

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

**FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS
NATURALES**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE
RECURSOS NATURALES**



**“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 PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

AUTORES:

BACH. ARLYN ZULYN GARCIA CAMPOS
BACH. KIMBERLEY MELISSA ZEVALLOS PALACIO

ASESOR:

M.Sc. ALEX WILLY PILCO NUÑEZ

Callao, 2021
PERÚ

Asesor:

M.Sc. Alex Willy Pilco Nuñez



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES

(Resolución N° 019-2021-CU del 20 de enero de 2021)



ANEXO 3

ACTA N° 003-2021 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

LIBRO 01 FOLIO No. 6 ACTA N°003-2021 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL Y DE RECURSOS NATURALES.

A los 02 días del mes de octubre del año 2021, siendo las 10:56 horas, se reunieron, en la sala meet: <https://meet.google.com/azq-yihb-iji>, el **JURADO DE SUSTENTACION DE TESIS** para la obtención del **TÍTULO profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales** de la **Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales**, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la **Universidad Nacional del Callao**:

Mg.	Teófilo Allende Ccahuana	: Presidente
Mtro.	Américo Carlos Milla Figueroa	: Secretario
Blgo.	Carlos Odorico Tome Ramos	: Vocal
Ms.C.	Alex Willy Pilco Nuñez	: Asesor

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis de las Bachilleras Arlyn Zuly Garcia Campos y Kimberley Melissa Zevallos Palacio, quienes habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales, sustentan la tesis titulada: **“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN USANDO CLORURO FÉRRICO Y FOSFATO PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINANTES DEL AGUA RESIDUAL DEL CAMAL CONCHUCOS S.A., LIMA”**, cumpliendo con la sustentación en acto público, de manera no presencial a través de la Plataforma Virtual, en cumplimiento de la declaración de emergencia adoptada por el Poder Ejecutivo para afrontar la pandemia del Covid19, a través del D.S. N° 044-2020-PCM y lo dispuesto en el DU N° 026-2020 y en concordancia con la Resolución del Consejo Directivo N°039-2020-SUNEDU-CD y la Resolución Viceministerial N° 085-2020-MINEDU, que aprueba las "Orientaciones para la continuidad del servicio educativo superior universitario";

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la sustentación de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición, y la absolución de las preguntas formuladas por el Jurado y efectuadas las deliberaciones pertinentes, acordó: Dar por Aprobado con la escala de calificación cualitativa Bueno y calificación cuantitativa Quince (15), la presente Tesis, conforme a lo dispuesto en el Art. 27 del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 245-2018- CU del 30 de Octubre del 2018

Se dio por cerrada la Sesión a las 12:10 horas del día sábado 02 de octubre del año en curso.

Presidente

Secretario

Vocal

Asesor

DEDICATORIA

A Dios por su bendición en permitirme terminarnos esta investigación pese a cada dificultad vivida. A mi madre Yolanda por su apoyo incondicional, por su comprensión, por ser la persona que desde el día uno de mi vida no dudo de mí, y por todo su amor que me ha permitido seguir adelante pese a todo. A mi padre, mis hermanos y sobrinos quienes son parte importante en mi vida y a quienes dedico con cariño este objetivo concluido.

Bach. Kimberley Melissa Zevallos Palacio

A Dios, por ser el forjador de mi camino, el que me acompaña y siempre me levanta de mi continuo tropiezo.

A toda mi familia, pero en especial a mis padres, Kewin y Leila, quienes, con su apoyo incondicional, amor y confianza permitieron que logre culminar mi carrera profesional, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía.

Bach. Arlyn Zulyn Garcia Campos

AGRADECIMIENTO

No sé si sean suficientes estas líneas para expresar mi profundo agradecimiento, a quienes hicieron posible concluir con este sueño, quienes fueron mi fortaleza ante cada barrera que tuve que afrontar durante todo mi proceso universitario, quienes con alientos y frases me inspiraron y no dejaron que me rindiera cuando mis miedos no me permitían seguir. Esta mención es muy especial para mis padres y mis hermanos. Muchas gracias por ser tal y como son, los amo infinito.

Mi gratitud también la hago extensiva a mi casa de estudios, a la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, un agradecimiento sincero para el asesor de mi tesis y un gracias a cada docente que influyó con sus enseñanzas y consejos a formar parte de los sedimentos de mi vida profesional.

Gracias totales.

Bach. Kimberley Melissa Zevallos Palacio

Agradezco a Dios por mantenerme firmes e impulsarme día a día para continuar adelante y permitirme concluir con este objetivo. A mis queridos padres y familiares, por su amor, sacrificio y apoyo incondicional a lo largo de estos meses. A mis amigos cercanos que me brindaron sus experiencias, conocimientos, consejos y ánimos durante la realización de este proyecto.

