea. La formación de monocapa también indica la unión química de contaminantes orgánicos el coagulante. Los parámetros obtenidos del ajuste lineal de los modelos de adsorción a los datos experimentales se muestran en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Parámetros obtenidos del ajuste lineal de modelos de isoterma

	Langmuir		Freundlich
q_m (mg g ⁻¹)	172562,55	k_F ((mg g ⁻¹)/(mg L ⁻¹) ^{1/n})	50,98
b (L mg ⁻¹)	9,69x10 ⁻⁵	1/n	0,8272
		n	1,2089
R^2	0,9514	R^2	0,9815

La **Tabla 9** muestra, los parámetros obtenidos del ajuste lineal a los modelos de isoterma de Langmuir y Freundlich. Donde se tuvo la capacidad máxima de

adsorción de 172562,55 mg de DQO/g de coagulante. Mientras que, el valor de n en el ajuste de Freundlich fue de 1.2089, este valor de $n > 1$, indica que la adsorción es favorable para la isoterma de Freundlich, gobernado por con un proceso no ideal que ocurre en superficies heterogéneas de formación multicapa.

4.2 Prueba de hipótesis

4.2.1 Prueba de normalidad

Se realizó las gráficas de probabilidad normal (*Figura 28* y *Figura 20*) elaborados con los datos del % de remoción de DQO y DBO₅ calculados para determinar si se acepta o no la hipótesis nula:

H₀: Los datos proceden de una población normal

H_a: Los datos no proceden de una población normal

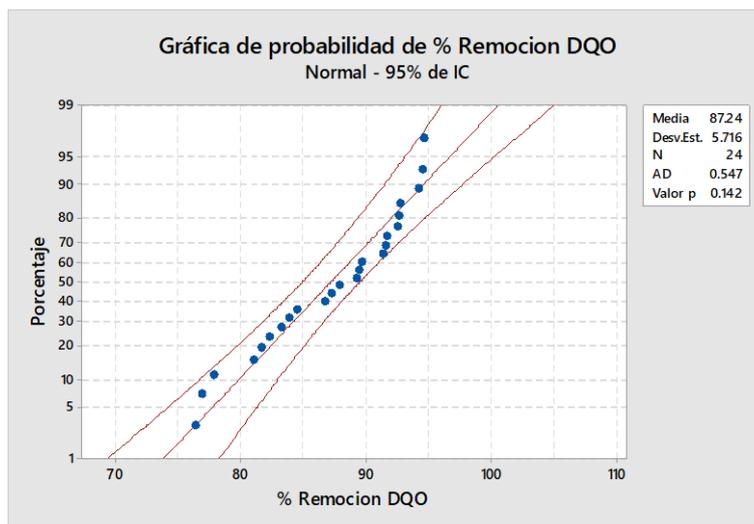


Figura 27. Gráfica de probabilidad normal para la remoción de DQO

La *Figura 27* muestra la prueba de normalidad para la remoción de DQO, donde el valor obtenido de “ $p > 0,05$ ” indica que se acepta la hipótesis nula; entonces estadísticamente podemos afirmar que, los datos proceden de una población normal; por lo tanto, se utiliza la prueba paramétrica de análisis de varianza ANOVA para la contratación de hipótesis.

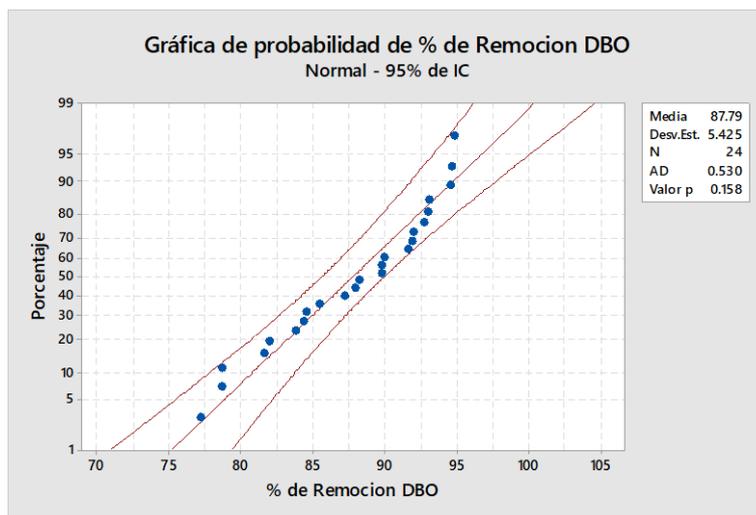


Figura 28. Gráfica de probabilidad normal para la remoción de DBO5

La **Figura 28** muestra la prueba de normalidad para la remoción de DBO₅, donde el valor de “ $p > 0,05$ ”, este valor indica que se acepta la hipótesis nula; por lo que estadísticamente podemos afirmar que, los datos proceden de una población normal; por lo tanto, se utiliza la prueba paramétrica de análisis de varianza ANOVA para la contratación de hipótesis.

4.2.2 Contrastación de hipótesis para la remoción para la remoción de materia orgánica (DQO) de aguas residuales de matadero de Sapallanga

Tabla 10. Análisis de Varianza para la remoción de DQO

Fuente	G L	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	750,213	83,357	878	0,000
Bloques	2	2,214	1,107	11,66	0,001
Lineal	3	695,066	231,689	2440,2	0,000
				1	
Masa	1	543,533	543,533	5724,6	0,000
				4	
Voltaje	1	22,842	22,842	240,58	0,000

Distancia	1	128,691	128,691	1355,4	0,000
				1	
Interacciones de 2 términos	3	43,088	14,363	151,27	0,000
Masa*Voltaje	1	25,571	25,571	269,32	0,000
Masa*Distancia	1	14,912	14,912	157,05	0,000
Voltaje*Distancia	1	2,605	2,605	27,44	0,000
Interacciones de 3 términos	1	9,845	9,845	103,69	0,000
Masa*Voltaje*Distancia	1	9,845	9,845	103,69	0,000
Error	14	1,329	0,095		
Total	23	751,542			

En la **Tabla 13**, se pudo observar que la masa de coagulante, el voltaje y la distancia de electrodos fueron significativos en la variable de respuesta (remoción de DQO), para un coeficiente de correlación ajustado del 99,71% (Tabla 14). Además, el efecto de la interacción de 2 factores (Masa*Voltaje, Masa*Distancia y Voltaje*Distancia) y 3 factores (Masa*Voltaje*Distancia) fueron significativas, mostrando un p-valor inferior al 0,05, señalando que son significativamente distintos de cero con una confiabilidad del 95,0%.

Tabla 11. Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.308133	99.82%	99.71%	99.48%

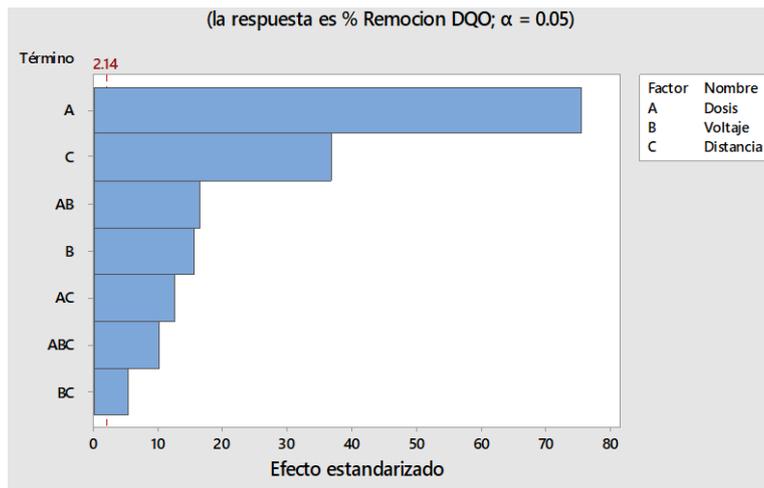


Figura 29. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

El diagrama de Pareto de la **Figura 29**, indica cada uno de los factores con sus efectos e interacciones, observándose que los factores masa de coagulante, voltaje y distancia de electrodos son significativos, donde la masa de coagulante fue la más significativa en la remoción de DQO. Además, en la interacción de dos factores, se observa que la interacción de masa de coagulante con voltaje tiene mayor influencia en la remoción de DQO; asimismo en la interacción de 3 factores, se observa que también tienen influencia significativa en la remoción de DQO.

