



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

**Diseño y optimización de un sistema de coagulación-floculación para el
tratamiento de agua residual del camal del cantón Pasaje**

**ARMIJOS CORREA KEVIN STEVEN
INGENIERO QUIMICO**

**DELGADO DAVILA MONICA DE FATIMA
INGENIERA QUIMICA**

**MACHALA
2022**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

**Diseño y optimización de un sistema de coagulación-floculación
para el tratamiento de agua residual del camal del cantón Pasaje**

**ARMIJOS CORREA KEVIN STEVEN
INGENIERO QUIMICO**

**DELGADO DAVILA MONICA DE FATIMA
INGENIERA QUIMICA**

**MACHALA
2022**



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA

TRABAJOS EXPERIMENTALES

**Diseño y optimización de un sistema de coagulación-floculación
para el tratamiento de agua residual del camal del cantón Pasaje**

**ARMIJOS CORREA KEVIN STEVEN
INGENIERO QUIMICO**

**DELGADO DAVILA MONICA DE FATIMA
INGENIERA QUIMICA**

CARCHI TANDAZO TANYA ALEXANDRA

**MACHALA
2022**

DISEÑO Y OPTIMIZACION DE UN SISTEMA DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL CAMAL DEL CANTÓN PASAJE

por Kevin Steven Armijos Correa - Mónica De Fátima Delgado Dávila

Fecha de entrega: 12-mar-2023 07:35p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2035555634

Nombre del archivo: Tesis_Armijos-Delgado.pdf (1.69M)

Total de palabras: 9915

Total de caracteres: 49747

DISEÑO Y OPTIMIZACION DE UN SISTEMA DE COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DEL CAMAL DEL CANTÓN PASAJE

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%

INDICE DE SIMILITUD

7%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1

dspace.udla.edu.ec

Fuente de Internet

<1%

2

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1%

3

www.derechoecuador.com

Fuente de Internet

<1%

4

Chee Yang Teh, Pretty Mori Budiman, Katrina Pui Yee Shak, Ta Yeong Wu. "Recent Advancement of Coagulation-Flocculation and Its Application in Wastewater Treatment", Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016

Publicación

<1%

5

Submitted to Universidad Santo Tomas

Trabajo del estudiante

<1%

6

Submitted to Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD, UNAD

Trabajo del estudiante

<1%

7	sedici.unlp.edu.ar Fuente de Internet	<1 %
8	Submitted to Universidad Pontificia Bolivariana Trabajo del estudiante	<1 %
9	repository.ugc.edu.co Fuente de Internet	<1 %
10	www.greentv.com.mx Fuente de Internet	<1 %
11	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %
12	mafiadoc.com Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	Submitted to Universidad Nacional de Trujillo Trabajo del estudiante	<1 %
15	biblat.unam.mx Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
17	zaguan.unizar.es Fuente de Internet	<1 %

18	Submitted to Universidad Estatal a Distancia Trabajo del estudiante	<1 %
19	documentop.com Fuente de Internet	<1 %
20	killkana.ucacue.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
21	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
22	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1 %
23	Submitted to University of La Guajira Trabajo del estudiante	<1 %
24	Marta P. Alves, Paulo R. Lourenço, Isabel Dimas. "Workgroup interdependence and satisfaction from a developmental perspective: the moderating role of the group's life cycle stage / Interdependencia y satisfacción en el grupo de trabajo desde la perspectiva del desarrollo: el rol moderador de la fase del ciclo de vida grupal", Revista de Psicología Social, 2017 Publicación	<1 %
25	www.arca.fiocruz.br Fuente de Internet	<1 %
26	maeguayas.files.wordpress.com Fuente de Internet	<1 %

27 Submitted to Universidad de San Buenaventura <1 %
Trabajo del estudiante

28 fitnessnutritionandtools.wordpress.com <1 %
Fuente de Internet

29 www.astrocity.net <1 %
Fuente de Internet

30 www.radio-city.com.ar <1 %
Fuente de Internet

31 doku.pub <1 %
Fuente de Internet

32 patents.google.com <1 %
Fuente de Internet

33 repositorio.unal.edu.co <1 %
Fuente de Internet

34 revistaschilenas.uchile.cl <1 %
Fuente de Internet

35 saio.org.ar <1 %
Fuente de Internet

36 www.finanzas.df.gob.mx <1 %
Fuente de Internet

37 www.medforex.net <1 %
Fuente de Internet

38

Nadia N. Sanchez-Pozo, Juan S. Mejia-Ordóñez, Diana C. Chamorro, Dagoberto Mayorca-Torres, Diego H. Peluffo-Ordóñez. "Predicting High School Students' Academic Performance: A Comparative Study of Supervised Machine Learning Techniques", 2021 Machine Learning-Driven Digital Technologies for Educational Innovation Workshop, 2021

Publicación

<1 %

39

bioline.org.br
Fuente de Internet

<1 %

40

comunidadcolombianads.com
Fuente de Internet

<1 %

41

dl.ubnt.com
Fuente de Internet

<1 %

42

dsn.pe
Fuente de Internet

<1 %

43

dspace.uib.es
Fuente de Internet

<1 %

44

dspace.ups.edu.ec
Fuente de Internet

<1 %

45

es.scribd.com
Fuente de Internet

<1 %

46

moam.info
Fuente de Internet

<1 %

47	ridum.umanizales.edu.co Fuente de Internet	<1 %
48	worldwidescience.org Fuente de Internet	<1 %
49	www.alboranpsicologia.com Fuente de Internet	<1 %
50	www.caribvet.net Fuente de Internet	<1 %
51	www.dnp.gov.co Fuente de Internet	<1 %
52	www.elcaribe.com.do Fuente de Internet	<1 %
53	www.jove.com Fuente de Internet	<1 %
54	www.provegran.com Fuente de Internet	<1 %
55	www.unisdr.org Fuente de Internet	<1 %
56	Blanca Abril Gisbert. "Aplicación de tecnologías emergentes para la obtención de Zinc-protoporfirina y proteínas funcionales a partir de co-productos cárnicos", Universitat Politecnica de Valencia, 2023 Publicación	<1 %

57	Submitted to Escuela Politecnica Nacional Trabajo del estudiante	<1 %
58	Submitted to Universidad de Pamplona Trabajo del estudiante	<1 %
59	dokumen.pub Fuente de Internet	<1 %
60	es.mongabay.com Fuente de Internet	<1 %
61	id.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
62	issuu.com Fuente de Internet	<1 %
63	www.aranzadi-zientziak.org Fuente de Internet	<1 %
64	www.limakendoclub.com Fuente de Internet	<1 %
65	www.no.marxist.com Fuente de Internet	<1 %
66	www.pce-iberica.es Fuente de Internet	<1 %
67	www.semanticscholar.org Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas Apagado

Excluir coincidencias Apagado

Excluir bibliografía Apagado

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, ARMIJOS CORREA KEVIN STEVEN y DELGADO DAVILA MONICA DE FATIMA, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado Diseño y optimización de un sistema de coagulación-floculación para el tratamiento de agua residual del camal del cantón Pasaje, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



ARMIJOS CORREA KEVIN STEVEN

0706391091



DELGADO DAVILA MONICA DE FATIMA

0704580505

UNIVERSITAS
MAGISTRO-
RUM
ET SCHOLAR-
IUM

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación lo dedico en primer lugar a Dios, por haberme permitido llegar a este momento importante en mi formación académica y personal. A mi madre, Mónica y mi abuelita Teresa, quienes son mi mayor motivación y ejemplo, por ofrecerme su apoyo incondicional, esfuerzo y amor desde el inicio de la carrera. A mis tías Teresa, Graciela y mi madrina Marilín, por estar siempre pendiente de mí y darme su cariño. A mi hermano Fernando y mi cuñada Tania, por brindarme su cariño y cuidado.

A mi tutora, Ing. Tanya Carchi y el Ing. Byron Lapo, por la paciencia, confianza, apoyo y los sabios consejos que nos brindaron durante este tiempo. A mi amigo y compañero, Kevin Armijos, por la paciencia, esfuerzo y tiempo dedicado para realizar este trabajo. A mi amiga Nathaly y mi grupo, por habernos apoyado durante todos estos años de formación académica, por su alegría, cariño, ejemplo de amistad y apoyo en los momentos de alegrías y tristezas.

Mónica de Fátima Delgado Dávila

El presente trabajo de titulación lo dedico principalmente a Dios, por ser quien me guio y dio fuerzas para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis padres y hermano, por siempre brindarme su amor, trabajo y sacrificio a lo largo de todos estos años, gracias a ellos he logrado llegar hasta aquí y convertirme en un excelente profesional. A mi abuelita, quien no pudo verme cumplir esta meta, pero desde el cielo siempre me cuida y se ha convertido en mi ángel. También a mis tías, por siempre estar prestas a brindarme su ayuda siempre que lo necesité.

Kevin Steven Armijos Correa

AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradecemos a Dios, por permitirnos culminar con éxito una de las etapas más maravillosas, como lo es nuestra carrera universitaria. Gracias a nuestros padres, por ser quienes nos motivan día a día para seguir adelante y ser mejores personas, por su sacrificio y esfuerzo para que hoy logremos cumplir una meta más en nuestras vidas. A nuestros hermanos y familiares, por su cariño y consejos en cada momento.

A nuestros amigos: Angie, Nathaly, Adolfo, Ermel, Davis, Bruce y Hoover, por ser quienes nos brindaron su apoyo incondicional y amistad sincera durante este tiempo. A nuestra tutora, Ing. Tanya Carchi e Ing. Byron Lapo, por la confianza depositada en nosotros, paciencia y el tiempo dedicado en el proceso de titulación.

Mónica de Fátima Delgado Dávila

Kevin Steven Armijos Correa

RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó el proceso de coagulación-floculación como una alternativa para remover partículas suspendidas del agua residual proveniente de los procesos de faenamiento del Camal Municipal del Cantón Pasaje, provincia de El Oro, con el objetivo de mejorar la calidad de agua emanada al sistema de alcantarillado. El enfoque de la investigación se dirigió en conocer la eficiencia del tratamiento de coagulación-floculación, centrándose en buscar la dosificación óptima de coagulante y floculante, para ser aplicado a nivel industrial. Mediante un test de jarras se realizó las distintas pruebas para establecer la dosificación óptima de coagulante PCA (policloruro de aluminio tipo A) y floculante (poliacrilamida catiónica). Para la experimentación de las pruebas se utilizó el programa Design Expert 11, con un diseño central compuesto, donde se midieron tres parámetros relevantes como turbidez, sedimentos y pH. A través del programa anterior mencionado, se efectuó un diseño factorial compuesto, del cual se obtuvieron 19 experimentos que fueron realizados por duplicado, es decir, 38 muestras en total. Para encontrar la dosificación óptima los factores fueron turbidez (NTU) y cantidad de sedimento (ml) y; los niveles de cada factor fueron la concentración máxima y mínima de coagulante 1300 y 700 mg/L, y de floculante 0,3 y 0,2 mg/L.

Los resultados obtenidos de los 38 experimentos, se dividieron para las 3 variables de respuesta: para turbidez se obtuvo una gran variedad de resultados, dependiendo de las distintas concentraciones adicionadas, logrando disminuir gran cantidad de partículas suspendidas, llegando a valores de hasta 2,52 NTU de turbidez. El análisis estadístico que se realizó mediante el software, determinó que el modelo de regresión se ajustaba a los datos reales, obteniendo un R^2 pronosticado de 0,9795 que está en relación con el R^2 ajustado de 0,9831.

Para los sedimentos se obtuvieron resultados que permitieron constatar la efectividad del método, dando un valor de 459,541 ml de sedimentos. El análisis estadístico determinó que en el modelo 2FI se tiene un R^2 pronosticado en el programa de 0,9468 que está en concordancia con el R^2 ajustado de 0,9552. En cuanto al pH, este parámetro no se vio afectado al adicionar los agentes químicos.

Los resultados obtenidos de los factores de turbidez y sedimentos, fueron contrastados con un Diagrama de Pareto, el cual permitió tener una mejor visión de cómo incide la adición de coagulante (factor A), floculante (factor B) o la combinación de ambos (factor AB) para mejorar la calidad del agua problema. Al igual que la superficie de respuesta proporcionada por el software Design Expert, el Diagrama de Pareto permitió visualizar que, tanto para la remoción de turbidez, como sedimentos, el factor A tiene un mayor

efecto.

Finalmente, los resultados arrojaron que la dosificación óptima para la muestra de agua de canal de pasaje fue de 846,84 mg/L para coagulante (policloruro de aluminio) y 0,3 mg/L para floculante (poliacrilamida catiónica). Estos valores fueron validados con una prueba adicional, donde los resultados comprobaron la eficiencia del proceso, con una turbidez de 17,4 NTU y 150 ml de lodos sedimentados.

Palabras clave: Coagulación, floculación, dosis optima de coagulante-floculante, ANOVA.