A nuestro Asesor, M.Sc. Alex Willy Pilco Nuñez que nos orientó en este importante proyecto y los valiosos consejos para nuestra formación profesional. A los docentes de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, que influyeron con sus conocimientos transmitidos a lo largo de la carrera, y por el apoyo con los permisos para el uso del laboratorio y equipos en la etapa experimental de nuestro estudio.

Muchas gracias.

Bach. Arlyn Zulyn Garcia Campos

ÍNDICE

RESUMEN	7
ABSTRACT	8
INTRODUCCIÓN	9
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	11
1.2. Formulación del problema.....	13
1.2.1. Problema general	13
1.2.2. Problemas específicos.....	13
1.3. Objetivos	13
1.3.1. Objetivo general.....	13
1.3.2. Objetivos específicos.....	13
1.4. Limitantes de la investigación	14
II. MARCO TEÓRICO	15
2.1. Antecedentes	15
2.1.1. A nivel internacional.....	15
2.1.2. A nivel nacional.....	17
2.2. Bases teóricas.....	20
2.2.1. El recurso agua.....	20
2.2.2. Mataderos.....	23
2.2.3. Contaminación del agua por la industria de mataderos.....	24
2.2.4. Procesos de la industria de mataderos.....	24
2.2.5. Tratamiento de aguas residuales de mataderos.....	26
2.3. Conceptual.....	33
2.3.1. Coagulación.....	33

2.3.2.	Floculación	33
2.3.3.	Coagulación-floculación.....	33
2.3.4.	Reducción de contaminantes	33
2.3.5.	Aguas residuales	33
2.4.	Definición de términos básicos.....	34
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES	34
3.1.	Hipótesis	34
3.1.1.	Hipótesis general.....	34
3.1.2.	Hipótesis específicas	35
3.2.	Definición conceptual de variables.....	36
3.2.1.	Operacionalización de las variables	37
IV.	DISEÑO METODOLÓGICO	38
4.1.	Tipo y diseño de investigación	38
4.1.1.	Tipo de investigación	38
4.1.2.	Diseño de investigación.....	38
4.2.	Método de investigación.....	46
4.3.	Población y muestra.....	46
4.4.	Lugar de estudio y periodo desarrollado	46
4.5.	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	46
4.5.1.	Técnica	46
4.5.2.	Instrumentos	46
4.6.	Análisis y procesamiento de datos.....	47
V.	RESULTADOS	48
5.1.	Resultados descriptivos	48
5.1.1.	Resultados de las características fisicoquímicos del agua residual del Camal Conchucos	48

5.1.2. Resultados descriptivos del tratamiento del agua residual del Camal Conchucos.....	48
5.2. Resultados inferenciales	58
5.2.1. Resultados del análisis estadístico del diseño central compuesto....	58
5.2.2. Resultados de la optimización numérica	66
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	69
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	69
6.1.1. Contrastación de hipótesis del modelo estadístico	69
6.1.2. Contrastación de las hipótesis de estudio	73
6.2. Contrastación de los resultados con estudios similares	75
6.3. Responsabilidad ética	76
VII. CONCLUSIONES.....	77
VIII. RECOMENDACIONES	77
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
X. ANEXOS	86
Anexo 1. Matriz de consistencia	86
Anexo 2. Fotos de experimento en laboratorio	87
Anexo 3. Análisis de caracterización del agua en laboratorio.....	92
Anexo 4. Metodologías usadas en laboratorio.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Definición conceptual de las variables _____	36
Tabla 2. Operacionalización de las variables _____	37
Tabla 3. Factores y sus niveles para el método de superficie de respuesta-diseño central compuesto _____	42
Tabla 4. Arreglo experimental para el modelo _____	44
Tabla 5. Características físicoquímicas iniciales del agua residual del Camal Conchucos S.A _____	48
Tabla 6. Resultados del DQO y su % de reducción _____	51
Tabla 7. Resultados de la turbidez y su % de reducción _____	52
Tabla 8. Resultados del fósforo total y su % de reducción _____	54
Tabla 9. Resultados del potencial de hidrógeno (pH) _____	55
Tabla 10. Resultados de la conductividad eléctrica (C.E.) _____	57
Tabla 11. Resultados de porcentajes de reducción de contaminantes obtenidos experimentalmente _____	59
Tabla 12. Resultados del % reducido de contaminantes en la matriz experimental del diseño central compuesto _____	60
Tabla 13. ANOVA para el modelo cuadrático de superficie de respuesta: método central compuesto estimado de relación entre la variable de respuesta % DQO reducido y variables independientes _____	61
Tabla 14. ANOVA para el modelo cuadrático de superficie de respuesta: método central compuesto estimado de relación entre la variable respuesta % turbidez reducida y variables independientes _____	62
Tabla 15. ANOVA para el modelo cuadrático de superficie de respuesta: método central compuesto estimado de relación entre la variable respuesta % fósforo total reducido y variables independientes _____	63
Tabla 16. ANOVA para el modelo cuadrático de superficie de respuesta: método central compuesto estimado de relación entre la variable respuesta pH y variables independientes _____	64