4.2.3 Contrastación de hipótesis para la remoción DBO_5 para la remoción de materia orgánica (DBO_5) de aguas residuales de matadero de Sapallanga

Tabla 12. Análisis de Varianza para la remoción de DBO_5

Fuente	G L	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	9	674,007	74,89	347,92	0,000
Bloques	2	2,495	1,248	5,8	0,015
Lineal	3	625,35	208,45	968,41	0,000
Masa	1	487,979	487,979	2267,0	0,000
				3	
Voltaje	1	18,334	18,334	85,18	0,000
Distancia	1	119,037	119,037	553,02	0,000

Interacciones de 2 términos	3	36,821	12,274	57,02	0,000
Masa*Voltaje	1	21,182	21,182	98,41	0,000
Masa*Distancia	1	13,398	13,398	62,24	0,000
Voltaje*Distancia	1	2,241	2,241	10,41	0,006
Interacciones de 3 términos	1	9,341	9,341	43,4	0,000
Masa*Voltaje*Distancia	1	9,341	9,341	43,4	0,000
Error	14	3,014	0,215		
Total	23	677,021			

En la **Tabla 13**, se pudo observar que la masa de coagulante, el voltaje y la distancia de electrodos fueron significativos en la variable de respuesta (remoción de DBO₅), para un coeficiente de correlación ajustado del 99,27% (Tabla 14). Además, el efecto de la interacción de 2 factores (Masa*Voltaje, Masa*Distancia y Voltaje*Distancia) y 3 factores (Masa*Voltaje*Distancia) tuvieron un efecto significativo, con un p-valor inferior al 0,05, señalando que son significativamente distintos de cero con una confiabilidad del 95,0%.

Tabla 13. Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,463951	99,55%	99,27%	98,69%

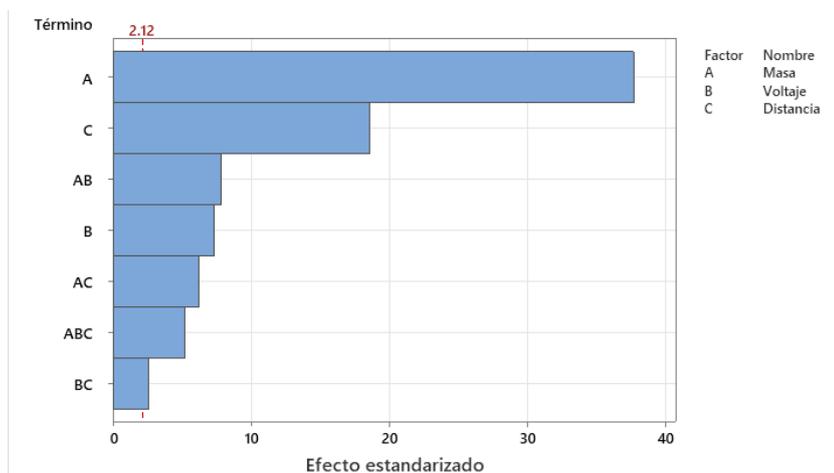


Figura 30. Diagrama de Pareto de efectos estandarizados

El diagrama de Pareto de la **Figura 30**, indica cada uno de los factores con sus efectos e interacciones; se observa que los factores masa de coagulante, voltaje y distancia de electrodos son significativos, siendo la masa de coagulante la más significativa en la remoción de DBO₅. Además, en la interacción de dos factores, se observa que la interacción de masa de coagulante con voltaje tiene mayor influencia en la remoción de DBO₅; asimismo la interacción de tres factores, también tienen influencia significativa en el proceso de remoción de DBO₅.

4.2.4 Análisis de contorno para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga

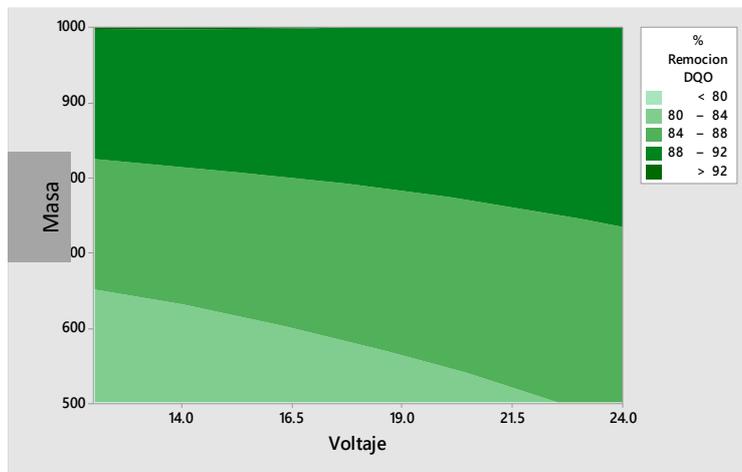


Figura 31. Análisis de contorno de masa y voltaje para % de remoción de DQO

El gráfico de contorno de la **Figura 31** presenta las secciones en las cuales se obtendrá diferentes intervalos del porcentaje de remoción de DQO, en función de la masa de coagulante y voltaje. La parte superior de color verde oscuro muestra los más altos porcentajes de remoción de DQO; mientras que la parte inferior de color verde más claro muestra los más bajos porcentajes de remoción de DQO. A una masa de coagulante mayor a 800 mg en el rango amplio de voltaje de 12 V a 24 V se ve favorecida la remoción > 92%; además desde una masa de coagulante de 750 mg para 24 V se ve favorecida la remoción de DQO para > 92%.

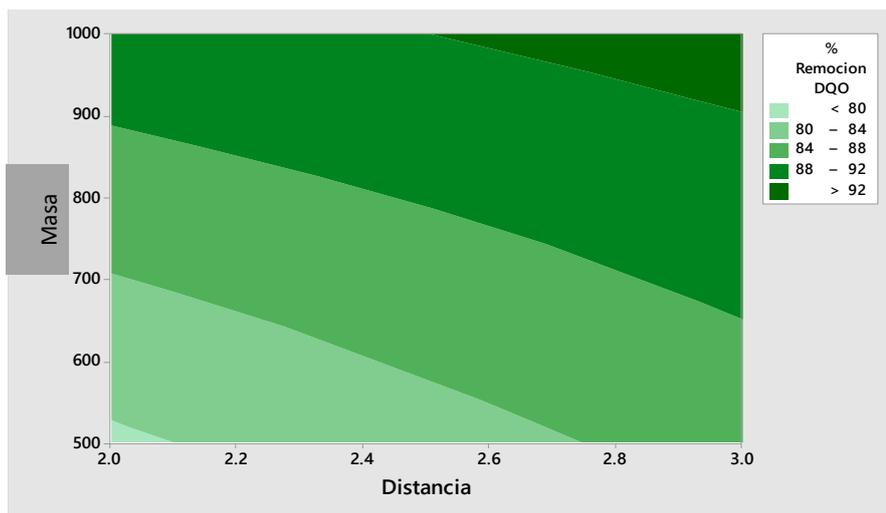


Figura 32. Análisis de contorno de masa y distancia para % de remoción de DQO

El gráfico de contorno de la **Figura 32** presenta las secciones en las cuales se obtendrá diferentes intervalos del % de remoción de DQO, en función de la masa de coagulante y distancia de electrodos. La parte superior de color verde oscuro muestra los más altos % de remoción de DQO; mientras que la parte inferior de color verde más claro muestra los más bajos % de remoción de DQO. A masa de coagulante mayor a 950 mg y una distancia de electrodos de 3 cm favorece la remoción de DQO > 92 %; además se puede alcanzar remoción de 88% a 92%, a 3 cm de distancia de electrodos y a 700 mg de dosis de coagulante; mientras que se va disminuyendo la distancia de electrodos a 2 cm se debe incrementar la masa de coagulante a 900 mg.