ABSTRACT

In the present work, the coagulation-flocculation process was evaluated as an alternative to remove suspended particles from the wastewater from the slaughtering processes of the Municipal Camal of Pasaje, El Oro province, with the objective of improving the quality of the water emanating into the sewage system. The focus of the research was to determine the efficiency of the coagulation-flocculation treatment, focusing on finding the optimum dosage of coagulant and flocculant to be applied at the industrial level. By means of a jar test, different tests were carried out to establish the optimum dosage of coagulant PCA (type A aluminum polychloride) and flocculant (cationic polyacrylamide). For the experimentation of the tests, the Design Expert 11 program was used, with a central composite design, where three relevant parameters such as turbidity, sediment and pH were measured. Using the aforementioned program, a compound factorial design was carried out, from which 19 experiments were obtained, which were carried out in duplicate, i.e. 38 samples in total. To find the optimum dosage, the factors were turbidity (NTU) and amount of sediment (ml) and; the levels of each factor were the maximum and minimum concentration of coagulant 1300 and 700 mg/L, and of flocculant 0.3 and 0.2 mg/L.

The results obtained from the 38 experiments were divided for the 3 response variables: for turbidity, a great variety of results were obtained, depending on the different concentrations added, achieving a large reduction in the amount of suspended particles, reaching values of up to 2.52 NTU of turbidity. The statistical analysis performed by the software determined that the regression model adjusted to the real data, obtaining a predicted R^2 of 0.9795, which is in relation to the adjusted R^2 of 0.9831.

For the sediments, results were obtained that confirmed the effectiveness of the method, giving a value of 459.541 ml of sediments. The statistical analysis determined that the 2FI model has a predicted R^2 in the program of 0.9468, which is in agreement with the adjusted R^2 of 0.9552. As for pH, this parameter was not affected by the addition of the chemical agents.

The results obtained for the turbidity and sediment factors were contrasted with a Pareto Diagram, which allowed a better view of how the addition of coagulant (factor A), flocculant (factor B) or the combination of both (factor AB) affects the quality of the problem water. As well as the response surface provided by the Design Expert software, the Pareto Diagram allowed visualizing that, both for turbidity and sediment removal, factor A has a greater effect.

Finally, the results showed that the optimum dosage for the water sample from the passage bed was 846.84 mg/L for coagulant (aluminum polychloride) and 0.3 mg/L for flocculant (cationic polyacrylamide). These values were validated with an additional test, where the results proved the efficiency of the process, with a turbidity of 17.4 NTU and 150 ml of settled sludge.

Key words: Coagulation, flocculation, optimum coagulant-flocculant dosage, ANOVA.

CONTENIDO

	pág.
DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTO	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	V
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE ANEXOS	XII
INTRODUCCIÓN.....	13
OBJETIVOS	15
Objetivo General	15
Objetivos Específicos	15
CAPITULO I	16
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1. Agua residual	16
1.1.1. Efectos de polución por las aguas residuales.....	16
1.1.2. Agua residual procedentes de camal.....	16
1.2. Parámetros operacionales para el tratamiento de las aguas residuales del camal 17	
1.2.1. Caracterización del agua residual.....	17
1.2.2. Influencia de los parámetros.....	18
1.3. Coagulación-Floculación.....	20

1.3.1.	Partículas en suspensión.	20
1.3.2.	Partículas coloidales.....	20
1.3.3.	Coagulación.....	21
1.3.4.	Floculación.....	23
1.3.5.	Test de jarras.....	24
1.3.6.	Descripción del proceso de coagulación – floculación.	25
1.3.7.	Parámetros operativos del sistema de coagulación-floculación.....	25
1.4.	Diseño factorial 2^k	25
1.4.1.	Diseño factorial 2^2	25
1.4.2.	Superficie de respuesta.....	28
1.4.3.	Diseño central compuesto.....	29
CAPITULO II		30
2.	METODOLOGIA	30
2.1.	Ubicación del estudio.....	30
2.2.	Identificación de variables.....	30
2.3.	Muestreo.....	31
2.4.	Materiales, reactivos y equipos	31
2.5.	Desarrollo experimental	32
2.5.1.	Coagulación-Floculación	32
2.5.2.	Diseño experimental.....	32
2.5.3.	Test de Jarras.....	33
2.6.	Métodos de análisis	34
2.6.1.	pH.....	34

2.6.2. Turbidez.....	34
2.6.3. Sólidos sedimentables.....	34
CAPITULO III.....	36
3. RESULTADOS.....	36
3.1. Evaluación del proceso de Coagulación-Floculación.....	36
3.1.1. Diseño Central Compuesto.	36
3.1.2. Análisis estadísticos de la dosificación de coagulante y floculante.....	36
3.2. Validación del modelo.....	50
4. CONCLUSIONES.....	53
5. RECOMENDACIONES.....	54
BIBLIOGRAFIA.....	55
ANEXOS.....	60

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Estabilidad de los coloides en el agua.....	20
Figura 2. Interacción entre partículas con carga negativa.....	21
Figura 3. Representación geométrica del diseño.....	27
Figura 4. Regiones de operabilidad y.....	28
Figura 5. Superficies de respuestas de primer y segundo orden	29
Figura 6. Ubicación de la zona de estudio	30
Figura 7. Valores de predicción vs actual de turbidez	39
Figura 8. Líneas de contorno de la.....	40
Figura 9. Superficie de respuesta: Coagulación-Floculación para	41
Figura 10. Superficie de respuesta: Coagulación-Floculación	41
Figura 11. Diagrama de Pareto para turbidez.....	44
Figura 12. Valores de predicción vs	46
Figura 13. Líneas de contorno de la.....	46
Figura 14. Superficie de respuesta: Coagulación-Floculación para	47
Figura 15. Superficie de respuesta: Coagulación-Floculación	47
Figura 16. Diagrama de Pareto para los Sedimentos.....	50
Figura 17. Agua residual del camal Municipal del cantón Pasaje antes y después.....	52

LISTA DE TABLAS

	pág.
TABLA 1. Tratamientos del diseño factorial 2 ²	26
TABLA 2. Diseño Central Compuesto	32
TABLA 3. Número de pruebas obtenidas en el software Design Expert	33
TABLA 4. Resultados de pruebas jarras	37
TABLA 5. Contribución de términos y significancia en	38
TABLA 6. ANOVA para el modelo cuadrático	38
TABLA 7. Cálculo de efectos para la turbidez	43
TABLA 8. Contribución de términos y significancia	45
TABLA 9. ANOVA para el modelo cuadrático	45
TABLA 10. Diagrama de Pareto para sólidos sedimentables	49
TABLA 11. Dosificación óptima de Coagulante-Floculante	51
TABLA 12. Validación de la dosificación óptima	51

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Solución de Floculante 100ppm; Solución de Coagulante 50000ppm.....	60
Anexo B. Muestra problema pre-tratamiento	60
Anexo C. Simulación Test de Jarras	61
Anexo D. Agua tratada pre-sedimentación	61
Anexo E. Agua tratada post-sedimentación	62
Anexo F. Sedimentación en Cono Imhoff.....	62
Anexo G. Medición de turbidez.....	63

INTRODUCCIÓN

Es muy considerable la proporción de aguas residuales que se vierten en el medio ambiente sin que se hayan recogido o tratado previamente. Esto es especialmente cierto en las naciones de bajos ingresos donde sólo se trata un 8% de las aguas residuales domésticas e industriales, un porcentaje muy escaso si se compara con el 70% registrado en los países de ingresos altos. Debido a esa falta de tratamiento, en muchas regiones del mundo se vierten aguas residuales contaminadas por bacterias, nitratos, fosfatos y disolventes en lagos y ríos que van al mar, con las consiguientes repercusiones negativas para el medio ambiente y la salud en general.¹

Las distintas actividades realizadas por el hombre han provocado que la calidad del agua sufra un deterioro por la cantidad de contaminantes que se emanan a los sistemas de alcantarillado sin un previo tratamiento. En la actualidad la protección del medio ambiente ha sido cada vez de mayor interés, con el fin de regular aquellas actividades que puedan causar un problema ambiental. La población de América Latina se encuentra concentrada en ciudades en más de un 80%, donde el 70% de las aguas residuales no cuentan con un tratamiento, impidiendo así el cumplimiento del ciclo del agua.²

La contaminación con agentes patógenos procedentes de los excrementos humanos y animales afecta a casi un tercio de los cursos fluviales de América Latina, África y Asia, poniendo así en peligro la vida de millones de personas. Las carencias en el tratamiento de las aguas residuales contribuyen a la propagación de enfermedades tropicales como el cólera y el dengue.³

Las plantas de sacrificio y faenado de animales destinados para el abasto público, son las industrias altamente contaminantes porque en su mayoría no cumplen con medidas técnico sanitarias y generan gran cantidad de desechos. El grado de contaminación de las aguas residuales de camales depende del tipo de animal y proceso de sacrificio, protocolos de limpieza y equipos que se utilicen.⁴ Estos efluentes tienen una carga orgánica, demanda química de oxígeno (DBO) y de nutrientes media-alta (sangre) con un contenido importante de sólidos en suspensión (rumen), grasas y aceites.⁵

Son muchos los procesos que se utilizan para el tratamiento de aguas residuales

provenientes de mataderos, entre los cuales la coagulación y floculación permite remover la materia orgánica contenida en este tipo de aguas, obteniendo una mejor calidad del efluente.⁶

El proceso de coagulación-floculación, consiste en adicionar al agua a tratar los aditivos químicos, con el objetivo de que se pueda dar la sedimentación de aquella materia orgánica que no ha podido ser sedimentada aún, ya que la materia coloidal será desestabilizada por los coagulantes y floculantes que sean agregados.⁷ De la misma manera, se dará un tiempo de sedimentación más rápido.

Hasta la actualidad no se han encontrado registros sobre estudios de tratamientos de aguas residuales en el camal, ni a la problemática ambiental que este genera, por lo cual se ve necesario realizar este proyecto.

El objetivo de este trabajo es diseñar un sistema de coagulación-floculación para mejorar la calidad de agua residual del camal del cantón Pasaje mediante un diseño de superficie de respuesta. A través de este estudio se espera establecer medidas viables que permitan tratar las aguas residuales generadas durante el faenamiento animal, para de esta manera puedan ser vertidas a su cauce natural sin afectar el medio ambiente y, cumpliendo con los límites máximos permisibles establecidos en la normativa del Ministerio del Ambiente vigente.⁸

OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar y optimizar un sistema de coagulación-floculación para mejorar la calidad de agua residual del camal del Municipio del cantón Pasaje, mediante un diseño de superficie de respuesta.

Objetivos Específicos

- Establecer los parámetros operacionales para el sistema de tratamiento de coagulación-floculación.
- Realizar un diseño experimental para optimizar los parámetros de un sistema de tratamiento de coagulación-floculación del agua residual proveniente del camal del cantón Pasaje.
- Evaluar la eficiencia del sistema de coagulación-floculación para mejorar la calidad del agua residual del Camal Municipal del Cantón Pasaje.

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Agua residual

Es aquel líquido que ha sufrido impactos de forma negativa, alterando así de forma significativa sus propiedades físicas, químicas, biológicas o su composición, por lo que se ve afectada su calidad original.⁹

La contaminación del agua causada proveniente de alguna actividad industrial es una amenaza para el equilibrio ecológico y la salud humana, por lo cual es necesario un tratamiento de aguas residuales.¹⁰

1.1.1. *Efectos de polución por las aguas residuales.* Toda agua residual afecta la calidad del agua de la fuente o cuerpo receptor. Sin embargo, se dice que una agua residual causa polución únicamente cuando existen condiciones o características que hacen que el agua de la fuente o cuerpo receptor sea inaceptable para su uso previsto.⁸

1.1.2. *Agua residual procedentes de camal.* Las aguas residuales procedentes de los procesos realizados en un matadero, poseen una alta carga contaminante de materia orgánica tanto disuelta como en suspensión, está constituida por proteínas y su producto de descomposición, como: ácidos orgánicos volátiles, aminos y compuestos orgánicos nitrogenados.⁸

1.1.2.1. *Características de los residuos.* Los residuos generados luego del proceso de faenamiento ocasionan graves problemas de contaminación al no darles un manejo adecuado, este tipo de materia orgánica contaminante es de diferente naturaleza, como: residuos sólidos, residuos líquidos y residuos gaseosos.¹¹

- *Fuentes y características de los residuos sólidos.*

Al no tener un tratamiento o almacenamiento adecuado, los residuos sólidos tras su descomposición ponen en riesgo la salud de la población al ser fuente directa para la presencia de vectores de enfermedades.