Tabla 17. ANOVA para el modelo cuadrático de superficie de respuesta: método central compuesto estimado de relación entre la variable respuesta conductividad y las variables independientes _____	65
Tabla 18. Función de deseabilidad para optimizar el % DQO, % turbidez, % fósforo total _____	68
Tabla 19. Análisis de normalidad de los residuos usando Anderson-Darling ____	70
Tabla 20. Análisis de la homogeneidad de la varianza de los residuos usando prueba de Bartlett _____	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Visualización de la distribución del agua en la tierra _____	21
Figura 2. Diagrama de procesos en mataderos para vacas, porcinos y aves de corral _____	24
Figura 3. Cloruro férrico y sulfato de aluminio en el proceso de coagulación-floculación _____	28
Figura 4. Coagulación- floculación antes y después _____	29
Figura 5. Coagulantes naturales _____	30
Figura 6. Mecanismo de aglomeración de partículas coloidales empleando floculantes _____	32
Figura 7. Diseño de la investigación _____	39
Figura 8. Equipo de prueba de jarras de la Facultad de ingeniería ambiental y de recursos naturales _____	40
Figura 9. Especificaciones técnicas del cloruro férrico _____	41
Figura 10. Referencia gráfica del diseño central compuesto _____	42
Figura 11. Gráficos de efectos significativos de la dosis de cloruro férrico sobre las diferentes variables respuestas _____	64
Figura 12 Gráficos de efectos significativos de la dosis de fosfato sobre las diferentes variables respuestas	
Figura 13. Gráficas de respuestas a la deseabilidad propuesta _____	67
Figura 14. Normalidad de residuos de las variables respuestas del tratamiento _____	701
Figura 15. Normalidad de residuos de los diferentes parámetros de tratamiento _____	72

RESUMEN

En este trabajo se aborda la problemática de los contaminantes presentes en el agua residual del Camal Conchucos S.A. y está orientado a determinar las condiciones óptimas de operación necesarias para la reducción de contaminantes como % demanda química de oxígeno (DQO), % turbidez (NTU) y % fósforo total (PT mg/L). Para lograr este objetivo se aplicó la metodología de superficie de respuesta (RSM) optimizando el proceso de coagulación-floculación usando cloruro férrico como coagulante y fosfato diácido de potasio como floculante. Se investigaron los efectos de cuatro variables independientes, dosis de cloruro férrico (500-700 mg/L), dosis de fosfato (700-900 mg/L), velocidad de agitación rápida (250-320 rpm) y velocidad de agitación lenta (90-100 rpm) mediante las experiencias con la prueba de jarras; dichos efectos fueron expresados en los modelos estadísticos donde se obtuvieron valores R^2 de 0,61, 0,66 y 0,67 para % DQO, % turbidez y % fósforo total, respectivamente, y como resultado de la optimización se logró encontrar las condiciones óptimas a 700 mg/L de dosis de cloruro férrico, 900 mg/L de fosfato, 320 rpm de velocidad rápida y 100 rpm para una reducción de 50,75% de DQO, 83,47% de turbidez y 44,08% de fósforo total presentando una deseabilidad de 0,7.

Palabras claves: Agua residual de matadero; coagulación-floculación; metodología de superficie de respuesta (RSM).

ABSTRACT

In the current study, the problem of pollutants present in the wastewater of Camal Conchucos S.A. is exposed and is aimed at determining the optimal conditions for effective reduction percentage of % COD, % turbidity and % total phosphorus. To achieve this objective, the response surface methodology (RSM) was applied, optimizing the coagulation-flocculation process using ferric chloride as coagulant and potassium diacid phosphate as flocculant. The effects of four independent variables were investigated, ferric chloride dose (500-700 mg/L), diacid phosphate of potassium dose (700-900 mg/L), fast stirring speed (250-320 rpm), slow stirring speed (90-100 rpm) through experiences with the jar test; these effects were expressed in the statistical models where R^2 values of 0.61, 0.66 and 0.67 were obtained for % COD, % turbidity and % total phosphorus, respectively, and as a result of the optimization it was possible to find the optimal condition at 700 mg/L ferric chloride dose, 900 mg/L phosphate, 320 rpm fast speed and 100 rpm low speed for a reduction of 50,75% of COD, 83,47% turbidity and 44,08% total phosphorus. Furthermore, the optimization model produces a desirability value of 0,70 that verifies the optimal conditions.