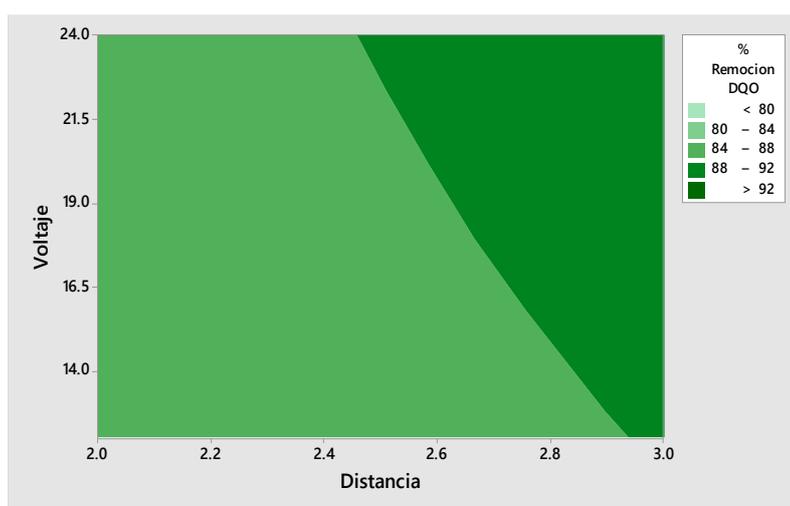


Figura 33. Análisis de contorno de voltaje y distancia para % de remoción de DQO

El gráfico de contorno de la **Figura 33** presenta las secciones en las cuales se obtendrá diferentes intervalos del % de remoción de DQO, en función del voltaje y distancia de electrodos. La parte derecha de color verde oscuro muestra los más altos % de remoción de DQO; mientras que la parte izquierda de color verde más claro muestra los más bajos % de remoción de DQO. A una distancia de electrodos mayor a 2,9 cm en el rango amplio de voltaje de 12 V a 24 V se ve favorecida la remoción > 92%; además desde una distancia de electrodos de 2,5 cm para 24 V se ve favorecida la remoción de DQO para > 92%.

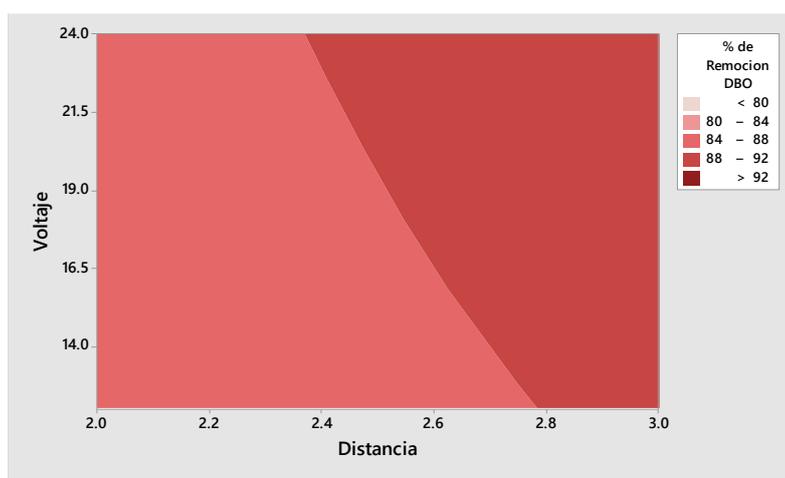


Figura 34. Análisis de contorno de voltaje y distancia para % de remoción de DBO₅

El gráfico de contorno de la **Figura 34** representa diferentes rangos del % de remoción de DBO₅, en función del voltaje y la distancia entre electrodos. En la parte derecha, resaltada en un tono rojo más oscuro, se muestran los % más altos de remoción de DBO₅, mientras que, en la parte izquierda, en un tono rojo más claro, se muestran los % más bajos de remoción de DBO₅. Se observa que, a distancia de electrodos mayor a 2,8 cm, dentro del rango de voltaje de 12 V a 24 V, se logra una remoción de DBO₅ del 88% al 92%. Además, desde una distancia de electrodos de 2,4 cm y a 24 V, también se favorece la remoción de DBO₅ en el rango del 88% al 92%.

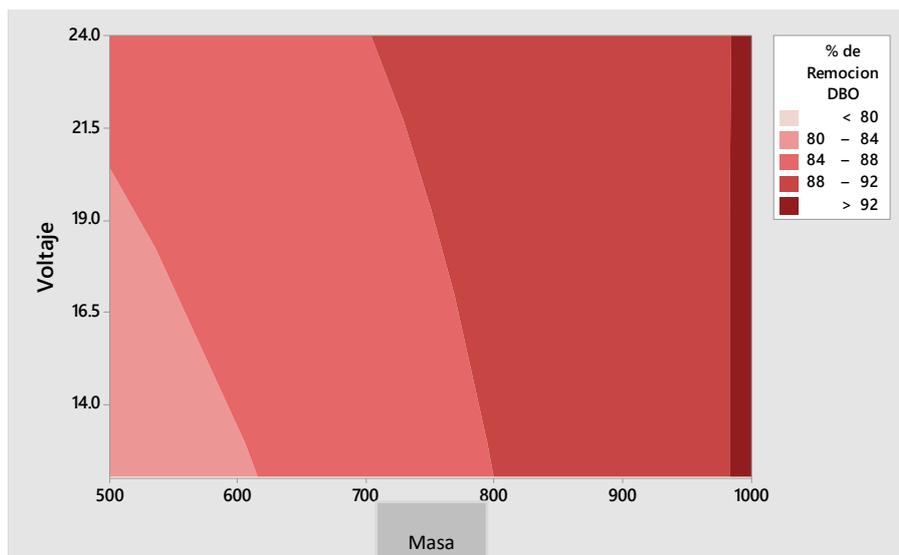


Figura 35. Análisis de contorno de voltaje y masa para % de remoción de DBO₅

El gráfico de contorno de la **Figura 35** representa diferentes rangos del % de remoción de DBO₅, en función del voltaje y masa de coagulante. En la parte derecha, resaltada en un tono rojo más oscuro, se muestran los % más altos de remoción de DBO₅, mientras que, en la parte izquierda, en un tono rojo más claro, se muestran los % más bajos de remoción de DBO₅. Se observa que, a una masa de coagulante de 1000 mg dentro del rango de voltaje de 12 V a 24 V, se logra una remoción de DBO₅ > 92%. Además, desde una masa de coagulante de 750 mg y a 24 V se favorece la remoción de DBO₅ en el rango del 88% al 92%.