La generación de residuos sólidos proviene principalmente de los corrales, del proceso

de descuerado y corte, y de la evisceración.⁸ En el descuerado, se genera pezuñas, huesos y cueros, mientras que en la evisceración se genera el rumen o el contenido de los estómagos del ganado vacuno. El rumen está protegido por un epitelio queratinizado estratificado sin glándulas y todos los procesos digestivos en el rumen resultan exclusivamente de la digestión fermentativa.¹²

- *Fuentes y características de los residuos líquidos*

Los efluentes líquidos, generalmente tienen temperaturas un poco elevadas y contienen elementos patógenos, altas concentraciones de compuestos orgánicos y nitrógeno; además, contienen sangre que es la materia causante de mayor contaminación, estiércol, pelos, grasas, huesos, proteínas y otros contaminantes. Estos residuos líquidos son producto de corrales, área de sangría, remoción de cueros, pelos y otras partes no comestibles, procesamiento de vísceras, intestinos y operaciones de operaciones de limpieza.⁸

- *Fuentes y características de los residuos gaseosos*

Las emisiones al aire no constituyen una preocupación ambiental en los mataderos, sin embargo, no puede obviarse que en muchos casos hay generación de malos olores, provenientes de la descomposición del residuo sólido, animales que son altamente putrefactos y de los corrales.⁸

1.2. Parámetros operacionales para el tratamiento de las aguas residuales del camal

1.2.1. *Caracterización del agua residual.* El agua proveniente de los mataderos provoca un grave impacto, tanto en la salud como medio ambiente, teniendo en cuenta que en el proceso de sacrificio hay una descarga masiva de agua con numerosos puntos donde se da una contaminación, como: recepción de animales y lavado de camiones, estabulación, sangrado, eviscerado y lavado, etc.^{13,14}

1.2.1.1. *Características Físicas.* Las características físicas más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos, término que abarca la materia en suspensión, materia sedimentable, materia coloidal y materia disuelta.

Otras características físicas significativas son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbidez.⁵

- **Sólidos:** En la caracterización de estas aguas hay tres tipos de sólidos no sedimentables: suspendidos, coloidales y disueltos. Analíticamente, se define el contenido de sólidos totales como la materia que se obtiene como residuo después de someter el agua a un proceso de evaporación entre 103 °C y 105 °C.¹⁵
- **Color:** El color de las aguas residuales es causado por los sólidos suspendidos, material coloidal y sustancias en solución. El color causado por los sólidos suspendidos se llama color aparente mientras que el color causado por sustancias disueltas y coloidales se denomina color verdadero. El color verdadero se obtiene sobre una muestra filtrada.¹⁵
- **Olor:** En un agua residual fresca el olor generalmente es inofensivo, pero cuando se origina la degradación biológica de la materia bajo condiciones anaerobias de las aguas residuales se liberan una gran cantidad de compuestos malolientes. El principal compuesto de olor indeseable es el sulfuro de hidrógeno (olor a huevo podrido).¹⁵
- **Turbidez:** Cuando existe un mayor grado de turbidez (NTU) el agua pierde su transparencia y se encuentra más contaminada debido a la cantidad de materia en suspensión, por esta razón se dificulta la depuración del agua.

1.2.1.2. *Características Químicas.* El estudio de las características químicas de las aguas residuales engloba: la materia orgánica, la medición del contenido orgánico, la materia inorgánica, y los gases presentes en el agua residual.¹⁵

- **Materia orgánica:** Está formada por residuos animales y vegetales que una vez que se encuentra retenida en un medio filtrante puede ser removida por microorganismos, estos degradan la materia orgánica, ya que sirven de fuente de alimento para así realizar los procesos metabólicos.
- **pH:** Mediante este se puede conocer si la solución se encuentra en condiciones ácidas o básicas, este parámetro es importante ya que con un pH óptimo permite una mayor proliferación de microorganismos.
- **Grasas y aceites:** Estos hacen parte del material flotante en aguas residuales de camal, originando una contaminación del agua, esto se da por la película de grasa impide la transferencia de gases, también provoca fuertes olores emitidos por la descomposición del agua.

1.2.2. *Influencia de los parámetros.* Se evalúa el efecto que tienen los parámetros de diseño para la remoción de carga contaminante, entre los cuales se tiene: caudal volumétrico, dosificación de coagulantes-floculantes, presión y tiempo de

sedimentación, los cuales se detallan a continuación:

1.2.2.1. *Caudal volumétrico*. Es identificado con el flujo de volumen que pasa a través de un área en un tiempo determinado. Para calcular el caudal en el canal del cantón Pasaje se usó un método sencillo, que consiste en medir el tiempo que se tarda en llenar un recipiente, cuyo volumen es conocido.

Se calcula el caudal volumétrico con la ecuación 1:

$$Q = V/t \quad \text{ec. 1}$$

Dónde:

Q = caudal ($m^3 \cdot s^{-1}$)

V = volumen (m^3)

t = tiempo (s)

1.2.2.2. *Dosificación de coagulantes-floculantes*. En la selección de un químico de tratamiento de aguas residuales, para lograr una coagulación y floculación efectiva es importante comprender cómo los coloides interactúan individualmente. Es indispensable conocer la viabilidad de la tecnología de coagulación-floculación en el tratamiento de aguas residuales para mantener un control de la contaminación.¹⁶ Debe tener un mezclado instantáneo, intenso y rápido, para así bajar la carga superficial de las partículas.

1.2.2.3. *Tiempo de sedimentación*. La sedimentación es un proceso que consiste en la separación por la acción de gravedad. Se da cuando el peso específico de las partículas que están en suspensión es mayor que el agua.¹⁷

1.3. Coagulación-Floculación

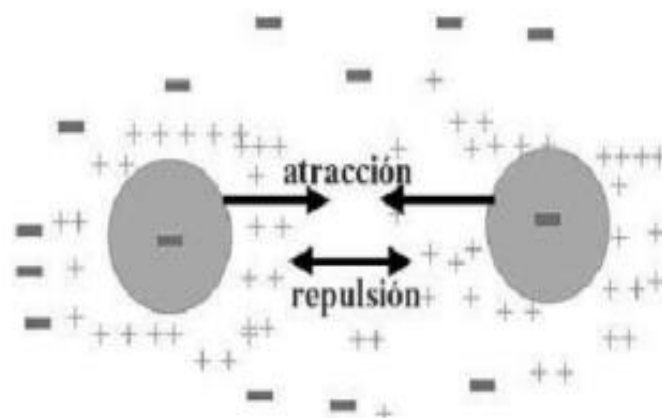
1.3.1. *Partículas en suspensión.* Las aguas residuales provenientes de camal tendrán gran cantidad de partículas suspendidas que provienen de descomposición de materia orgánica y los distintos procesos que se realizan desde el faenamiento, hasta la limpieza del lugar.

Por esta razón se utiliza procesos como coagulación, floculación, sedimentación y flotación, que permitan desestabilizar dichas partículas.¹⁸

1.3.2. *Partículas coloidales.* Este tipo de partículas pueden provocar varios fenómenos de superficie presentes en el agua. Considerando que estas pueden tener de 1 nm- 10 μm de diámetro, su presencia puede causar una elevada turbidez en el agua.¹⁹

1.3.2.1. *Afinidad de las partículas coloidales por el agua.* Las partículas coloidales cuentan con una gran afinidad por el agua, conociéndolas, así como hidrofílicas y también pueden repeler el agua, siendo hidrofóbicos. Aquellas partículas que son hidrofílicas se dispersan y atraerán las moléculas de agua, por lo general estas provienen de materia inorgánica. Mientras que las hidrófobas no se pueden dispersar en el agua con la misma facilidad, estas se originan de materia orgánica y van a requerir el uso de químicos para poder ser eliminadas.¹⁸ En la **figura 1**, se observa la estabilidad de los coloides en el agua.

Figura 1. Estabilidad de los coloides en el agua

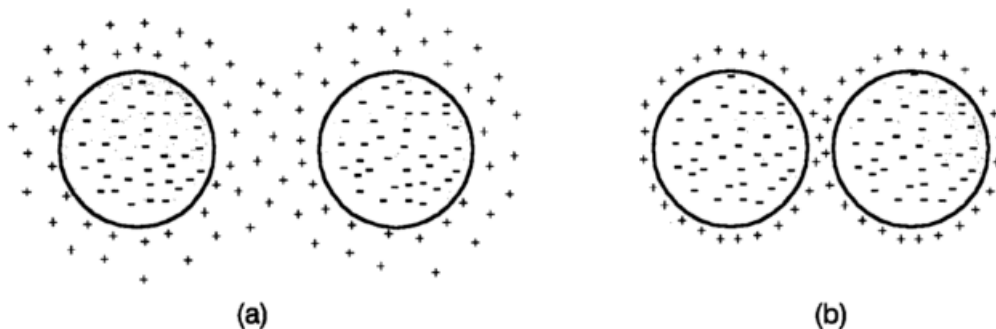


Fuente:¹⁸

1.3.2.2. *Interacción eléctrica.* Las partículas coloidales tienen carga eléctrica negativa

en la parte superficial. Estas son llamadas cargas primarias, que van a atraer a los iones de agua positivos, que se unen a las partículas y atraen los iones negativos que están a su alrededor.²⁰ En la **figura 2** se muestran como interaccionan las partículas con carga negativa, el solapamiento que ocurre en sus capas de contra iones; en la **figura a** una baja fuerza iónica y en la **figura b** una alta fuerza para ionizar.

Figura 2. Interacción entre partículas con carga negativa



Fuente:²⁰

1.3.3. *Coagulación.* Uno de los procesos más utilizados para un sistema de tratamiento de aguas residuales es la coagulación, siendo este un fenómeno común en la naturaleza, que permite dar paso a la combinación de partículas pequeñas, para generar partículas de mayor dimensión.²¹ Este proceso permite remover las partículas coloidales y suspendidas que se encuentran en el agua, disminuyendo su turbidez y color.²²

En el proceso de coagulación va a existir una desestabilización de las partículas coloidales, esto se debe a la adición de un agente químico llamado coagulante, los cuales serán encargado de desestabilizar la materia suspendida de la carga coloidal.²³

1.3.3.1. *Factores que influyen en la coagulación.* Los factores que influyen en la coagulación son:²⁴

- **Tamaño de partículas:** Es un factor muy importante, ya que aquellas partículas que tienen un diámetro entre una y cinco micras serán usadas como núcleo del floc, mientras que aquellas que tienen un diámetro superior no se pueden incorporar al floc debido a su gran tamaño.
- **Valencia:** Mientras mayor sea la valencia del ión, será más efectivo el coagulante.
- **Capacidad de cambio:** Es la tendencia a reemplazar aquellos cationes que

poseen baja valencia por unos con mayor valencia, de manera que haya una desestabilización y posteriormente una aglomeración rápida de las partículas.

- Relación cantidad-tiempo: La cantidad de coagulante adicionado va a ser inversamente proporcional al tiempo en que se da la formación del floc.

1.3.3.2. *Tipos de coagulantes.* Actualmente se encuentra una gran variedad de agentes coagulantes en el mercado, pueden ser naturales o sintéticos, para lo cual se busca principalmente aquellos coagulantes con ventajas económicas en relación con los productos que se encuentran en el mercado, las propiedades que los caracterizan, que estas no sean contaminantes y sobre todo que sean relativamente eficientes.

Los coagulantes comunes aplicados en tratamientos de aguas residuales como lo son las sales inorgánicas, se clasifican en coagulantes orgánicos con moléculas pequeñas y coagulantes poliméricos inorgánicos.²⁵

1.3.3.3. *Sales de aluminio.* Los coagulantes más prácticos en el tratamiento de aguas son las sales a base de Al y Fe. Las especies de Al aplicadas durante el proceso de coagulación, son fundamentales para determinar el comportamiento y la eficiencia que puedan tener los coagulantes a base de Al.²⁶ Dentro de los coagulantes más utilizados se puede mencionar al sulfato férrico, sulfato de aluminio y policloruro de aluminio.²⁷

a) Sulfato de aluminio

Para la aplicación de sulfato de aluminio utilizado como un coagulante, se debe tener presente que la formación óptima de los flóculos se da cuando este tiene un pH entre 6.0 a 8.0.²⁸ Sin embargo, si este es comparado con el policloruro de aluminio, no forma flóculos de manera inmediata y posee menos velocidad para sedimentar las partículas suspendidas.²²

b) Policloruro de Aluminio

Este coagulante químico inorgánico es aplicado para los tratamientos de agua residual, es un polímero inorgánico, capaz de formar flóculos pesados ya que cuenta con una velocidad rápida de agregación y su dosificación es menor, lo cual provoca a un menor volumen de sedimentos,²⁹ puede clarificar efluentes, se caracteriza por ser de color amarillo, soluble en agua, cuenta con un rango de pH que va de 5 a 9. A diferencia del sulfato de aluminio, este tiene mayor velocidad para sedimentar las partículas y a su vez

clarificar el agua, obteniendo así la remoción de turbidez en aguas con alta concentración de partículas suspendidas.²²

El PCA como coagulante mejora la estructura del floculo, elevando de manera efectiva la estructura e intensidad que tiene este, convirtiéndose en un coagulante efectivo para tratamiento de aguas residuales.³⁰

1.3.3.4. *Tipos de coagulación.* En el proceso de coagulación se cuenta con dos tipos: absorción y por barrido.