Keywords

Slaughterhouse wastewater; coagulation-flocculation; response surface methodology (RSM).

INTRODUCCIÓN

Los camales producen grandes volúmenes de aguas residuales, debido al sacrificio de animales, limpieza de las instalaciones y plantas de procesamiento de carne (Bustillo-Lecompte y Mehrvar, 2015); siendo sus aguas residuales clasificadas, según la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA), como una de las más nocivas para el medio ambiente (Seif y Moursy, 2001).

La cantidad de agua residual de matadero producida y las características dependen de las condiciones de las instalaciones y de los procesos que se relacionan con la generación de sangre, estiércol, pelo, grasa, plumas, huesos, pieles, detergentes, conservantes, microorganismos patógenos, orina y heces (Rajab et ál., 2017). En consecuencia, estas aguas residuales presentan una alta concentración de contaminantes, tal es el caso de la materia orgánica, lípidos, fósforo total, sólidos totales, entre otros (Ha y Huong, 2017).

Los procesos fisicoquímicos para el tratamiento de las aguas residuales de mataderos presentan una alta eficiencia (Prazeres et ál., 2019), por lo que se ha buscado mejorar la sinergia de ciertos componentes para lograr la optimización del proceso de coagulación-floculación que influye en este tratamiento.

La optimización es una herramienta valiosa para determinar las condiciones de operación necesarias para mejorar el rendimiento de un proceso o sistema (Alwan y Alwasiti, 2013), presentando ventajas como la reducción del número de ensayos experimentales, la posibilidad de ejecutar una mayor cantidad de experimentos, la disminución del consumo excesivo de tiempo, la mejora en la confiabilidad de datos con modelos de primer orden que son insuficientes para establecer una relación entre muchas variables, y en última instancia, la disminución de los costos de materiales y ejecución (Alwan, 2012).

En este trabajo de investigación se usó el método de superficie de respuesta para optimizar el uso de los coagulantes cloruro férrico y fosfato diácido de potasio en el tratamiento del agua residual del Camal Conchucos S.A., condicionando los parámetros independientes para la reducción de contaminantes (DQO, pH, conductividad eléctrica, turbidez y fósforo total),

examinando las condiciones óptimas y la representación visual del gráfico
superpuesto de optimización.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

El crecimiento de la población mundial ha conllevado a un aumento de las descargas inadecuadas de aguas residuales, incrementando la contaminación del agua dulce, especialmente en los países en desarrollo (Grubbs et ál., 2002). Por esta razón, el tratamiento de aguas y las aguas residuales es importante para el desarrollo continuo de la sociedad. Además, las normas que son cada vez más estrictas para la descarga de efluentes en todo el mundo (Bustillo-Lecompte y Mehrvar, 2015).

En los mataderos se lleva a cabo el sacrificio de diferentes animales, ganado, cerdo y aves de corral, mayormente para la comercialización directa de la carne. El proceso está en función al tipo de animal sacrificado, coincidiendo en procesos generales como el sacrificio, sangrado, evisceración, refrigeración y sus respectivos subproductos. Las aguas residuales generadas dependen mucho del tipo de sacrificio de diferentes animales obteniéndose valores con altas concentraciones de turbidez, fosfatos, y conductividad eléctrica (Bustillo-Lecompte y Mehrvar, 2015).

Las aguas residuales generadas por los mataderos incluyen aguas de los diferentes procesos como sacrificio, desplumado o eliminación de pieles, eviscerado y recorte, lavado, desinfección y enfriamiento, por lo que suelen estar compuestas por materias orgánicas que incluyen proteínas, residuos de sangre, grasas etc., (Burton et ál., 2004). Por lo tanto, la eliminación directa de las aguas residuales de los mataderos sin tratar en el medio ambiente está asociada a la aparición del fenómeno de eutrofización, que afecta al ecosistema acuático y también corresponde a puntos de infección que afectan a la salud de familias vulnerables que a menudo tienen acceso a aguas contaminadas (Yaakob et ál., 2018).