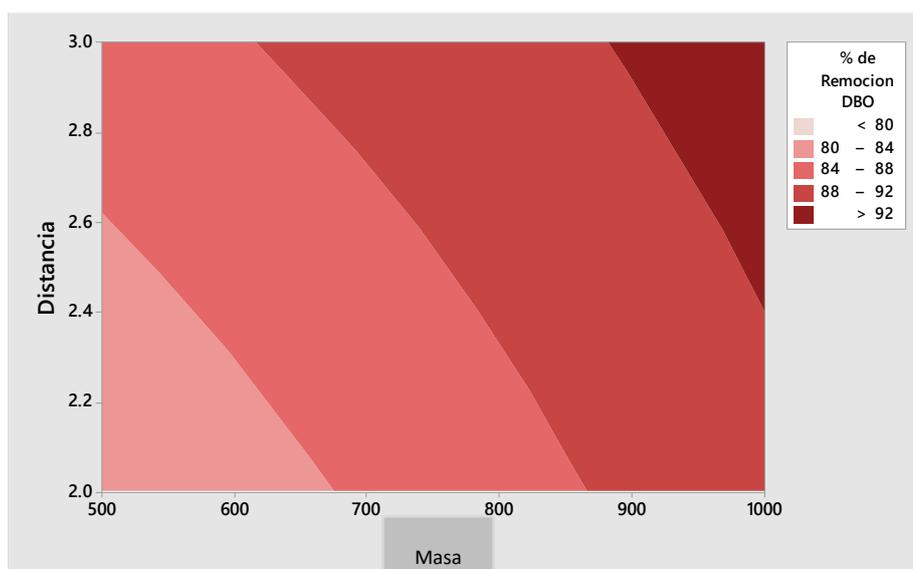


Figura 36. Análisis de contorno de distancia y masa para % de remoción de DBO₅

El gráfico de contorno de la **Figura 36** representa diferentes rangos del % de remoción de DBO₅, en función de distancia de electrodos y masa de coagulante. En la parte derecha, resaltada en un tono rojo más oscuro, se muestran los % más altos de remoción de DBO₅, mientras que, en la parte izquierda, en un tono rojo más claro, se muestran los % más bajos de remoción de DBO₅. Se observa que, a masa de coagulante mayor a 900 mg y una distancia de electrodos de 3 cm, se logra una remoción de DBO₅ > 92%. Además, se puede lograr una remoción de 88% al 92%, a 3 cm de distancia de electrodos y a 650 mg de masa de coagulante; mientras se reduce la distancia entre electrodos a 2 cm, es necesario aumentar la masa de coagulante a 900 mg.

4.3 Discusión de resultados

En el presente estudio sobre el tratamiento de aguas residuales de matadero, la combinación de coagulación química y electrocoagulación demostró una remoción significativa de la materia orgánica, evaluada mediante la remoción de DQO y DBO, superior al 94%. Este resultado coincide con los hallazgos de Ali et al. (10) y Al-Qodah et al. (17), quienes también observaron altas eficacias en la remoción de contaminantes en otras industrias mediante procesos combinados similares. Sin embargo, comparado con el estudio de Reilly et al. (14), donde se logró eliminar más del 75% de DQO en efluentes de la industria cárnica mediante solo electrocoagulación, el presente enfoque combinado logró tasas de remoción aún más altas. Esto subraya la importancia de integrar la coagulación química para tratar eficazmente los contaminantes más complejos y variados presentes en las aguas residuales de mataderos. Además, los modelos de isoterma de adsorción de Langmuir y Freundlich, aplicados para evaluar el mecanismo de remoción, indicaron una alta eficacia de adsorción con nuestros métodos combinados. El modelo de Freundlich, especialmente, se ajustó de manera excepcional a nuestros datos, sugiriendo una adsorción favorable en superficies heterogéneas y la capacidad de capturar contaminantes a concentraciones variables. Estos resultados enfatizan la eficiencia y adaptabilidad de nuestra aproximación combinada en

comparación con métodos de tratamiento únicos, destacando su potencial para abordar los desafíos de gestión de aguas residuales en la industria ganadera.

El agua residual del matadero presentaba concentraciones elevadas de DQO (17250,3 mg/L) y DBO (8997,8 mg/L) que sobrepasa el VMA establecido en el D. S. N° 010-2019-VIVIENDA que es de DQO igual a 1000 mg/L y DBO de 500 mg/L. Estas concentraciones representan un riesgo considerable para el medio ambiente y la salud pública si las aguas residuales se descargan directamente en el sistema de alcantarillado, ya que pueden causar una contaminación severa. La alta DQO indica una gran cantidad de materia orgánica susceptible de oxidación, mientras que la elevada DBO refleja una alta demanda de oxígeno para la degradación biológica de esa materia orgánica, lo que puede agotar el oxígeno disuelto en cuerpos de agua receptores, afectando la vida acuática (1). Además, la presencia de estos contaminantes en tales niveles puede contribuir al desarrollo de condiciones anóxicas, promoviendo la proliferación de bacterias anaerobias que generan compuestos tóxicos y malolientes como el sulfuro de hidrógeno. La descarga de estos efluentes sin tratamiento adecuado puede también afectar la calidad del suelo y del agua subterránea, especialmente si se utilizan para riego (3). Un estudio similar realizado por Araujo et al. (18) en aguas residuales de camal reportó concentraciones de 8050 mg/L de DQO, 3565 mg/L de DBO5 y 1260 mg/L de sólidos suspendidos totales. Estos resultados refuerzan la preocupación sobre la alta carga contaminante de las aguas residuales de mataderos. La comparación de estos estudios subraya la necesidad urgente de implementar tratamientos eficaces para estos efluentes antes de su vertido, con el fin de proteger el medio ambiente y cumplir con las normativas vigentes.

La masa de coagulante fue significativa ($p < 0,05$) en el tratamiento del agua residual de matadero, siendo más eficaz a una dosis de 1000 mg. Esta masa permitió una remoción máxima media del 94,44% de DQO y del 94,64% de DBO, reduciendo las concentraciones finales a 1005,23 mg/L de DQO y 505,67 mg/L de DBO. Además, a cualquier voltaje, una masa de coagulante superior a 800 mg fue favorable para la remoción de DQO, logrando tasas de eliminación superiores al 88% cuando la distancia entre electrodos fue mayor a 2,6 cm y hasta 3 cm. Con una mayor cantidad de coagulante, hay más agentes disponibles para neutralizar las

cargas eléctricas de las partículas suspendidas y disueltas en el agua. Esto facilita la formación de flóculos más grandes favoreciendo la remoción de DBO y DQO. Estos resultados son consistentes con los hallazgos de Gökçek et al. (11), quienes reportaron una concentración óptima de alumbre de 1000 mg/L en el tratamiento de aguas residuales de mataderos, logrando porcentajes de remoción del 75,25% para DQO, 90,16% para sólidos suspendidos (SS) y 91,18% para la turbidez.

Por otro lado, Araujo et al. (18) encontraron que una concentración de coagulante solamente de 261,4 mg/L era óptima para tratar aguas residuales de camales mediante un proceso de tratamiento combinado. Este estudio reportó porcentajes de remoción del 78,5% para DQO (reduciéndola a 296,3 mg/L), 79,04% para DBO5 (reduciéndola a 134,3 mg/L) y 51,31% para TSS (reduciéndolos a 40,9 mg/L). En conjunto, estos estudios destacan la importancia de optimizar la masa de coagulante para mejorar la eficiencia del tratamiento de aguas residuales de mataderos. Aunque los niveles óptimos pueden variar según las condiciones específicas del tratamiento, el estudio sugiere que dosis más altas de coagulante, como 1000 mg, pueden ser más efectivas en la reducción de contaminantes a niveles aceptables, comparado con masas menores.