- *Coagulación por adsorción*

Se presenta cuando se tiene una alta concentración de partículas en estado de suspensión; cuando se añade coagulante al agua los productos solubles de estos son absorbidos por las partículas coloidales, dando paso a la formación de flóculos en un tiempo inmediato.¹⁸

- *Coagulación por barrido*

La coagulación por barrido se da cuando se tiene un agua con baja turbidez y sus partículas coloidales son pequeñas; ocurre una sobresaturación de precipitado de coagulante, de tal manera que las partículas serán atrapadas.¹⁸

1.3.4. *Floculación.* Este proceso se realiza luego de la coagulación, aquí se van a aglomerar aquellas partículas finas que fueron desestabilizadas,³¹ de tal manera que permitan dar paso a la formación de un aglomerado de flóculos con mayor volumen y peso requerido para una sedimentación más fácil.²²

1.3.4.1. *Tipos de floculantes.* Los floculantes son polímeros que, al captar las partículas en suspensión, darán paso a la formación de flóculos de gran tamaño. Estos polímeros pueden clasificarse en tres clases de floculantes: aniónicos, catiónicos y no iónicos. Al igual que la diversidad de coagulantes usados en la industria, actualmente se utiliza floculantes como la poliacrilamida catiónica y aniónica para tratar las aguas residuales industriales.³² Los aniónicos sedimentan partículas minerales, los catiónicos van a sedimentar aquellas partículas que son de origen orgánico y, los no iónicos permiten sedimentar tanto partículas inorgánicas como orgánicas.³³

1.3.4.2. *Factores que influyen en el proceso de floculación.* Los factores que influyen en la floculación del agua a tratar son la concentración y naturaleza de partículas, tiempo de detención y gradiente de rapidez.²⁴

- Concentración y naturaleza de las partículas: La velocidad con la que se da la formación de floc va a ser proporcional a la concentración de partículas.
- Tiempo de detención: El tiempo en que tarda en aglomerar las partículas es proporcional al tiempo de detención.
- Gradiente de rapidez: Hace referencia al límite máximo de gradiente que no puede ser sobrepasado.

1.3.5. *Test de jarras.* Este es uno de los métodos que se usan con mayor frecuencia para evaluar y determinar la dosis óptima de los químicos. En este se simula el proceso de coagulación, floculación y la sedimentación de los lodos a nivel de laboratorio.³⁴

El realizar el test de jarras se realiza con una serie de experimentos con dosificaciones diferentes en cada jarra, con el fin de comparar y analizar cada uno de los resultados obtenidos en los parámetros a estudiar. Aquí se determinará cual es el agua que tiene una mayor turbidez (NTU) y, posteriormente se estudia el efecto que se produce en el pH en la reducción de turbidez, de tal manera que permita conocer los mejores resultados.³⁵

1.3.5.1. *Condiciones del test de jarras.* Unas de las principales condiciones que se debe tener en cuenta en este tipo de pruebas, es la agitación que se realice y el tiempo que tardan en sedimentar las partículas. Existen dos tipos de agitación de acuerdo al proceso de coagulación-floculación:

- Agitación rápida: Se aplica para crear el movimiento necesario, que permita que los reactivos químicos y las partículas en el agua puedan tener contacto, de forma que se neutralicen sus cargas, desestabilicen y puedan aglomerarse en un periodo de tiempo corto. Generalmente su intervalo de tiempo es de 1 a 3 minutos y 30 a 100 rpm.¹⁸
- Agitación lenta: Al extender el tiempo de agitación, se puede tener una mayor eficiencia al crear un calentamiento en la muestra de agua, pero esto afecta a la sedimentación debido a que se liberan gases que pueden dar paso a la formación de burbujas y hacer que floten junto a los flóculos.¹⁸ Por lo general, va de un tiempo de 15 hasta 25 min, de 20 a 60 rpm.
- Reposo: Para el tiempo de sedimentación se recomienda un mínimo de 30

minutos.¹⁸

1.3.6. *Descripción del proceso de coagulación – floculación.* El tratamiento del agua residual va a consistir en la aplicación de varios procesos unitarios que permitan eliminar la carga contaminante presente en el agua. Para el proceso de coagulación-floculación se realizan los respectivos estudios a escala laboratorio, donde se realizan pruebas de jarras con el fin de encontrar una dosis adecuada, que permita remover la materia coloidal que no se ha podido sedimentar. El proceso se da por la adición de agentes químicos.⁷

1.3.7. *Parámetros operativos del sistema de coagulación-floculación*

1.3.7.1. *Turbidez y pH.* La turbidez es un parámetro que a través de un análisis rápido permite evaluar el comportamiento del modelo de coagulación-floculación, el cual tiene como objetivo remover las partículas en suspensión.³⁶ Mientras que el pH, tiene el efecto para lograr una óptima eficiencia, ya que con este se determina la calidad de agua residual, debido a que tiene incidencia en cómo interactúan los ecosistemas. Si este valor es alterado, se van a perturbar los procesos biológicos y pueden existir consecuencias no favorables.

1.3.7.2. *Agitación de mezcla.* La eficiencia que se pueda obtener de este proceso se determina por este parámetro, ya que la agitación que se realice entre el agua y los agentes químicos de coagulación y floculación van a permitir que la concentración sea uniforme.³⁷

1.4. **Diseño factorial 2^k**

Es uno de los diseños que tiene gran impacto dentro de la industria e investigación, esto se debe a su versatilidad y eficiencia. Estos factoriales 2^k son utilizados cuando los factores a estudiar están entre 2 y 5, permitiendo aplicar tratamientos que van desde 4 a 32; número de experimentos que pueden ser manejables para encontrar soluciones en una investigación experimental.³⁸

1.4.1. *Diseño factorial 2².* El diseño factorial 2² permite estudiar dos factores tomando en cuenta dos niveles para cada uno de ellos. La réplica para cada uno de los factores consiste en 4 combinaciones,³⁸ en la **tabla 1** se aprecia el tratamientos del diseño factorial 2²:

TABLA 1. Tratamientos del diseño factorial 2²

	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	Notación de Yates
Trat 1	bajo	bajo	A1	B1	A-	B-	-	-	0	0	-1	-1	1
Trat 2	alto	bajo	A2	B1	A+	B-	+	-	1	0	1	-1	a
Trat 3	bajo	alto	A1	B2	A-	B+	-	+	0	1	-1	1	b
Trat 4	alto	alto	A2	B2	A+	B+	+	+	1	1	1	1	ab

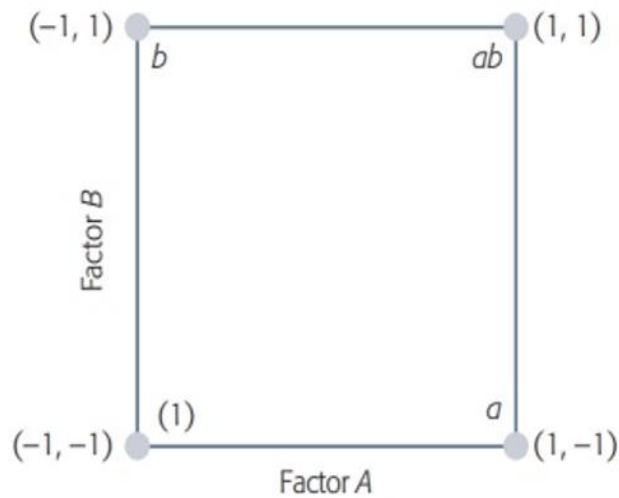
Fuente: ³⁸

En la **tabla 1** se cuenta con notaciones de signos + y -, lo cual es muy utilizado para poder escribir matrices de diseño de aquella notación. Además, cuenta con notación de letras que se utiliza en la parte final del análisis cuando se quiere obtener el mejor tratamiento en el experimento.

Para representar la suma total de las observaciones se hace uso de la notación de Yates (a, a, ab, (1)).

1.4.1.1. *Representación geométrica.* La figura representa los vértices del cuadrado de forma geométrica. Donde cada uno de los vértices va a representar un punto del tratamiento. En la **figura 3** se muestra la representación geométrica del diseño factorial 2².

Figura 3. Representación geométrica del diseño factorial 2^2



Fuente: ³⁸

1.4.1.2. *Cálculos de efectos.* En este caso se cuenta con tres efectos que son de interés, como los son los dos efectos principales (A y B) y el efecto donde hay una interacción (AB). La notación de Yates se usa para ver las n veces que corre el tratamiento, de tal manera que Y en un nivel alto de A es $(a+ab)/2n$ y el nivel bajo $(b+(1))/2n$. ³⁸

A continuación, se muestra las ecuaciones 2, 3 y 4 para el cálculo de los efectos A, B y AB, respectivamente:

Cálculo de efecto A

$$A = \frac{1}{2n} [a + ab - b - (1)] = \frac{[a + ab]}{2n} - \frac{[b + (1)]}{2n} \quad \text{ec. 2}$$

Cálculo de efecto B

$$B = \frac{1}{2n} [b + ab - a - (1)] = \frac{[b + ab]}{2n} - \frac{[a + (1)]}{2n} \quad \text{ec. 3}$$

Cálculo de efecto AB

$$AB = \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b] = \frac{[ab - b]}{2n} - \frac{[a - (1)]}{2n} \quad \text{ec. 4}$$

1.4.1.3. *Análisis de varianza*. Para comprobar que los efectos ayudan a entender el comportamiento que muestra la respuesta, es necesario realizar una prueba estadística de análisis de varianza. En el caso de la suma de los cuadrados que componen el ANOVA se los puede obtener por medio de efectos estimado o un software que procese los cálculos.³⁸

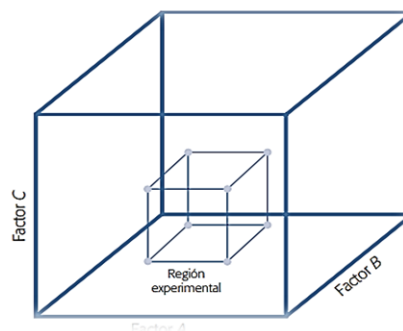
En el análisis de varianza aquellos los valores de p inferiores que sean inferiores a 0,0500 (5%), nivel de significancia, indicaran que los términos del modelo son significativos, por el contrario, si son mayores al 5% los términos no serán significativos.

1.4.2. *Superficie de respuesta*. La metodología de superficie de respuesta es un método experimental y analítico que permite conocer las condiciones óptimas en la operación de un proceso o las características de un producto de calidad.^{39,40}

1.4.2.1. *Región experimental y de operabilidad*. Cuando se refiere a la región experimental, este es un espacio que se delimita por los rangos establecidos en la experimentación, que son utilizados con cada uno de los factores, mientras que la región de operabilidad se delimita por un conjunto de condiciones o puntos en los cuales el proceso puede desarrollar sus funciones.³⁸

Se debe tener en cuenta estas regiones, ya que el punto óptimo se puede ubicar ya sea en una de estas regiones de operabilidad, dentro o fuera de la región experimental con la que se inicia. En la **figura 4** se visualizan los factores A, B y C, junto con la región experimental que se realiza.³⁸

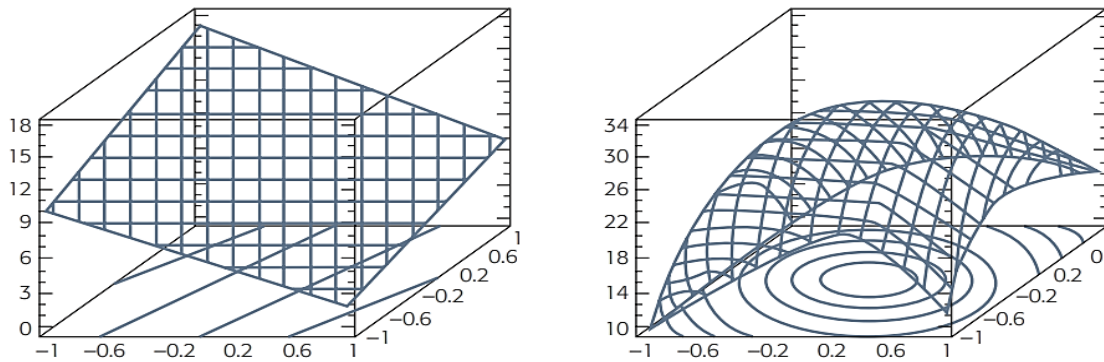
Figura 4. Regiones de operabilidad y experimental



Fuente: ³⁸

En la **figura 5** se muestra una gráfica de superficie de respuesta de primer y segundo orden, la forma que este tome va a depender de los signos y las magnitudes que tengan los coeficientes del modelo; se cuenta con tres formas de superficie de respuesta, como lo son: superficie máxima, mínimas y con punto de silla.³⁸

Figura 5. Superficies de respuestas de primer y segundo orden



Fuente: ³⁸

1.4.3. *Diseño central compuesto*. Este tipo de diseño son tratamientos factoriales 2^k , se caracteriza por sea flexible, además se puede elaborar de forma que cumpla con las propiedades que se desea. Sus propiedades permiten optimizar los gastos de recursos en experimentos. ^{38,41}

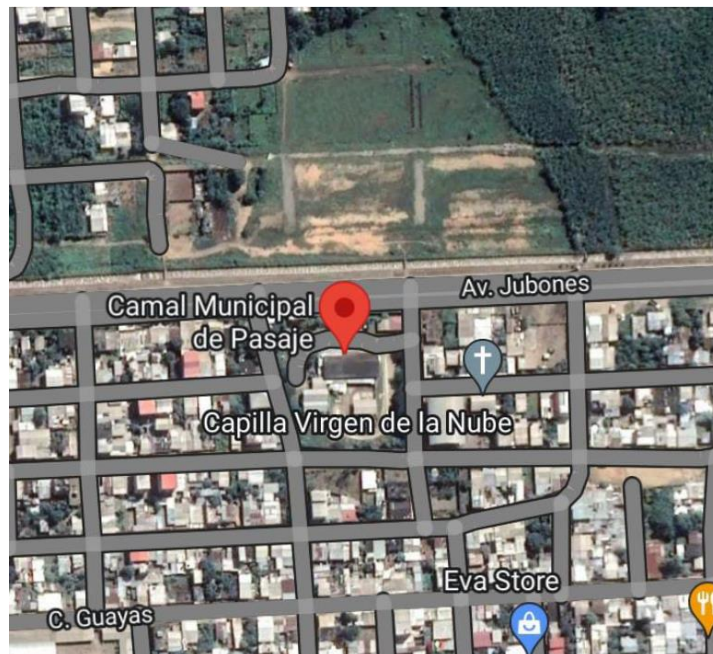
CAPITULO II

2. METODOLOGIA

2.1. Ubicación del estudio

La muestra fue tomada del camal del cantón Pasaje en la Cdla. Nuevos Horizontes, ubicado en las coordenadas geográficas: 3°19'35"S 79°47'03"W. En la **figura 6** se observa el lugar en el cual se llevó a cabo la parte experimental del presente trabajo.