Algunos trabajos de investigación señalan diferentes alternativas de tratamiento para aguas residuales que van desde los procesos fisicoquímicos, biológicos y hasta electroquímicos en la aplicación de nuevos métodos avanzados, así como la coagulación química acoplada a procesos Fenton (Gilpavas et ál., 2018). Las

tecnologías comerciales actuales de tratamiento se basan en procesos biológicos y fisicoquímicos que tienen alta inversión y costos de operación (Almansba et ál., 2021). De todos estos, el tratamiento físico-químico presenta ventajas que corresponden a su simplicidad, dosis químicas bastante bajas, tiempo de proceso corto e incluso con su posibilidad real de ser aplicado a escala piloto y comercial (Hilares et ál., 2021). Por otro lado la coagulación parece ser un tratamiento de bajo costo que implica el uso de coagulantes-floculantes con una alta eficiencia en la reducción de contaminantes (Shak y Wu, 2015).

En ese sentido en el presente trabajo de investigación se optimizó el proceso coagulación-floculación usando cloruro férrico y fosfato diácido de potasio para la reducción de contaminantes del agua residual del Camal Conchucos S.A.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿De qué manera la optimización del proceso coagulación-floculación usando cloruro férrico y fosfato mejora la reducción de contaminantes del agua residual del Camal Conchucos S.A., Lima?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuál será el efecto de los parámetros de operación y de las dosificaciones de cloruro férrico y fosfato en la reducción de contaminantes?
- ¿De qué manera los modelos estadísticos en función de los parámetros de operación y las dosificaciones de cloruro férrico y fosfato explican la reducción de contaminantes?
- ¿Cuáles serán las condiciones de operación óptima para maximizar la reducción de contaminantes?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Optimizar el proceso coagulación-floculación usando cloruro férrico y fosfato para la reducción de contaminantes del agua residual del Camal Conchucos S.A., Lima.

1.3.2. Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de los parámetros de operación y de las dosificaciones de cloruro férrico y fosfato en la reducción de contaminantes.
- Analizar los modelos estadísticos en función de los parámetros de operación y de las dosificaciones de cloruro férrico y fosfato que explican la reducción de contaminantes.
- Determinar las condiciones de operación óptimas para maximizar la reducción de contaminantes.

1.4. Limitantes de la investigación

Teórico

La limitación teórica radicó en la poca información sobre la reacción de precipitación de las sales de hierro (III) con el fósforo (II), por lo cual, el marco teórico se basó en el conocimiento de las aguas residuales industriales, procesos en la industria de mataderos y el proceso de coagulación- floculación.

De acuerdo con la tabla 5, la cual muestra la caracterización del agua residual del Camal Conchucos, se limitó a evaluar la reducción de contaminantes inorgánicos, como DQO, pH, fósforo, turbidez y conductividad; y no se estudió la reducción de parámetros microbiológicos.

Temporal

Durante la etapa experimental en laboratorio se identificaron dos limitantes temporales, la primera en relación con el tiempo de reposo de las muestras de agua tratada, debido a que un tiempo de reposo mayor a 1 hora genera re-suspensión del material floculado, dificultando el análisis de los parámetros.

Y la segunda, el tiempo extra que tomó desarrollar las corridas según el diseño desarrollado, por lo que se realizaron solo 2 repeticiones, las cuales influyen en el ajuste del modelo lineal en relación con el error experimental.

Espacial

Para llevar a cabo la aplicación de la tesis, los experimentos se desarrollaron en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Ambiental y de Recursos Naturales, de la UNAC. El contexto del COVID 19 no facilitó el transporte del lote de agua residual del Camal Conchucos hacia el laboratorio de la UNAC para el tratamiento de este.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. A nivel internacional

Gökçek y Özdemir, (2020) en su trabajo de investigación titulado “Optimización del proceso de coagulación-floculación de aguas residuales de matadero mediante la metodología de superficie de respuesta”, tuvieron como objetivo optimizar el proceso de coagulación-floculación y examinar los efectos de los factores experimentales entre sí, por ejemplo, el pH, la concentración de dos coagulantes diferentes (FeCl_3 y alumbre), velocidad de mezcla rápida y tiempo de sedimentación. Usaron el método de optimización de superficie de respuesta (RSM). Eligieron variables respuestas a la DQO, la turbidez y los sólidos en suspensión (SS). Los resultados mostraron que el coagulante de alumbre dio mejores resultados para las tres respuestas aumentando la eficiencia de remoción de DQO, SS y turbidez en un 75,25%, 90,16% y 91,18%, respectivamente. Mientras el uso de FeCl_3 obtuvieron un óptimo para el DQO, SS y Turbidez de 72,64%, 60,16% y 60,17%, respectivamente.