El voltaje fue significativo ($p < 0,05$) en el tratamiento del agua residual de matadero, siendo más eficaz a un voltaje de 24 V. A este voltaje se obtuvo la remoción máxima media del 94,44% de DQO y del 94,64% de DBO. El voltaje más alto de 24 V proporciona una mayor eficiencia en la generación de coagulantes, intensificación de las reacciones electroquímicas y producción de gases que facilitan la eliminación de contaminantes. Resultado similar tuvo Nuqman et al. (16) en su investigación encontraron la condición óptima para el tratamiento con electrocoagulación en aguas residuales de mataderos fue con 24 V, denominada parámetro condicional, donde el porcentaje de eliminación de OD y la eliminación de DQO de esta condición de parámetro demostró el valor más alto de 81,48% y 91,30%, respectivamente. Mientras que Zarei et al. (9) a un voltaje más alto tuvieron como resultados la máxima eficiencia de remoción de coliformes totales fue del 100% en diferencia de potencial, igual a 30 V, siendo capaz de eliminar los coliformes totales de las aguas residuales de los mataderos de aves. Por el contrario, Araujo et al. (18) en un proceso de tratamiento combinado del agua residual de un camal mediante

coagulación química, solo con una caída de tensión 12 Voltios, lograron la eliminación de DQO, DBO₅ y TSS con porcentajes de remoción de 78,5%, 79,04% y 51,31% respectivamente.

La distancia de electrodo fue significativa ($p < 0,05$) en la remoción de DQO (94,44%) y DBO (94,64%), siendo favorable la distancia de 3 cm. A esta distancia, se logró una remoción superior al 88% de DQO y DBO en un rango de voltajes de 12 a 24 V. La distancia óptima de 3 cm permite una mejor distribución de la corriente eléctrica, una generación eficiente de coagulantes, y optimiza las reacciones electroquímicas necesarias para la eliminación de contaminantes. Estos resultados son cruciales para el diseño y operación eficiente de sistemas de tratamiento electroquímico de aguas residuales. Resultados cercanos reportó Akarsu et al. (15) evidenció que una distancia de 2 cm fue suficiente para una tasa de eliminación de DQO del 70,89%. Aunque estos resultados son significativos, la distancia de 2 cm utilizada por Akarsu et al. mostró una eficiencia inferior en comparación con la distancia de 3 cm utilizada en nuestro estudio, lo que sugiere que un mayor espacio entre electrodos puede mejorar la eficiencia de la remoción de DQO y DBO.

Por otro lado, Araujo et al. (18) desarrollaron un proceso de tratamiento combinado para aguas de camal utilizando un coagulante de polímero de aluminio y un reactor acrílico con 6 electrodos a una distancia de 1 cm. Obtuvieron una remoción de DQO del 78,5% (296,3 mg/L), DBO₅ del 79,04% (134,3 mg/L) y TSS del 51,31% (40,9 mg/L) bajo condiciones óptimas. Estos resultados fueron significativamente inferiores a los obtenidos en nuestro estudio, lo que sugiere que una distancia de 1 cm no es tan efectiva como una distancia de 3 cm para la remoción de DQO y DBO. Nuqman et al. (16) estudiaron el proceso de electrocoagulación en aguas residuales de matadero, determinando que con electrodos Zn-Zn, 24 V, 6 minutos de operación y una distancia de 1 cm, se lograron remociones de DQO del 81,48% y del 91,30%, respectivamente. Aunque los resultados fueron buenos, todavía fueron inferiores a los resultados obtenidos con una distancia de 3 cm en nuestro estudio.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. En el tratamiento de agua residual de matadero, mediante el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación, se logró una remoción significativa mayor a 94% de DQO y DBO, evaluando la masa de coagulante, variación de voltaje y diferentes distancias entre los electrodos. Siendo favorables, la masa de 1000 mg, 24 V y 3 cm.
2. Las concentraciones excesivas de DQO (17250,3 mg/L) y DBO (8997,8 mg/L) en las aguas residuales del matadero representan un riesgo significativo para el medio ambiente y la salud pública si se descargan directamente en el sistema de alcantarillado, lo que podría ocasionar una contaminación severa y comprometer la calidad del agua, superando el Valor Máximo Admisible (VMA) establecido en el D. S. N° 010-2019-VIVIENDA, que es de DQO igual a 1000 mg/L y DBO de 500 mg/L.
3. La masa de coagulante mostró un impacto significativo ($p < 0,05$) en el tratamiento de las aguas residuales del matadero. Una masa de 1000 mg demostró ser la más eficaz, logrando una remoción máxima promedio del 94,44% de DQO y del 94,64% de DBO. Dosificaciones superiores a 800 mg de coagulante resultaron favorables para la remoción de DQO, especialmente con distancias entre electrodos cercano a 3 cm.
4. El voltaje aplicado fue significativo ($p < 0,05$) en el tratamiento de las aguas residuales del matadero, siendo más eficaz a un voltaje de 24 V. A este nivel de voltaje, se alcanzó las concentraciones finales a 1005,23 mg/L de DQO y 505,67 mg/L de DBO. El voltaje más alto facilita la generación eficiente de coagulantes, intensifica las reacciones electroquímicas y promueve la producción de gases que contribuyen a la eliminación de contaminantes.
5. La distancia entre electrodos fue significativa en la remoción de DQO (94,44%) y DBO (94,64%), siendo óptima a una distancia de 3 cm. Esta distancia permitió una remoción superior al 88% de DQO y DBO en un rango de voltajes de 12 a 24 V. La distancia de 3 cm optimiza la distribución de la

corriente eléctrica y la generación de coagulantes, mejorando así las reacciones electroquímicas necesarias para la eliminación de contaminantes en el tratamiento electroquímico de aguas residuales.

5.2 Recomendaciones

1. Se recomienda a las autoridades ambientales y sanitarias supervisar de cerca las operaciones de tratamiento de aguas residuales de mataderos para garantizar que las concentraciones de parámetros en el efluente tratado cumplan con los estándares establecidos en el D. S. N° 010-2019-VIVIENDA.
2. A los responsables de la gestión de aguas residuales del matadero a implementar un enfoque combinado de coagulación química y electrocoagulación en el tratamiento de efluentes. El monitoreo regular de los procesos y la realización de pruebas piloto adicionales pueden proporcionar información valiosa para mejorar continuamente la eficacia del sistema de tratamiento de aguas residuales del matadero.
3. A los investigadores que consideren la evaluación del tiempo de agitación o tratamiento como parte de sus estudios futuros sobre el tratamiento de aguas residuales del matadero. Realizar pruebas sistemáticas para determinar el tiempo óptimo de agitación o tratamiento ayudará a garantizar un proceso de tratamiento eficiente y efectivo en términos de tiempo y recursos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. NG, M. *et al.* *Characterization of Slaughterhouse Wastewater and Development of Treatment Techniques: A Review* [en línea]. 1 July 2022. MDPI. Disponible en: <https://hal.science/hal-03753701v1>
2. LOUVET, J. *et al.* Monitoring of slaughterhouse wastewater biodegradation in a SBR using fluorescence and UV-Visible absorbance. *Chemosphere*[en línea]. 2013. Vol. 91, no. 5, p. 648–655. DOI 10.1016/j.chemosphere.2013.01.011. Disponible en: <https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01282425>
3. BAZRAFSHAN, E. *et al.* Slaughterhouse Wastewater Treatment by Integrated Chemical Coagulation and Electro-Fenton Processes. *Sustainability (Switzerland)* [en línea]. 1 September 2022. Vol. 14, no. 18. DOI 10.3390/su141811407. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/18/11407>
4. ALVAREZ, A. y RODRÍGUEZ, A. *Análisis de Operaciones Unitarias para el planteamiento de mejora en el tratamiento de aguas residuales del Matadero Municipal de Tacna.* [en línea]. 2018. Disponible en: <https://orcid.org/0000-000326416218>
5. GARCÍA, A. y ZEVALLOS, K. Optimización del proceso coagulación-floculación usando cloruro férrico y fosfato para la reducción de contaminantes del agua residual del camal Conchucos S.A., Lima. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental y Recursos Naturales). Lima: Universidad Nacional del Callao, 2021, 107 pp. Disponible en: https://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12952/6201/TESIS_PREGRADO_GARCIA_ZEVALLOS_FIARN_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y
6. HUARACHI, Y. Propuesta de mejora del sistema de tratamiento de aguas residuales de matadero municipal de Tacna. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Tacna: Universidad Privada de Tacna, 2020. 101 pp. Disponible en: <https://repositorio.upt.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12969/1527/Huarachi-Nunes-Yannela.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