Figura 6. Ubicación de la zona de estudio



Fuente: Google Maps

2.2. Identificación de variables

En el presente trabajo experimental se procede a analizar como variable independiente:

- Dosificación de coagulante
- Dosificación de floculante
- Tiempo de sedimentación

Variables dependientes:

- Turbidez
- pH
- Lodos sedimentables

2.3. Muestreo

La toma de muestra fue realizada en el camal del cantón Pasaje, en los horarios de mayor labor de faenado (lunes, miércoles y viernes, en horas de la madrugada), lo cual implica mayor cantidad de caudal de agua residual. Posteriormente las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de Biomateriales de la Universidad Técnica de Machala.

2.4. Materiales, reactivos y equipos

Los materiales, reactivos y equipos que se utilizaron para el desarrollo de los experimentos se detallan a continuación:

Materiales	Reactivos	Equipos
<ul style="list-style-type: none">• 2 Balones aforados• 5 Vasos de precipitación de 1000 ml• Matraz Erlenmeyer de 25 ml• 1 Cono de sedimentación IMHOFF• 1 Pipeta de 10 ml• 1 Pera de succión• 1 Probeta de 250 ml	<ul style="list-style-type: none">• Policloruro de aluminio (PCA)• Poliacrilamida catiónica• Agua destilada	<ul style="list-style-type: none">• Equipo floculador para Test de Jarras• Turbidímetro Hach modelo 2100N• pH metro de mesa modelo BANTE 901• Campana extractora de gases Labconco

2.5. Desarrollo experimental

2.5.1. Coagulación-Floculación

2.5.1.1. *Diseño experimental preliminar.* Se empleó un test de jarras, con el fin de encontrar la dosificación óptima para la implementación del sistema COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN para el tratamiento de un efluente líquido de un camal municipal. Para ello se utilizó un diseño factorial de tipo superficie de respuesta, de diseño central rotatable. Donde los factores fueron: concentración de coagulante (policloruro de aluminio) y concentración de floculante (poliacrilamida catiónica); por otra parte, los niveles fueron: dosificación de 1300 mg/L y 700 mg/L para el coagulante, mientras que los niveles del floculante fueron: 0,3 mg/L y 0,2 mg/L, esta información se visualiza en la **tabla 2**.

TABLA 2. Diseño Central Compuesto

Factores	Niveles (mg/L)	
	Dosificación Máxima	Dosificación Mínima
Coagulante Policloruro de aluminio tipo A	1300	700
Floculante Poliacrilamida catiónica	0,3	0,2

Fuente: Elaboración propia

2.5.2. *Diseño experimental.* Para la determinación de la dosificación adecuada en el sistema, se realizaron pruebas que permitieron conocer que cantidad de coagulante y floculante era la más eficiente para el sistema, para lo cual se utilizó el software de diseño de experimentos *Design Expert*, el mismo que permitió establecer el número de pruebas a realizar mismas que observan en la **tabla 3**.

TABLA 3. Número de pruebas obtenidas en el software Design Expert

Número de pruebas	Unidades	Dosificación de Coagulante	Dosificación de Floculante
1	mg/L	700	0,2
2	mg/L	1300	0,2
3	mg/L	1000	0,179289
4	mg/L	1000	0,25
5	mg/L	1000	0,320711
6	mg/L	1000	0,320711
7	mg/L	1300	0,2
8	mg/L	1300	0,3
9	mg/L	575,7359313	0,25
10	mg/L	1424,264069	0,25
11	mg/L	700	0,2
12	mg/L	700	0,3
13	mg/L	575,7359313	0,25
14	mg/L	1300	0,3
15	mg/L	1000	0,25
16	mg/L	1424,264069	0,25
17	mg/L	1000	0,25
18	mg/L	700	0,3
19	mg/L	1000	0,179289322

Fuente: Elaboración propia

A través del programa Design Expert se realiza un diseño central compuesto, el cual permitió establecer el número de pruebas para conocer las dosificaciones óptimas del proceso. Paralelamente se midió los valores de turbidez, pH y la cantidad de lodos sedimentado, respuestas que será analizadas con el programa mencionado.

2.5.3. *Test de Jarras*. La prueba de jarras es un método que permite conocer las cantidades óptimas de coagulantes y floculante adecuado para llevar a cabo el tratamiento de aguas residuales, para lo cual se aplican diferentes dosis de agentes químicos a utilizar y se agita de tal manera que se dé una correcta mezcla de estos sedimentados.⁴²

Este estudio fue diseñado para realizar las pruebas a escala de laboratorio, de tal manera que se pueda explorar las condiciones para el proceso de coagulación-floculación.⁴³

Para el test de jarras realizado se utilizó una cantidad de 500 ml de agua residual de camal para llevar a cabo las distintas pruebas, donde fueron adicionados los agentes químicos. Posteriormente se procedió a realizar la agitación dos maneras: por agitación rápida, la cual se realizó a 160 rpm durante 1 minuto y; la agitación lenta con 40 rpm durante 25 minutos. Seguidamente se dejó sedimentar durante un tiempo de aproximadamente 30 minutos, para poder observar la cantidad de lodos sedimentables.

2.6. Métodos de análisis

Con la muestra recolectada durante los días (lunes, miércoles y viernes), en los cuales hay una mayor cantidad de faenamiento porcino y bovino, se realizó los respectivos análisis de aquellos parámetros que se consideró para la caracterización del agua residual del camal del cantón Pasaje. Dichos parámetros fueron: turbidez, pH, sólidos sedimentables. Para determinar si el agua residual tratada cumple con los límites máximos permisibles se basó en el anexo 1 del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Ministerio del Ambiente (TULSMA)

2.6.1. *pH*. La determinación de pH permite medir la actividad de iones de hidrógeno por mediciones picnométricas, haciendo uso de un electrodo patrón de hidrógeno. Para medir este parámetro se usó un pH metro de mesa modelo BANTE 901. El equipo se calibró usando soluciones estándar o con un pH ya conocido, luego se tomó una cantidad de 20 ml de agua muestra en un vaso de precipitación, se sumergió el electrodo de tal manera que midió el pH.⁸

Este equipo permitió conocer el pH que tiene el agua residual del camal, tanto en la entrada como salida del reactor.

2.6.2. *Turbidez*. Este parámetro fue medido mediante el turbidímetro Hach modelo 2100N, antes de realizar el análisis es necesario que el equipo se encuentre calibrado. El equipo turbidímetro permitirá conocer la turbidez en NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

El proceso realizado consistió en colocar en la celda 20 ml de agua tanto de entrada (sin coagulante y floculante), como a la salida del reactor (con coagulante y floculante), dicha celda se colocó en el turbidímetro y se procedió a hacer la lectura directa de los valores obtenidos.

2.6.3. *Sólidos sedimentables*. La cantidad de sedimentos producidos luego de proceso

de coagulación–floculación se midió con la ayuda del calibre o pie de Rey, donde se obtuvo la altura de los lodos sedimentado al transcurrir un tiempo mínimo de 30 minutos.

La floculación permite acelerar la sedimentación, ya que al añadirlo combina las partículas pequeñas, dando formación a unas de mayor dimensión.⁴⁴

CAPITULO III

3. RESULTADOS

3.1. Evaluación del proceso de Coagulación-Floculación

Los productos utilizados en el tratamiento de agua residual del camal del cantón Pasaje que permitieron eliminar carga contaminante son el Policloruro de aluminio (PCA) como coagulante y Poliacrilamida catiónica como floculante. Generalmente aplicados para la potabilización de agua, aguas residuales provenientes de procesos industriales, etc.

3.1.1. *Diseño Central Compuesto.* Para el análisis de los experimentos se utilizó un diseño central compuesto, el cual nos permitió ingresar el número de variables y los factores de respuesta. De tal manera que se generó columnas para cada uno de los factores y para cada variable de respuesta.³⁸

Para ello las condiciones que fueron electas para la replicación de este modelo fueron: 4 réplicas de puntos factoriales; 4 réplicas de punto axial; punto central 6.

3.1.2. *Análisis estadísticos de la dosificación de coagulante y floculante.* En el presente estudio se realizó un test de jarras con el fin de optimizar el proceso de coagulación-floculación, de tal manera que se logró obtener resultados que permitieron conocer las dosis óptimas a las cuales debe operar el proceso. Inicialmente se contó con un agua residual que tiene una turbidez de 567 NTU y un pH de 6,83.

En la **tabla 4** se muestran los resultados obtenidos a partir de los análisis realizados mediante las pruebas de jarras con los valores establecidos por el programa Design Expert:

TABLA 4. Resultados de pruebas jarras

Número de Experimentos	Dosificación de coagulante (mg/L)	Dosificación de floculante (mg/L)	Turbidez (NTU)	Sedimentos (ml)	
1	700		0,2	77	173,543
2	700		0,2	84,6	157,748
3	700		0,2	79	163,119
4	700		0,2	86,23	170,603
5	1300		0,2	2,57	345,553
6	1300		0,2	2,63	338,962
7	1300		0,2	2,88	329,245
8	1300		0,2	2,21	336,525
9	700		0,3	62,29	145,827
10	700		0,3	51,1	141,207
11	700		0,3	71,8	147,196
12	700		0,3	71,68	152,968
13	1300		0,3	2,3	371,695
14	1300		0,3	2,59	359,573
15	1300		0,3	2,52	363,246
16	1300		0,3	2,75	356,005
17	575,736		0,25	124	135,846
18	575,736		0,25	117,2	139,933
19	575,736		0,25	124,6	133,163
20	575,736		0,25	118	130,108
21	1424,26		0,25	2,73	447,251
22	1424,26		0,25	3,1	450,908
23	1424,26		0,25	2,64	459,541
24	1424,26		0,25	3,53	452,13
25	1000	0,179289		7,94	308,461
26	1000	0,179289		6,9	290,937
27	1000	0,179289		6,7	299,777
28	1000	0,179289		7,59	302,191
29	1000	0,320711		5,67	279,946
30	1000	0,320711		5,8	275,804
31	1000	0,320711		5,71	270,041
32	1000	0,320711		5,47	266,426
33	1000	0,25		8,52	279,085
34	1000	0,25		8,2	266,239
35	1000	0,25		8,24	261,513
36	1000	0,25		7,9	270,226
37	1000	0,25		8,09	281,141
38	1000	0,25		8,69	269,175

Fuente: Elaboración propia

En la **tabla 4** se muestra los valores obtenidos de los 38 experimentos realizados al adicionar las diferentes dosis de coagulante y floculante, con los cual se puede observar la disminución o aumento de turbidez al adicionar cantidades variadas de agentes químicos. De la misma manera, se estudió la cantidad de sedimentos producidos en estas variaciones de concentración.

3.1.2.1. *Análisis de turbidez.* En el análisis estadístico para el modelo de superficie de respuesta tuvo un ajuste en función a un modelo cuadrático. La medida de reducción que ocurre en la variabilidad de la respuesta se obtuvo haciendo uso de las variables de regresión que dio el modelo arrojado. En el caso de R^2 de la predicción fue de 0,9795 y el R^2 ajustado fue de 0,9831. En la **tabla 5** se muestra la contribución de términos y significancia en el modelo cuadrático.

TABLA 5. Contribución de términos y significancia en el modelo cuadrático

Término	f-Valor	p-Valor
Modelo	431,82	< 0.0001
A-Coagulación	1595,73	< 0.0001
B-Floculación	6,62	0,0149
AB	10,28	0,0030
A ²	398,48	< 0.0001
B ²	0,0001	0,9906

Fuente: Elaboración propia

El valor f del modelo de 431,82 implica que el modelo es significativo. Los valores de p inferiores a 0,0500 (5%), nivel de significancia, indican que los términos del modelo son significativos. En este caso, A, B, AB, A² son términos significativos del modelo, en otras palabras, tanto el coagulante, floculante y la combinación de ambos generan cambios representativos sobre el proceso experimental. Los valores superiores a 0,05 indican que los términos del modelo no son significativos.