Prazeres et ál., (2019) en su trabajo de investigación titulado “Tratamiento de aguas residuales de matadero por precipitación ácida (H_2SO_4 , HCl y HNO_3) y oxidación ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$, H_2O_2 y CaO_2)” tuvo como objetivo tratar las aguas residuales de los mataderos mediante precipitaciones ácidas como mediante procesos de oxidación. Las pruebas de precipitación se desarrollaron utilizando tres ácidos (H_2SO_4 , HCl y HNO_3) a diferentes pH (1-6) y también probaron tres procesos de oxidación $\text{Ca}(\text{ClO})_2$, H_2O_2 y CaO_2 con una concentración de (1-15 g/L). Los resultados mostraron que en el proceso de acidez se redujo el DQO (41–97%), la turbidez (56–99%) y el fósforo total (27–56%). Los resultados del proceso de oxidación mostraron la eliminación de DQO $\geq 71\%$ y turbidez de 85-100%. El CaO_2 fue muy eficaz para eliminar el fósforo total (81–96%). Concluyeron que tanto la precipitación ácida y la oxidación permitieron eliminar los sólidos totales (TS), los sólidos

volátiles totales (TVS), los sólidos suspendidos totales (TSS), el nitrógeno amoniacal, los nitratos y la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

Bustillo-Lecompte y Mehrvar, (2017) en su trabajo de investigación titulado “Tratamiento de las aguas residuales del matadero mediante procesos combinados anaeróbicos-aeróbicos para la generación de biogás y la eliminación de sustancias orgánicas y nutrientes: un estudio de optimización hacia una producción más limpia en la industria de procesamiento de carne” tuvieron el objetivo de estudiar un sistema biológico combinado, que incluye procesos aeróbicos como lodos activados y anaeróbicos con deflectores (ABR). Usaron una metodología de superficie de respuesta (RSM) para la optimización del proceso y maximizar el rendimiento de biogás, eliminación del carbono orgánico total (COT) y el nitrógeno total (TN) mientras minimizaron los sólidos suspendidos totales. Los resultados mostraron que las remociones máximas de COT y TN son de 85,03% y 72,10%, y el residuo mínimo de SST es de 19,54 mg/L. Las concentraciones óptimas de operación fueron: COT del afluente de 343 mg/L, el flujo de alimentación velocidad de 63 mL/min, y el pH de 6,84. Concluyeron que las predicciones del modelo y los valores experimentales indica que el modelo propuesto podría describir el desempeño de los sistemas combinados anaeróbicos-aeróbicos.

Boughou et ál., (2016) en su trabajo de investigación titulado “Tratamiento fisicoquímico mediante coagulación-floculación de las aguas residuales del matadero de la ciudad de Rabat (Marruecos)” tuvo como objetivo tratar las aguas residuales de los mataderos mediante tratamiento fisicoquímico de floculación por coagulación utilizando cloruro férrico (FeCl₃) como coagulante químico. Las pruebas de Jarras se utilizaron para encontrar las condiciones óptimas que reducen los sólidos en suspensión. Los resultados obtenidos tras la sedimentación muestran un grado de eliminación de sólidos en suspensión de aproximadamente el 98%. La ecuación experimental

resultante para la correlación entre el tiempo de sedimentación y la altura de la columna de sedimentación fue validada según la ley de Kynch.

Bakar y Halim, (2013) en su trabajo de investigación titulado “Tratamiento de aguas residuales automotrices por coagulación, floculación utilizando cloruro de polialuminio (PAC), cloruro férrico (FeCl_3) y sulfato de aluminio (alumbre)” tuvieron como objetivo emplear un tratamiento fisicoquímico (coagulación-floculación) a las aguas residuales de automoción usando cloruro de polialuminio (PAC), cloruro férrico (FeCl_3) y sulfato de aluminio (alumbre) con la adición de poliacrilamida aniónica como floculante para determinar la efectividad del método de coagulación para la eliminación de DQO, TSS y metales pesados (Fe, Ni y Zn). Los resultados demostraron que las condiciones óptimas definidas para el experimento (dosis de coagulante: 70 mg/L, dosis de coagulante auxiliar: 2 mg/L y pH 7), el PAC mostró una eliminación del 70% para (demanda química de oxígeno) DQO y 98% de (sólido suspendido total) TSS. Para FeCl_3 y alumbre, la remoción máxima de DQO fue del 64 % y 54 %, mientras que la remoción de SST fue del 91% y 94%. La remoción de metales pesados usando PAC también mostró mejores resultados en los que se produjo un 98% de remoción de Hierro, 83% de remoción de Zinc y 63% de remoción de níquel en condiciones óptimas. Concluyeron que el PAC era comparativamente más eficaz que el FeCl_3 y el alumbre.