7. DIAZ, H. y DEL AGUILA, L. Determinación de la eficiencia entre los métodos de Electrocoagulación y Coagulación Química para la remoción de la turbiedad del agua residual doméstica – Tarapoto, 2019. Tesis (Título de Ingeniero Ambiental). Tarapoto: Universidad Cesar Vallejo, 2019, 84 pp. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/41563>
8. ALVAREZ, J. *et al.* Determinación de los parámetros óptimos para el tratamiento de un efluente textil mediante coagulación-floculación y electrocoagulación. *Inst. Malvinas*. 2019. No. 1976, p. 748–753.
9. ZAREI, A. *et al.* Disinfecting poultry slaughterhouse wastewater using copper electrodes in the electrocoagulation process. *Polish Journal of Environmental Studies* [en línea]. 2018. Vol. 27, no. 4, p. 1907–1912. DOI 10.15244/pjoes/78150. Disponible en: <https://doi.org/10.15244/pjoes/78150>
10. ALI, A. *et al.* Reuse of textile wastewater after treating with combined process of chemical coagulation and electrocoagulation. *Polish Journal of Environmental Studies* [en línea]. 2019. Vol. 28, no. 4, p. 2565–2570. DOI 10.15244/pjoes/91940. Disponible en: <https://doi.org/10.15244/pjoes/91940>
11. GÖKÇEK, Ö. y ÖZDEMİR, S. Optimization of the coagulation--floculation process for slaughterhouse wastewater using response surface methodology This article is protected by copyright. All rights reserved [en línea]. *CLEAN Soil Air Water*. 2020. Vol. 48, no. 7–8. Disponible en: <https://doi.org/10.1002/clen.202000033>
12. NUGROHO, F. *et al.* Slaughterhouse Wastewater Treatment by Electrocoagulation Process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [en línea] 2021. Vol. 1115, no. 1, p. 012037. DOI 10.1088/1757-899x/1115/1/012037. Disponible en: <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26175>
13. VUTIVI, Philadelphia. Optimisation of electrocoagulation process in the treatment of poultry slaughterhouse wastewater. *Cape Peninsula University of Technology*. 2021. No. November.

14. REILLY, M. Electrocoagulation treatment of dairy processing and slaughterhouse wastewaters. *Energy Procedia*. [en línea] 2019. Vol. 161, p. 343–351. DOI 10.1016/j.egypro.2019.02.106. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.02.106>
15. AKARSU, C. *et al.* Treatment of slaughterhouse wastewater by electrocoagulation and electroflotation as a combined process: process optimization through response surface methodology. *Environmental Science and Pollution Research* [en línea]. 2021. Vol. 28, no. 26, p. 34473–34488. DOI 10.1007/s11356-021-12855-4. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12855-4>
16. NUQMAN, M. The optimization study of electrocoagulation process on slaughterhouse wastewater. *Universiti Teknologi MARA* [en línea]. 2022. Disponible en: <https://ir.uitm.edu.my/68256/1/68256.pdf>
17. AL-QODAH, Z. *et al.* Combined electrocoagulation processes as a novel approach for enhanced pollutants removal: A state-of-the-art review. *Science of the Total Environment*. [en línea] 2020. Vol. 744, p. 140806. DOI 10.1016/j.scitotenv.2020.140806. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140806>
18. ARAUJO, L., CAMPOS, L. y CHAVARRÍA, M. Tratamiento de agua residual del camal Conchucos mediante coagulación química seguido de electrocoagulación. Tesis (Título de Ingeniero Químico). Callao: Universidad Nacional del Callao, 2021, 141 pp. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12952/6068>
19. ORÉ, A. Influencia del sulfato de aluminio y pH en la remoción de la materia orgánica para el tratamiento del agua residual del camal municipal de Chupaca. Tesis (Título de Ingeniero Químico). Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, 2017, 69 pp. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12894/3770>
20. PEREZ, F. y URREA, M. Abastecimiento de Aguas. *Abastecimiento De Aguas, Coagulación Y Floculación*. Universidad Politécnica de Cartagena. [en línea] 2014. P. 1–34. Disponible en: https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/6019/mod_resource/content/1/Tema_06_COAGULACION_Y_FLOCULACION.pdf

21. ARANGO, A. La electrocoagulación : una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Lasallista de Investigación*. 2005. Vol. 2, no. enero-junio, p. 49–56.
22. ÑAUPAS, E. *et al.* Metodología de la investigación: Cuantitativa - Cualitativa y Redacción de la Tesis, 4ta Edición.
23. HERNÁNDEZ, R. y MENDOZA, C. Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. *Mc Graw Hill*. 2018. Vol. 1, no. México, p. 714. 978-1-4562-6096-5

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

Título: Análisis del proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de matadero, Huancayo – 2024

Problema	Objetivo	Hipótesis	VARIABLES	Indicadores	Metodología
<p>General:</p> <p>¿Cuál es el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024?</p> <p>Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Cuáles son los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024? ¿Cuál es la masa de coagulante en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024? ¿Cuál es la variación del voltaje en el 	<p>General:</p> <p>Analizar el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024</p> <p>Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> Caracterizar Determinar los parámetros fisicoquímicos de las aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024. Determinar la masa de coagulante en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024. Determinar la variación del voltaje en el proceso combinado de 	<p>Ho: El proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024, no es significativo.</p> <p>Ha: El proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024, es significativo.</p>	<p>VARIABLES INDEPENDIENTES:</p> <ul style="list-style-type: none"> Masa del coagulante Voltaje Distancia entre los electrodos <p>VARIABLE DEPENDIENTE:</p> <ul style="list-style-type: none"> Materia orgánica 	<p>mg</p> <p>V</p> <p>cm</p> <p>DQO</p> <p>DBO₅</p>	<p>Tipo de investigación:</p> <p>Aplicada</p> <p>Nivel de investigación:</p> <p>Explicativo</p> <p>Diseño de investigación:</p> <p>Agua residual de matadero</p> <p>Población de estudio:</p> <p>Diseño factorial de 2³</p> <p>Tamaño de la muestra:</p> <p>1000 ml de agua residual de matadero por corrida experimental</p>

<p>proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024?</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Cuál es la distancia entre los electrodos en la coagulación química y electrocoagulación como proceso combinado para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024? 	<p>coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar la distancia entre los electrodos en el proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para la remoción de materia orgánica de aguas residuales de matadero de Sapallanga, Huancayo – 2024. 				
---	--	--	--	--	--