La **tabla 6** muestra las respuestas obtenidas de un modelo cuadrático, donde se tiene que el R^2 Pronosticado de 0,9795 está razonablemente de acuerdo con el R^2 Ajustado de 0,9831; es decir, la diferencia existente es inferior a 0,2.

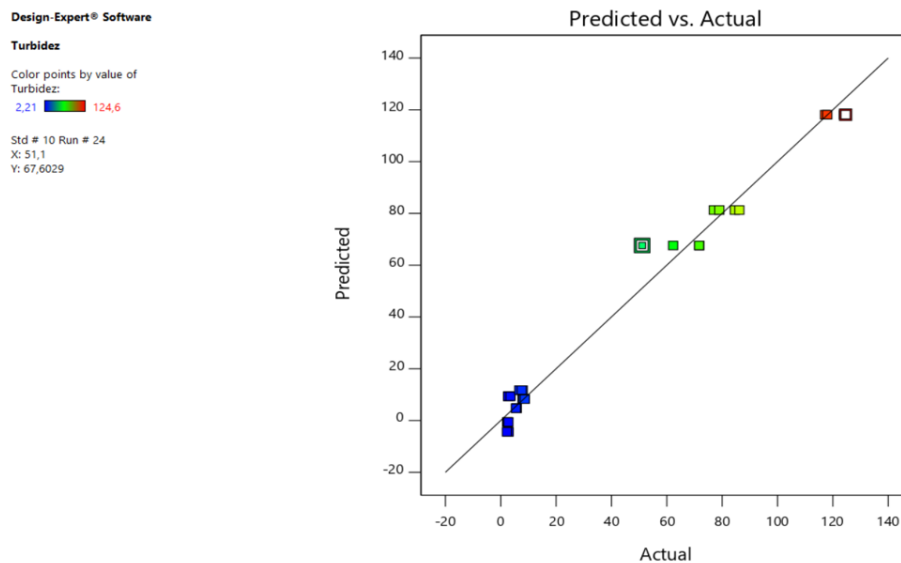
TABLA 6. ANOVA para el modelo cuadrático

Término	Respuesta
Desviación Estándar	5,45
Media	31,62
Coefficiente de Variación	17,22
R ²	0,9854
Ajuste R ²	0,9831
Predicción R ²	0,9795
Predicción adecuada	56,6019

Fuente: Elaboración propia

En la **figura 7** se observa la correlación entre los valores del experimento y valores predichos para la turbidez, donde se muestra una desviación existente entre los valores. Siendo el experimento 10 el valor que tiene una mayor desviación, con un valor de turbidez de 51,1 NTU para el valor actual de predicción.

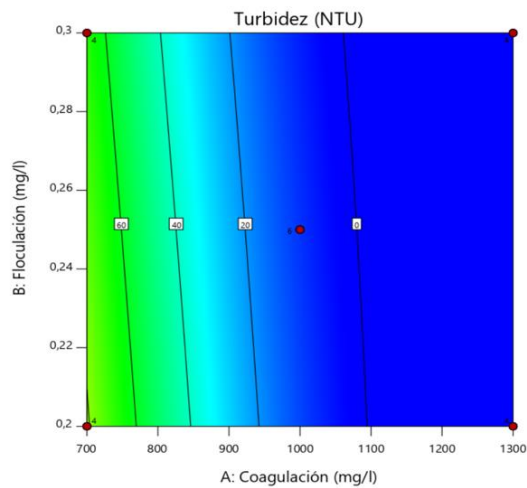
Figura 7. Valores de predicción vs actual de turbidez



Fuente: Elaboración propia

La **figura 8** muestra las líneas de contorno de las franjas en las zonas donde se encuentra cada una de las magnitudes de dosificación de coagulante versus floculante. Donde se puede observar que al incrementar la dosificación de agentes químicos disminuye significativamente la turbidez en el agua, apreciando así las zonas de optimización.

Figura 8. Líneas de contorno de la superficie de Coagulación-Floculación

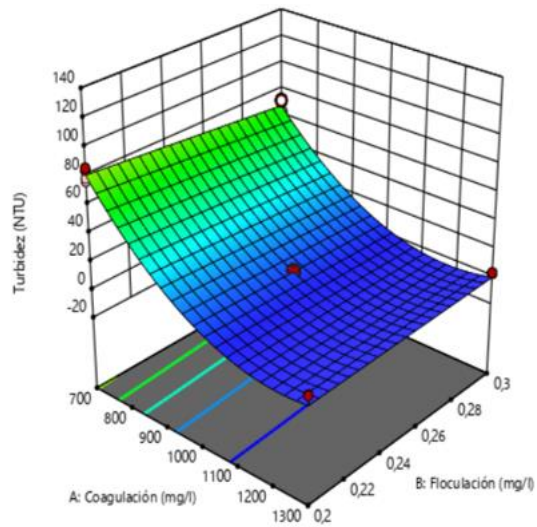


Fuente: Elaboración propia

La **figura 9** muestra una superficie de respuesta, donde indica la interrelación entre los parámetros evaluados (coagulación y floculación); donde se puede observar que al incrementar la dosificación de coagulante y floculante la turbidez tiende a disminuir, misma información que se corrobora de acuerdo con⁴⁵. Al analizar cada uno de los puntos se puede visualizar que, en el punto central, la dosificación de coagulante y floculante de 1000 mg/L y 0,25 mg/L, respectivamente, comienza a presentar resultados favorables con respecto a valores de la turbidez de 8,52 NTU.

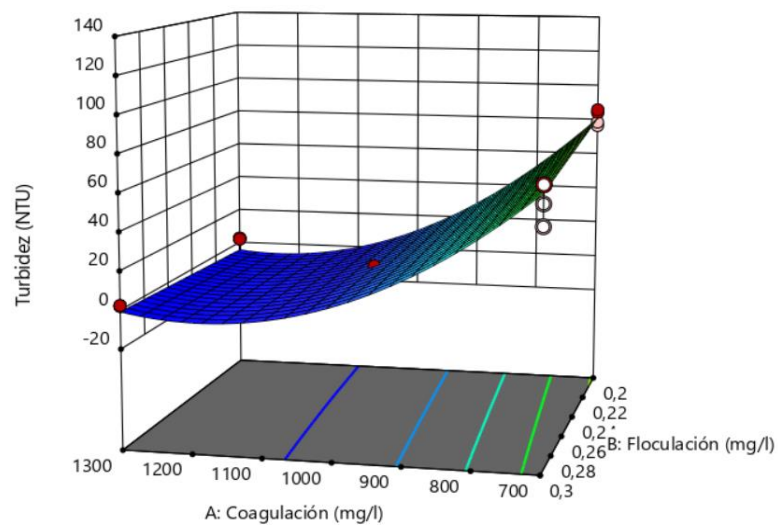
Figura 9. Superficie de respuesta: Coagulación-Floculación para turbidez - Vista frontal

Turbidez (NTU) = 8,52
Std # 33 Run # 38
X1 = A: Coagulación = 1000
X2 = B: Floculación = 0,25



Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Superficie de respuesta: Coagulación-Floculación para turbidez -Vista lateral



Fuente: Elaboración propia

En la **figura 10** se tiene una visión lateral de la superficie de respuesta en la cual se observa de mejor manera como la turbidez va decreciendo representativamente a medida que se utiliza mayor concentración coagulante.

3.1.2.2. *Diagrama de Pareto*. Para elaborar el diagrama de Pareto, se procedió a realizar el cálculo de efectos (a,b, ab) haciendo uso de las ecuaciones 2,3 y 4. En la **tabla 7** se observa los resultado de cálculo para determinar los efectos en la turbidez, tomando como variable de respuesta la turbidez obtenida en Design Expert.

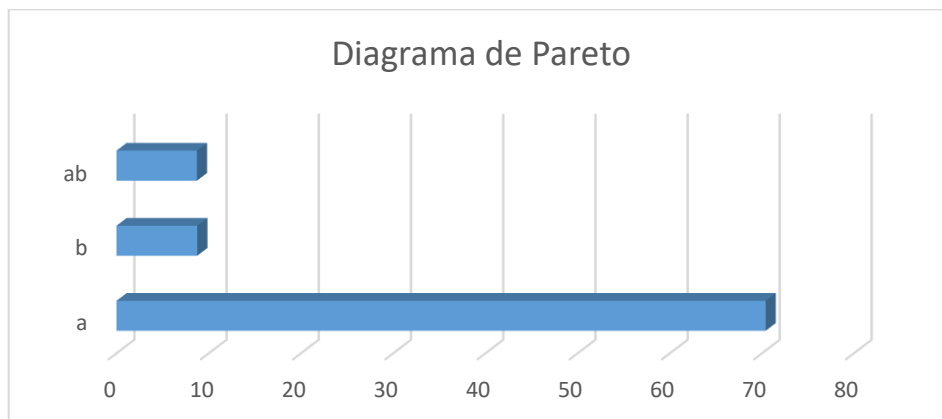
TABLA 7. Cálculo de efectos para la turbidez

FACTORES		Nomenclaruta de signos			Notación de Yates	V.R: TURBIDEZ (NTU)				TOTAL	EFECTOS
A	B	A	B	AB		R1	R2	R3	R4		
Coagulante (PCA) mg/L	Floculante (Poliacrilamida catiónica) mg/L										
700	0,2	-1	-1	1	1	77	84,6	79	86,23	326,83	
1300	0,2	1	-1	-1	a	2,57	2,63	2,88	2,21	10,29	-70,40625
700	0,3	-1	1	-1	b	62,29	51,1	71,8	71,68	256,87	-8,76125
1300	0,3	1	1	1	ab	2,3	2,59	2,52	2,75	10,16	8,72875

Fuente: Elaboración propia

La **figura 11** muestra el diagrama de Pareto obtenido del cálculo de efecto en la turbidez de la **tabla 7**. Este gráfico permitió ordenar los valores, de tal manera que indica la incidencia que tienen los factores A, B y la combinación de ambos, es decir AB, al ser adicionados a las pruebas realizadas; se estableció que el factor A (coagulante) tiene una mayor incidencia con relación a los factores B (Floculante) y AB (adición de coagulante y floculante).

Figura 11. Diagrama de Pareto para turbidez



Fuente: Elaboración propia

3.1.2.3. *Análisis de Sedimentos*. El modelo de superficie de respuesta tuvo un ajuste en función a un modelo 2FI. El valor F del modelo de 263,81 implica que el modelo es significativo. Solo hay una probabilidad del 0,01 % de que se produzca un valor F tan grande debido al ruido.

Para los valores de p inferiores a 0,0500, indican que los términos del modelo son significativos. En este caso A, AB son términos significativos del modelo. En la tabla 8 se observa la contribución de términos y significancia en el modelo cuadrático en el análisis de sedimentos.

TABLA 8. Contribución de términos y significancia en el modelo cuadrático

Término	F-Valor	P-Valor
Modelo	263,81	< 0.0001
A-Coagulación	785,75	< 0.0001
B-Floculación	1,22	0,2767
AB	4,45	0,0423

Fuente: Elaboración propia

El análisis de varianza de la **tabla 9** muestra que en el modelo 2FI se tiene un R^2 Pronosticado de 0,9468 que está razonablemente de acuerdo con el R^2 Ajustado de 0,9552; es decir, la diferencia es inferior a 0,2.

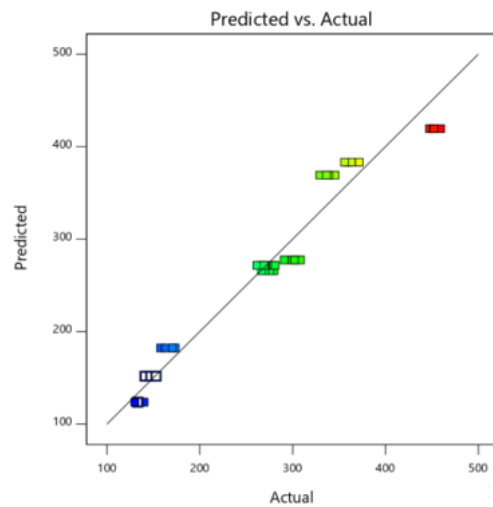
TABLA 9. ANOVA para el modelo cuadrático

Término	Respuesta
Desviación Estándar	21,10
Media	271,65
Coefficiente de Variación	7,77
R^2	0,9588
Ajuste R^2	0,9552
Predicción R^2	0,9468
Predicción adecuada	43,1991

Fuente: Elaboración propia

La **figura 12** muestra que la correlación entre los valores del experimento y valores de predicción de sedimentos tienen una gran variación. Siendo los experimentos 7 y 23 aquellos que tienen una mayor desviación, con un valor de 329,245 ml y 459,541 ml de sedimentos para el valor actual de predicción.