2.1.2. A nivel nacional

Gutiérrez y Pilco, (2020) en la investigación titulada “Optimización de la remoción de compuestos orgánicos persistentes mediante el proceso foto-Fenton” tuvieron como objetivo evaluar la condición óptima del tratamiento de un agua residual textil sintética mediante el proceso foto-Fenton, a fin de remover los compuestos orgánicos persistentes usando un reactor fotoquímico en lote a escala laboratorio aplicando la metodología de superficie de respuesta. Desarrollaron un diseño experimental de cribado definitivo empleando la metodología de superficie de respuesta con cuatro factores a tres niveles, los cuales fueron: la relación de reactivos Fenton

$\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ (11,25, 18,75, 26,25 mg/L / mg/L), la potencia de lámpara UV (4, 11, 18 W), el potencial de hidrógeno (2, 3, 4) y el tiempo de tratamiento (60, 120, 180 min). Como resultado se encontraron que los niveles óptimos para los cuatro factores eran los siguientes: la relación de reactivos Fenton $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ igual a 17 mg/L / mg/L, la potencia de la lámpara UV igual a 4 W, el pH igual a 3 y el tiempo de tratamiento a 180 min. Esta investigación concluye que el proceso foto-Fenton es muy efectivo para tratar el agua residual textil sintética, con una remoción del 86%, respecto al DQO.

Sucso, (2020) en su trabajo de investigación titulado “Recuperación de plomo por coagulación-floculación en la cuenca del río Suches” tuvo como objetivo recuperar plomo de las aguas de la cuenca del río Suches, aplicando el proceso de coagulación-floculación, para lo cual usó como coagulante al sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ y como floculante al hidróxido de sodio. Los parámetros fisicoquímicos del agua contienen plomo (0,1235 mg/L), que supera el estándar de calidad ambiental establecido por la Ley General del Ambiente, a través del Decreto Supremo N° 004-2017- MINAM. Las variables independientes fueron el pH, la velocidad de agitación y el tiempo de agitación, con el objetivo de establecer sus influencias en los procesos ensayados para recuperar el Pb. Luego de efectuar el modelo matemático por experimentación y estadística, obtuvo una velocidad de agitación óptima de 15 rpm y un tiempo de 20 minutos a un pH de 11. Los resultados indicaron que se recuperó 0,009341 mg/L de Pb con un 92,4363%.

Chambi, (2018), en su trabajo de investigación titulado “Tratamiento de aguas residuales de lavanderías por el proceso de coagulación-floculación y adsorción” tuvo como objetivo remover sólidos suspendidos con policloruro de aluminio y sulfato de aluminio. Las muestras utilizadas de agua fueron de la lavandería Don Marcelo en la ciudad de Puno, de las que se realizaron el análisis de la concentración de detergentes. Los experimentos consistieron en dos etapas, la primera de ellas mediante el proceso de coagulación-floculación y luego utilización de la adsorción mediante carbón activado. Los resultados indicaron que la adsorción con carbón activado de cuesco de

palma en polvo logró remover detergente al 93,43%, con un pH de 6 y tiempo de 60 min, mientras con carbón activado de cáscara de coco en polvo obtuvo una remoción del 95,31% de detergente, con un pH de 10 y tiempo de adsorción de 60 min. Las concentraciones finales de detergente en agua residual tratada con carbón activado casco de palma en polvo y con carbón activado cáscara de coco fueron de 0,15 mg/L y 0,12 mg/L, respectivamente. Según las normas ambiental para efluentes el límite máximo permisible en detergentes es 0,5 mg/L. Por lo tanto, ambas cumplen con las normas ambientales de calidad de agua para el vertido en cuerpos de agua.

Medina et ál., (2018), en su trabajo de investigación de tesis doctoral titulado “Tratamiento mediante la tecnología de lodos activados del agua residual del camal de Carhuaz” tuvo como objetivo el agua residual proveniente del proceso de lavado de los animales sacrificados (ovinos, porcinos y vacunos). Las características fisicoquímicas del agua residual fueron analizadas en tres diferentes horarios en un día; a las 7 a.m., 11 a.m. y 1 p.m.; obteniendo mayor concentración de los parámetros fisicoquímicos como (DBO_5) = 1840 ppm, demanda química de oxígeno (DQO) = 2525 ppm, sólidos suspendidos totales (SST) = 1146 ppm, fósforo total (PT) = 2,66 ppm, y nitrógeno total (N-Total) = 13 ppm. Usaron el tratamiento mediante la tecnología de lodos activados, este proceso se inició con un pretratamiento (test de jarras) para luego continuar en una sedimentación primaria con un tiempo de retención de 9 horas (para mayor sedimentación), continuando en el biorreactor con un tiempo de retención hidráulica de 6 horas, cuya aireación se dio con difusores esféricos y bombas de aire de 5 W, 9 W y 15 W. Los resultados mostraron demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) = 280 mg/L, demanda química de oxígeno (DQO) = 580 mg/L, fósforo total = 8 ppm, nitrógeno total = 1,33 ppm, sólidos suspendidos totales = 231 ppm y pH = 7,75.