Anexo 2: Registro fotográfico de la toma de muestra

-Ubicación y registro del punto de toma de muestra



-Toma de muestra





- Medición de los parámetros de campo y preservación de las muestras



Anexo 3: Registro fotográfico de las pruebas experimentales

-Pesado y medición del volumen de agua residual para el proceso de coagulación



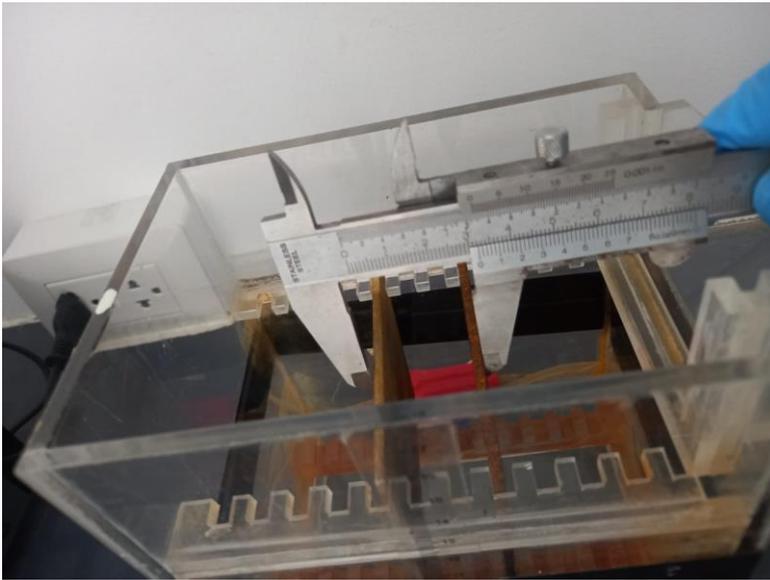
-Ajuste de pH a 6,5



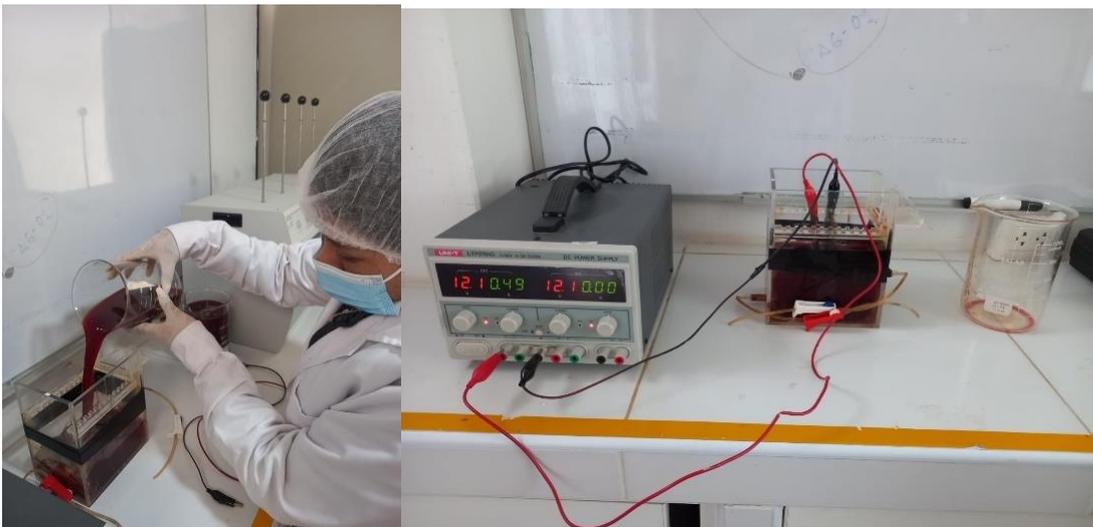
-Tratamiento de coagulación química



-Construcción de celdas para la electrocoagulación



-Tratamiento de electrocoagulación



-Alícuotas para la medición de parámetros



-Medición y lectura de parámetros



Anexo 4: Reporte de análisis de laboratorio de las corridas experimentales



INFORME DE ENSAYO N° 1-0171/23

Pág. 1/1

CLIENTE	: Medalid Ingrid Venturo Zurfiga
REFERENCIA	: PROYECTO "Evaluación del proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para tratamiento de aguas residuales de matadero"
PRODUCTO	: Agua Residual
MATRIZ	: Agua Residual
CANTIDAD DE MUESTRAS	: 1
PROCEDECENCIA DE LAS MUESTRAS	: Agua Residual de matadero de Chilca- Huancayo
FECHA DE MUESTREO	: 20/12/23
FECHA DE RECEPCIÓN	: 20/12/23
MUESTREADO POR	: El Cliente
FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO	: 21/12/23
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO	: 26/12/23
N° DE COTIZACIÓN DE SERVICIO	: G/JCOT-2023-198



MÉTODOLOGÍAS DE ENSAYO

ENSAYO	METODOLOGÍA DE ENSAYO	L.D.	L.C.	UNIDADES
pH	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 4500-H+ B, 24th Ed. 2023. pH Value. Electrometric Method.			unidad pH
TEMPERATURA	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2550 B, 24th Ed. 2023. Temperature. (Direct Method)			°C
CONDUCTIVIDAD	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2510 B, 24th Ed. 2023. Conductivity			µS/cm
TDS	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 2540 C, 24th Ed. 2023	5.4	10.0	mg/L
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5220 C, 24th Ed. 2023	1.0	2.0	mg/L
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Part 5210 B, 24th Ed. 2023	1.0	2.0	mg/L

L.C. Límite de cuantificación

L.D. Límite de detección

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO	Agua Residual	
MATRIZ	Agua Residual	
FECHA DE MUESTREO	20/12/2023	
COORDENADAS UTM WGS 84	8662726 N 477196 E	
ALTITUD (msnm)	3144	
CONDICIONES DE LA MUESTRA	PRESERVADA/REFRIGERADA	
CÓDIGO DE CLIENTE	AM-1	
CÓDIGO DE LABORATORIO	23122001	
ENSAYO	UNIDADES	RESULTADOS
TDS	mg/L	840
DQO	mg/L	17260.3
DBO ₅	mg/L	8997.8

PRESERVADA* la muestra se encuentra preservada según lo requiere el método de ensayo

RESULTADOS DE CAMPO

Conductividad	µS/cm	1700
Temperatura	°C	17.8
pH	Unidad pH	7.6

Los análisis de campo lo realizaron profesionales de monitoreo del GRUPO JHACC en presencia del cliente.

Huancayo, 29 de Diciembre de 2023

Wilmer M. Espinoza Chénca
 SUPERVISOR DE LABORATORIO

El informe de ensayo solo es válido para las muestras referidas en el presente informe.
 Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL GRUPO JHACC.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

Jr. Santa Rosa N° 1361 - El Tambo, Huancayo - Perú Celular: 971 718825 - 954 416149 - 956 988682
 Correo: proyectos@grupojhacc.com / administracion@grupojhacc.com
 www.grupojhacc.com

INFORME DE ENSAYO N° 1-0172/23

Pág. 1/1

CLIENTE	: Medalid Ingrid Venturo Zuñiga
REFERENCIA	: PROYECTO "Evaluación del proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para tratamiento de aguas residuales de matadero"
PRODUCTO	: Agua Residual Tratada
MATRIZ	: Agua Residual Tratada
CANTIDAD DE MUESTRAS	: 8
PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS	: Agua Residual Tratada
FECHA DE MUESTREO	: 22/12/23
FECHA DE RECEPCIÓN	: 22/12/23
MUESTREADO POR	: El Cliente
FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO	: 22/12/23
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO	: 27/12/23
N° DE COTIZACIÓN DE SERVICIO	: GJ/COT-2023-198



MÉTODOLOGÍAS DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	L.D.	L.C.	UNIDADES
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	SMEWW-APHA-AWWAWF Part 5220 C, 24th Ed. 2023	1.0	2.0	mg/L
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	SMEWW-APHA-AWWAWF Part 5210 B, 24th Ed. 2023	1.0	2.0	mg/L

L.C: Límite de cuantificación
L.D: Límite de detección

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO	Agua Residual Tratada							
MATRIZ	Agua Residual Tratada							
FECHA DE MUESTREO	22/12/2023	22/12/2023	22/12/2023	22/12/2023	22/12/2023	22/12/2023	22/12/2023	22/12/2023
CONDICIONES DE LA MUESTRA	PRESERVADA*REFRIGERADA							
CÓDIGO DE CLIENTE	MV01-I	MV02-I	MV03-I	MV04-I	MV05-I	MV06-I	MV07-I	
CÓDIGO DE LABORATORIO	23122201	23122202	23122203	23122204	23122205	23122206	23122207	
ENSAYO	RESULTADOS							
UNIDADES								
DQO	mg/L	407.2	2882.4	3267.5	2267.8	1456.8	1257.9	1858.5
DBO ₅	mg/L	2051.7	1409.2	1853.6	1153.4	729.84	629.7	923.4