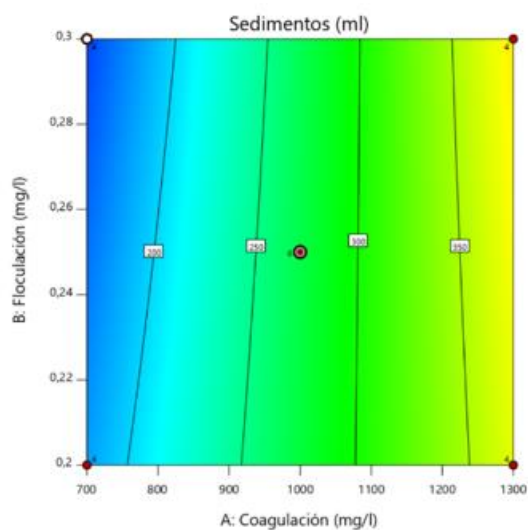
Figura 12. Valores de predicción vs actual para la cantidad de sedimentos



Fuente: Elaboración propia

La **figura 13** muestra las líneas de contorno para conocer los ml de sedimentos ante la presencia de coagulante versus floculante. Se puede observar que al incrementar la dosificación de agentes químicos va disminuyendo la cantidad de colides suspendidos en el agua. Sin embargo, la adición de grandes cantidades de coagulante-floculante no van a sedimentar de una manera favorable para el proceso.

Figura 13. Líneas de contorno de la superficie de Coagulación-Floculación

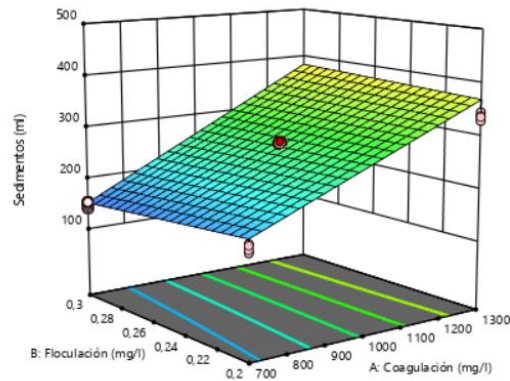


Fuente: Elaboración propia

En las **figuras 14** y **15** (vista frontal y lateral, respectivamente) indican la interrelación que existe entre el coagulante y floculante para sedimentar; se puede observar que al incrementar la dosificación de los agentes químicos será es directamente proporcional a los ml de lodos sedimentados.

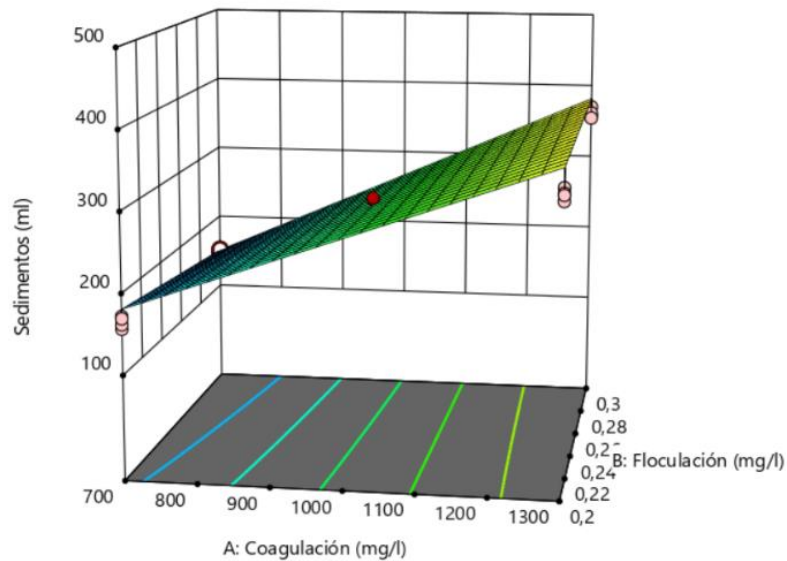
Figura 14. Superficie de respuesta: Coagulación-Floculación para Sedimentación - Vista frontal

Sedimentos (ml) = 279,085
 Std # 33 Run # 38
 X1 = A: Coagulación = 1000
 X2 = B: Floculación = 0,25



Fuente: Elaboración propia

Figura 15. Superficie de respuesta: Coagulación-Floculación para Sedimentación - Vista lateral



Fuente: Elaboración propia

3.1.2.4. *Diagrama de Pareto*. A continuación, se presenta en la **tabla 10** los cálculos de los efectos para sólidos sedimentables, que serán plasmados en el diagrama de Pareto.

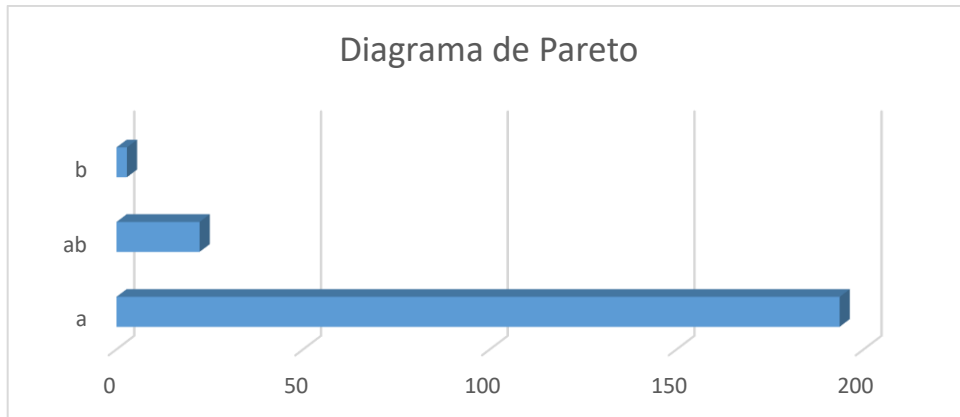
TABLA 10. Diagrama de Pareto para sólidos sedimentables

FACTORES		Nomenclatura de signos			Notación de Yates	V.R: SEDIMENTOS (ml)				TOTAL	EFECTOS
A	B	A	B	AB		R1	R2	R3	R4		
Coagulante (PCA) ml	Floculante (Poliacrilamida catiónica) ml										
700	0,2	-1	-1	1	1	173,5	157,7	163,1	170,6	665,01	
1300	0,2	1	-1	-1	a	345,6	339	329,2	336,5	1350,3	193,57413
700	0,3	-1	1	-1	b	145,8	141,2	147,2	153	587,2	2,802375
1300	0,3	1	1	1	ab	371,7	359,6	363,2	356	1450,5	22,256125

Fuente: Elaboración propia

En la **figura 16** se muestra el diagrama de Pareto para conocer la incidencia de los factores en los sedimentos de los distintos experimentos, conociendo así que el factor A tiene un mayor efecto, con un valor de 193,574, mientras que los factores B y AB denotan un menor efecto en la sedimentación.

Figura 16. Diagrama de Pareto para los Sedimentos



Fuente: Elaboración propia

3.1.2.5. *Influencia del pH.* Durante las pruebas realizadas se midió el pH en cada uno de los experimentos. El pH inicial del agua problema fue de 6,83, mientras que en los diferentes experimentos se obtuvo como resultados un pH máximo 7,31 y mínimo 6,87. Con estos resultados y de acuerdo con⁴⁶ quien en su experimentación utiliza un coagulante orgánico (quitosano), se confirma que la dosificación de coagulante, ya sea orgánico o inorgánico, no es un factor de mucha influencia en el pH, ya que éste no muestra variaciones significativas.

3.2. Validación del modelo

A través de las pruebas realizadas para conocer la dosis óptima de operación del sistema de coagulación-floculación, se logró obtener la dosis adecuada de agentes químicos. A continuación, se presenta la **tabla 11** con la dosificación óptima establecida al analizar las 38 pruebas en el Design Expert, que permitió remover 17,4 NTU de turbidez y 150 ml de sólidos sedimentables en el agua. Este valor de optimización se encuentra dentro del límite máximo permisible, en el anexo 1 del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Ministerio del Ambiente (TULSMA).

TABLA 11. Dosificación óptima de Coagulante-Floculante

Factores	Dosificación óptima (mg/L)
Coagulante (Policloruro de aluminio tipo A)	846,84
Floculante (Poliacrilamida Catiónica)	0,3

Fuente: Elaboración propia

Para comprobar que la dosis mencionada es la óptima, se validó mediante pruebas posteriores con las concentraciones óptimas encontradas. Donde se comprobó que a las concentraciones de 846,85 ml de coagulante y 0,3 ml de floculante son las adecuadas para el proceso, reduciendo significativamente la turbidez y logrando una sedimentación favorable. La **tabla 12** muestra los resultados de remoción de turbidez y sedimentos de la prueba de validación:

TABLA 12. Validación de la dosificación óptima

Coagulante (mg/L)	Floculante (mg/L)	Turbidez NTU	Sedimentos ml
847,18	0.3	17,4	150

Fuente: Elaboración propia

En la **figura 17** se presenta el cambio que ocurre en el agua residual antes y después de aplicar el proceso de coagulación-floculación, donde se puede constatar la modificación que causa en la turbidez del agua residual del camal del cantón Pasaje; se observa la zona donde el agua se encuentra con una turbidez baja de 17,4 y en el fondo la cantidad de lodos suspendidos al transcurrir el tipo de sedimentación.

Figura 17. Agua residual del camal Municipal del cantón Pasaje antes y después del tratamiento



Fuente: Elaboración propia

4. CONCLUSIONES

A partir de las respectivas pruebas de jarras realizadas en el Laboratorio de Investigaciones de la Universidad Técnica de Machala, se logró optimizar los parámetros de operación para la dosificación de coagulante y floculante, con el fin de remover la cantidad de sólidos suspendidos, de tal manera que se logró disminuir la turbidez (NTU) y sedimentos (ml) del agua del camal Municipal del cantón Pasaje.

Mediante el uso del software Design Expert se estableció un *diseño central compuesto*, que permitió establecer el número de experimentos y concentraciones de los agentes químicos a dosificar, es decir, el coagulante y floculante. Teniendo como concentración máxima de coagulante y floculante (1300 mg/L y 0,3 mg/L) y mínimo (700 mg/L y 0,3 mg/L), con lo cual se obtuvo una superficie de respuesta que permitió conocer el comportamiento de los factores, como son: coagulante (A), floculante (B) y la interacción se ambos (AB). Dando resultados favorables que mostraron que el coagulante es el factor que afecta en mayor proporción al proceso de tratamiento por coagulación-floculación. De forma que disminuyó la turbidez y sedimentos, por lo tanto, se obtuvo un agua de mejor calidad. Además, la superficie de respuesta se contrastó con el diagrama de Pareto, el cual permitió una mejor observación de los cambios producidos por cada factor.

Finalmente se evaluó la eficiencia del sistema de coagulación-floculación para mejorar la calidad de agua residual del camal del cantón Pasaje mediante una prueba realizada con la dosis óptima proporcionada por el programa Design Expert, con los datos obtenidos luego de haber analizado los 38 experimentos propuestos por el *diseño central compuesto*. Estos valores óptimos fueron de 847,18 mg/L para el coagulante (policloruro de aluminio) y 0,3 mg/L para el floculante (poliacrilamida catiónica), obteniendo una turbidez baja de 17,4 mg/L y 150 ml de lodos sedimentados. Con lo cual se puede concluir que el sistema de coagulación-floculación tiene una eficiencia de 98,19% para remover la cantidad de partículas suspendidas en el agua residual del camal Municipal del cantón Pasaje. Con todo lo anterior expuesto y, en base a los resultados obtenidos, se pudo establecer que cumple con los límites máximos permisibles de descarga proporcionados por anexo 1 del libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Ministerio del Ambiente (TULSMA).

5. RECOMENDACIONES

- Para la toma de muestra de agua residual basarse en la norma NTE INEN 2169:2013, la cual nos detalla las condiciones para realizar un correcto muestreo.
- Los días recomendables para la toma de muestra en el camal municipal del cantón Pasaje, de acuerdo con los técnicos de las instalaciones, son los días lunes, miércoles y viernes en tempranas horas de la madrugada, debido a que éstos son los días de mayor labor de faenamiento.
- Ampliar el estudio de las características del agua residual del camal municipal del cantón Pasaje, para de esta manera aplicar posteriores tratamientos que permitan mejorar la calidad de la misma.