PRESERVADA la muestra se encuentra preservada según lo requiere el método de ensayo

PRODUCTO DECLARADO	Agua Residual Tratada	
MATRIZ	Agua Residual Tratada	
FECHA DE MUESTREO	22/12/2023	
CONDICIONES DE LA MUESTRA	PRESERVADA*REFRIGERADA	
CÓDIGO DE CLIENTE	MV08-I	
CÓDIGO DE LABORATORIO	23122208	
ENSAYO	RESULTADOS	
UNIDADES		
DQO	mg/L	1001.7
DBO ₅	mg/L	495.8

PRESERVADA la muestra se encuentra preservada según lo requiere el método de ensayo

Huancayo, 29 de Diciembre de 2023

Wilmer M. Espinoza Chanca
 SUPER VISOR DE LABORATORIO



"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"

LAA-GJ

El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe.
 Prohíbida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL GRUPO JHACC.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

INFORME DE ENSAYO N° 1-006/24

Pág. 1/1

CLIENTE	: Medafid Ingrid Venturo Zurifga
REFERENCIA	: PROYECTO "Evaluación del proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para tratamiento de aguas residuales de matadero"
PRODUCTO	: Agua Residual Tratada
MATRIZ	: Agua Residual Tratada
CANTIDAD DE MUESTRAS	: 9
PROCEDECENCIA DE LAS MUESTRAS	: Agua Residual Tratada
FECHA DE MUESTREO	: 27/12/23
FECHA DE RECEPCIÓN	: 27/12/23
MUESTREO POR	: El Cliente
FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO	: 27/12/23
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO	: 02/01/24
N° DE COTIZACIÓN DE SERVICIO	: GJ/COT-2023-198



MÉTODOLOGÍAS DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	L.D.	L.C.	UNIDADES
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	SMEWW-APHA-AWWAWEF Part 5220 C, 24th Ed. 2023	1.0	2.0	mg/L
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	SMEWW-APHA-AWWAWEF Part 5210 B, 24th Ed. 2023	1.0	2.0	mg/L

L.C. Límite de cuantificación
L.D. Límite de detección

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO	Agua Residual Tratada							
MATRIZ	Agua Residual Tratada							
FECHA DE MUESTREO	27/12/2023	27/12/2023	27/12/2023	27/12/2023	27/12/2023	27/12/2023	27/12/2023	
CONDICIONES DE LA MUESTRA	PRESERVADA*/REFRIGERADA							
CÓDIGO DE CLIENTE	MV01-II	MV02-II	MV03-II	MV04-II	MV05-II	MV06-II	MV07-II	
CÓDIGO DE LABORATORIO	23122701	23122702	23122703	23122704	23122705	23122706	23122707	
ENSAYO	RESULTADOS							
UNIDADES								
DQO	mg/L	4167.9	2904.8	3304.3	2308.2	1566.8	1353.1	1900.2
DBO ₅	mg/L	2004.9	1455.5	1699.1	1137.6	788.2	688.2	959.4

PRESERVADA: la muestra se encuentra preservada según lo requiere el método de ensayo

PRODUCTO DECLARADO	Agua Residual Tratada	AR	
MATRIZ	Agua Residual Tratada	AR	
FECHA DE MUESTREO	27/12/2023	27/12/2023	
CONDICIONES DE LA MUESTRA	PRESERVADA*/REFRIGERADA		
CÓDIGO DE CLIENTE	MV08-II	AM-2	
CÓDIGO DE LABORATORIO	23122708	23122709	
ENSAYO	RESULTADOS		
UNIDADES			
DQO	mg/L	998.5	18051.6
DBO ₅	mg/L	503.3	9395.2

PRESERVADA: la muestra se encuentra preservada según lo requiere el método de ensayo
AR: muestra declarada Agua Residual

Huancayo, 5 de Enero de 2024.

Wilmer M. Espinoza Chanca
SUPER VISOR DE LABORATORIO

El informe de ensayo solo es valido para las muestras referidas en el presente informe.
Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL GRUPO JHACC.
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

INFORME DE ENSAYO N° 1-0007/24

Pág. 1/1

CLIENTE	: Medalid Ingrid Venturo Zuñiga
REFERENCIA	: PROYECTO "Evaluación del proceso combinado de coagulación química y electrocoagulación para tratamiento de aguas residuales de matadero"
PRODUCTO	: Agua Residual Tratada
MATRIZ	: Agua Residual Tratada
CANTIDAD DE MUESTRAS	: 12
PROCEDENCIA DE LAS MUESTRAS	: Agua Residual Tratada
FECHA DE MUESTREO	: 29/12/23
FECHA DE RECEPCIÓN	: 29/12/23
MUESTREADO POR	: El Cliente
FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO	: 29/12/23
FECHA DE TÉRMINO DE ENSAYO	: 03/01/24
N° DE COTIZACIÓN DE SERVICIO	: GJCOT-2023-198



MÉTODOLOGÍAS DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA	L.D.	L.C.	UNIDADES
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	SMEWW-APHA-AWWAWF Part 5220 C, 24th Ed. 2023	1.0	2.0	mg/L
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	SMEWW-APHA-AWWAWF Part 5210 B, 24th Ed. 2023	1.0	2.0	mg/L

L.C. Límite de cuantificación
L.D. Límite de detección

RESULTADOS DE ANÁLISIS

PRODUCTO DECLARADO	Agua Residual Tratada						
MATRIZ	Agua Residual Tratada						
FECHA DE MUESTREO	29/12/2023	29/12/2023	29/12/2023	29/12/2023	29/12/2023	29/12/2023	29/12/2023
CONDICIONES DE LA MUESTRA	PRESERVADA*REFRIGERADA						
CÓDIGO DE CLIENTE	MV01-III	MV02-III	MV03-III	MV04-III	MV05-III	MV06-III	MV07-III
CÓDIGO DE LABORATORIO	23122901	23122902	23122903	23122904	23122905	23122906	23122907
ENSAYO	RESULTADOS						
UNIDADES	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
DQO	4203.6	2951.1	3355.8	2299.9	1592.5	1401.1	1969.3
DBO ₅	2118.8	1447.2	1611.5	1174.8	801.1	689.4	999.2

PRESERVADA: la muestra se encuentra preservada según lo requiere el método de ensayo.

PRODUCTO DECLARADO	AR Tratada	AR	AR	AR	AR
MATRIZ	AR Tratada	AR	AR	AR	AR
FECHA DE MUESTREO	29/12/2023	29/12/2023	29/12/2023	29/12/2023	29/12/2023
CONDICIONES DE LA MUESTRA	PRESERVADA*REFRIGERADA				
CÓDIGO DE CLIENTE	MV08-III	AM-3	MV-09	MV-10	MV-11
CÓDIGO DE LABORATORIO	23122908	23122909	23122910	23122911	23122912
ENSAYO	RESULTADOS				
UNIDADES	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
DQO	1015.5	16992.1	4567.7	1538.9	978.6
DBO ₅	517.9	9924.9	-	-	-

PRESERVADA: la muestra se encuentra preservada según lo requiere el método de ensayo.

AR: Tratada: muestra de Agua Residual

AR: muestra de Agua Residual

Huancayo, 5 de Enero de 2024



Wlmer M. Espinoza Chénca
SUPER VISOR DE LABORATORIO

El informe de ensayo sólo es válido para las muestras referidas en el presente informe.
Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita del LABORATORIO DE ANÁLISIS AMBIENTAL GRUPO JHACC.
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de la calidad de la entidad que lo produce.

LAA-GJ