BIBLIOGRAFIA

- (1) <https://plus.google.com/+UNESCO>. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*. UNESCO. <https://es.unesco.org/water-security/wwap/wwdr> (accessed 2023-02-24).
- (2) Meoño, F. L.; Taranco, C. G.; Olivares, Y. M. Las aguas residuales y sus consecuencias en el Perú. *Saber y Hacer* **2015**, 2 (2), 8–25.
- (3) <https://plus.google.com/+UNESCO>. *¿Son las aguas residuales el nuevo 'oro negro'?* UNESCO. <https://es.unesco.org/news/son-aguas-residuales-nuevo-oro-negro> (accessed 2022-09-03).
- (4) Becerra-Gutiérrez, L. K.; Horna-Acevedo, M. V.; Barrionuevo-Albújar, K. I. Nivel de contaminación en los efluentes provenientes de camales de la región la libertad. *Rev. Cuerpo Méd. Hosp. Nac. Almanzor Aguinaga Asenjo* **2014**, 23–26.
- (5) Salas C, G.; Condorhuamán C, C. Tratamiento De Las Aguas Residuales De Un Centro De Beneficio O Matadero De Ganado. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química* **2008**, 11 (1), 29–35.
- (6) Loganath, R.; Mazumder, D. Performance Study on Organic Carbon, Total Nitrogen, Suspended Solids Removal and Biogas Production in Hybrid UASB Reactor Treating Real Slaughterhouse Wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering* **2018**, 6 (2), 3474–3484. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.05.031>.
- (7) Bermúdez, X. C.; Ramírez, M. F.; Moya, A. M. C. Estudio Del Proceso De Coagulación-Floculación De Aguas Residuales De La Empresa Textil “Desembarco Del Granma” a Escala De Laboratorio. *Tecnología Química* **2009**, XXIX (3), 64–73.
- (8) Espin Saltos, A. C. Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para el camal municipal del cantón Alausí. **2014**.
- (9) Ortega Ramírez, A. T.; Sánchez Rodríguez, N.; Ortega Ramírez, A. T.; Sánchez Rodríguez, N. Tratamientos avanzados para la potabilización de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* **2021**, 31 (2), 121–134. <https://doi.org/10.18359/rcin.5343>.
- (10) Puchana, M.; Lima, E.; Mella, B.; Costa, D. da; Poll, E.; Gutterres, M. A Coagulation-

- Flocculation Process Combined With Adsorption Using Activated Carbon Obtained From Sludge For Dye Removal From Tannery Wastewater. *Journal of the Chilean Chemical Society* **2018**, 63 (1), 3867–3874. <https://doi.org/10.4067/s0717-97072018000103867>.
- (11) Yaakob, M. A.; Radin Mohamed, R. M. S.; Al-Gheethi, A.; mohd kassim, A. H. Characteristics of Chicken Slaughterhouse Wastewater. *Chemical Engineering Transactions* **2018**, 63. <https://doi.org/10.3303/CET1863107>.
- (12) Fregulia, P.; Neves, A. L.; Dias, R.; Campos, M. A Review of Rumen Parameters in Bovines with Divergent Feed Efficiencies: What Do These Parameters Tell Us about Improving Animal Productivity and Sustainability? *Livestock Science* **2021**, 254, 104761. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104761>.
- (13) Fatima, F.; Du, H.; Kommalapati, R. R. Treatment of Poultry Slaughterhouse Wastewater with Membrane Technologies: A Review. *Water* **2021**, 13 (14), 1905. <https://doi.org/10.3390/w13141905>.
- (14) Musa, M. A.; Idrus, S. Physical and Biological Treatment Technologies of Slaughterhouse Wastewater: A Review. *Sustainability* **2021**, 13 (9), 4656. <https://doi.org/10.3390/su13094656>.
- (15) Campoverde Niño, O. J. Tratamiento de aguas residuales de una empresa industrial de congelados. *Universidad de Piura* **2020**.
- (16) Abujazar, M.; Ugurlu, S.; Abu Amr, S.; Alazaiza, M.; Bashir, M. Recent Advancement in the Application of Hybrid Coagulants in Coagulation-Flocculation of Wastewater: A Review. *Journal of Cleaner Production* **2022**, 345, 131133. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131133>.
- (17) Fanaie, V. R.; Khiadani, M.; Ayres, T. Effects of Internal Geometry on Hydrodynamics of Dissolved Air Flotation (DAF) Tank: An Experimental Study Using Particle Image Velocimetry (PIV). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **2019**, 575, 382–390. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.027>.
- (18) Lorenzo-Acosta, Y. Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar* **2006**, XL (2), 10–17.
- (19) Vepsäläinen, M.; Sillanpää, M. Electrocoagulation in the Treatment of Industrial

- Waters and Wastewaters; 2020; pp 1–78. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819227-6.00001-2>.
- (20) Aguilar, M. I. *Tratamiento físico-químico de aguas residuales: coagulación-floculación*; EDITUM, 2002.
- (21) Cui, H.; Huang, X.; Yu, Z.; Chen, P.; Cao, X. Application Progress of Enhanced Coagulation in Water Treatment. *RSC Advances* **2020**, *10* (34), 20231–20244. <https://doi.org/10.1039/D0RA02979C>.
- (22) Tamayo Segarra, M. A. Evaluación De Los Procesos De Coagulación-Floculación En El Tratamiento De Aguas Residuales En Una Empresa Procesadora De Plástico.
- (23) Díaz, M.; Rivas, L.; Fernández, D.; Salazar, D.; Miller, S.; la Maza, N. Selección de Programa Químico de Tratamiento Para Aguas Residuales Oleosas. *Centro Azúcar* **2017**, *44* (2), 89–100.
- (24) Castrillón Bedoya, D.; Giraldo, M. de los Á. Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo b en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana. **2012**.
- (25) Zhao, C.; Zhou, J.; Yan, Y.; Yang, L.; Xing, G.; Li, H.; Wu, P.; Wang, M.; Zheng, H. Application of Coagulation/Flocculation in Oily Wastewater Treatment: A Review. *Science of The Total Environment* **2020**, *765*, 142795. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142795>.
- (26) Hu, C.; Liu, H.; Chen, G.; Qu, J. Effect of Aluminum Speciation on Arsenic Removal during Coagulation Process. *Separation and Purification Technology - SEP PURIF TECHNOL* **2011**, *86*. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.10.017>.
- (27) Aguilar, M. I.; Sáez, J.; Lloréns, M.; Soler, A.; Ortuño, J. F.; Meseguer, V.; Fuentes, A. Improvement of Coagulation–Flocculation Process Using Anionic Polyacrylamide as Coagulant Aid. *Chemosphere* **2005**, *58* (1), 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.09.008>.
- (28) Solís Silvan, R.; Laines Canepa, J. R.; Hernández Barajas, J. R. Mezclas con potencial coagulante para clarificar aguas superficiales. *Revista internacional de contaminación ambiental* **2012**, *28* (3), 229–236.
- (29) Valverde, K. C.; Paccola, E. A. de S.; Pomini, A. M.; Yamaguchi, N. U.;

- Bergamasco, R. Combined Water Treatment with Extract of Natural *Moringa Oleifera* Lam and Synthetic Coagulant. *Rev. Ambient. Água* **2018**, *13*. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2135>.
- (30) Dong, W.; Gu, X.; Shu, Y.; Cao, D.; Yu, J.; Amin, M.; Fu, H. Pulse Electrocoagulation Combined with a Coagulant to Remove Antimony in Wastewater. *Journal of Water Process Engineering* **2022**, *47*, 102749. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102749>.
- (31) Bridgeman, J.; Jefferson, B.; Parsons, S. A. Computational Fluid Dynamics Modelling of Flocculation in Water Treatment: A Review. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* **2009**, *3* (2), 220–241. <https://doi.org/10.1080/19942060.2009.11015267>.
- (32) Daifa, M.; Shmoeli, E.; Domb, A. J. Enhanced Flocculation Activity of Polyacrylamide-Based Flocculant for Purification of Industrial Wastewater. *Polymers for Advanced Technologies* **2019**, *30* (10), 2636–2646. <https://doi.org/10.1002/pat.4730>.
- (33) Rivas-Romero, S.; Menés-Vuelta, G.; Rómulo-Rodríguez, A. Tratamiento por coagulación-floculación a efluente de la Empresa del Níquel Comandante Ernesto Che Guevara. *Tecnología Química* **2017**, *XXXVII* (2), 195–205.
- (34) Fúquene, D. M.; Yate, A. V. Ensayo de jarras para el control del proceso de coagulación en el tratamiento de aguas residuales industriales. *Documentos de Trabajo ECAPMA* **2018**, No. 1. <https://doi.org/10.22490/ECAPMA.2771>.
- (35) Muruganandam, L.; Kumar, M. P. S.; Jena, A.; Gulla, S.; Godhwani, B. Treatment of Waste Water by Coagulation and Flocculation Using Biomaterials. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **2017**, *263* (3), 032006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/263/3/032006>.
- (36) Al-Asheh, S.; Aidan, A. Operating Conditions of Coagulation-Flocculation Process for High Turbidity Ceramic Wastewater. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology* **2017**, *2* (2), 80–87. <https://doi.org/10.22090/jwent.2017.02.002>.
- (37) Tafur Bravo, L. K.; Quevedo Salas, R. K. Alternativa para el tratamiento de aguas residuales cromadas con Quitosano extraído del exoesqueleto de camarón. **2014**.
- (38) Gutierrez, H.; Salazar, R. de la V. *Análisis y Diseño de Experimentos*, 2nd ed.; McGraw-Hill, 2008.

- (39) Sevillano, R.; Siche, R.; Castillo, W.; Silva, E. Optimización de la extracción por arrastre de vapor de aceite esencial de romero (*Rosmarinus officinalis*) utilizando diseños secuenciales. *Manglar* **2019**, *16* (1), 53–61. <https://doi.org/10.17268/manglar.2019.008>.
- (40) Karimifard, S.; Alavi Moghaddam, M. R. Application of Response Surface Methodology in Physicochemical Removal of Dyes from Wastewater: A Critical Review. *Science of The Total Environment* **2018**, 640–641. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.355>.
- (41) Jiménez Careaga, M. G. Superficies de Respuesta Mediante Un Diseño Central Compuesto. *Revista Varianza* **2015**, 31.
- (42) Meza-Leones, M.; Riaños-Donado, K.; Mercado-Martínez, I.; Olivero-Verbel, R.; Jurado-Eraso, M. Evaluación del poder coagulante del sulfato de aluminio y las semillas de Moringa oleífera en el proceso de clarificación del agua de la ciénaga de Malambo-Atlántico. *Revista UIS Ingenierías* **2018**, *17* (2), 95–104. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n2-2018009>.
- (43) Kang, C. *Reuse of Aluminum-Based Water Treatment Sludge as Coagulant for Animal Farm Wastewater Treatment*, 2018. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14027.08482>.
- (44) Lee, W.-C.; Chang, C.-C. Effectively Recycling Swine Wastewater by Coagulation–Flocculation of Nonionic Polyacrylamide. *Sustainability* **2022**, *14* (3), 1742. <https://doi.org/10.3390/su14031742>.
- (45) Carpintero, J.; Villa-Dominguez, J.; Tavera-Quiroz, M. J.; Tavera-Quiroz, H. C.; Kaźmierczak, B.; Fábregas-Villegas, J.; Canales, F. A. Application of a 2k–p Fractional Experimental Design in Coagulation-Flocculation Processes in the Treatment of Wastewater from a Slaughterhouse. *Sustainability* **2022**, *14* (16), 10402. <https://doi.org/10.3390/su141610402>.
- (46) Diaz, J. J. F.; Nbsp, M. J. T. Q. and O. V. S. Efficiency of Chitosan as a Coagulant for Wastewater from Slaughterhouses. *INDJST* **2018**, *11* (3), 1–12. <https://doi.org/10.17485/ijst/2018/v11i3/117169>.

ANEXOS

Anexo A. Solución de Floculante 100ppm; Solución de Coagulante 50000ppm



Anexo B. Muestra problema pre-tratamiento



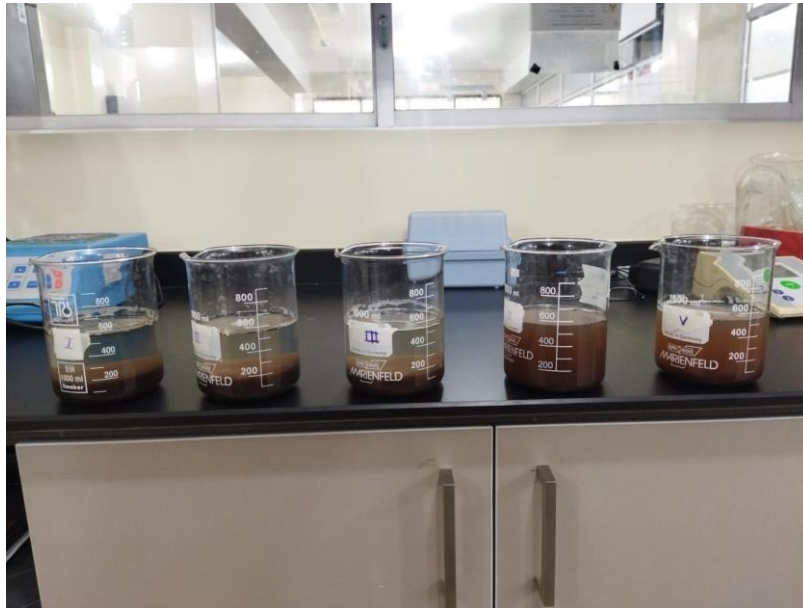
Anexo C. Simulación Test de Jarras



Anexo D. Agua tratada pre-sedimentación



Anexo E. Agua tratada post-sedimentación



Anexo F. Sedimentación en Cono Imhoff



Anexo G. Medición de turbidez