Azabache, (2017) en su investigación, para obtener el título de doctor, titulada “Efecto del proceso de coagulación-floculación, en la remoción de hierro (II), presente en las aguas de la quebrada Juningullo, Moyobamba” tuvo como objetivo analizar el efecto que tienen las variables de velocidad y

dosis de sulfato de aluminio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, así como la que ejerce el floculante (cloruro férrico FeCl_3) para lo cual se utilizó un equipo de “test de jarras”, realizando pruebas a 6 niveles de dosis aplicada y a 5 niveles de velocidad de agitación. Los resultados demuestran que las mejores condiciones usando sulfato de aluminio se lograron con una dosis de 120 mg/L, a una velocidad de 100 rpm de mezcla rápida y 25 rpm de mezcla lenta, disminuyendo parámetros como el color, la turbidez y la concentración inicial de Fe (II), variando desde 1,37 mg/L hasta 0,05 mg/L. El análisis estadístico demuestra que sí hay diferencia significativa cuando se utiliza el sulfato de aluminio y cuando se utiliza el cloruro férrico, por lo cual su uso tiene efecto en la reducción de concentración de Fe (II).

Ascurra et ál. (2013) en su investigación titulada “Optimización de sulfato de aluminio para la remoción de materia orgánica en la obtención de agua potable” tuvo como objetivo determinar el menor nivel de turbidez del agua de abastecimiento para ciertas concentraciones de óxido de calcio y sulfato de aluminio para lo cual se utilizó como población la totalidad de agua que pasa por la canaleta ubicada entre la Facultad de Ingeniería Pesquera y la plaza frente al pabellón docente de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Así mismo, la muestra representa un volumen de agua tomada de la población, una vez al mes y durante seis meses en forma aleatoria para su análisis. Considerando como variables independientes: la optimización de óxido de calcio y la optimización de sulfato de aluminio, y como variables dependientes: el acondicionamiento para mayor remoción de materia orgánica (menor nivel de turbidez) para cada variable independiente. Los resultados indicaron que la concentración óptima de óxido de calcio fue de 200 mg/L como agente coadyuvante en los procesos de coagulación-floculación y la del sulfato de aluminio fue de 120 mg/L como reactivo de los procesos de coagulación-floculación, usando la prueba de jarras.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. El recurso agua

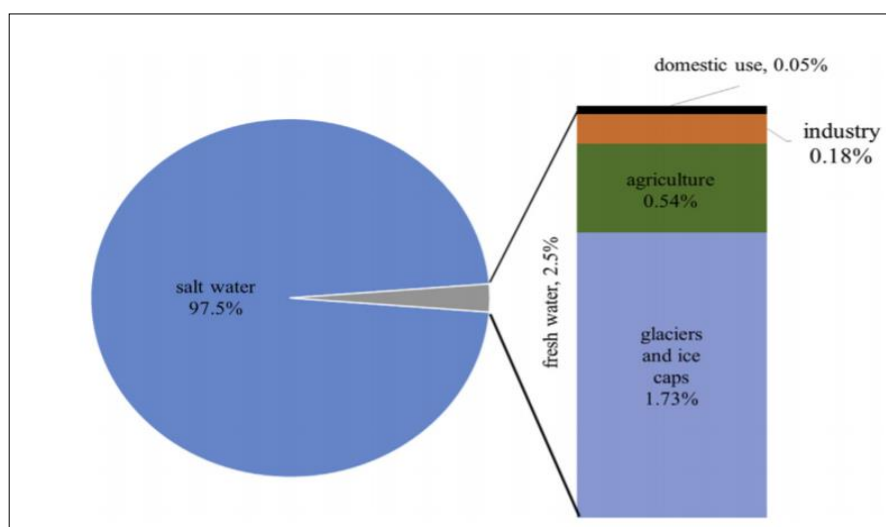
El agua dulce comprende solo el 3% del agua total disponible para los humanos como se muestra en la figura 1. Solo el 0,06% es de fácil acceso

para el uso humano. El agua la podemos encontrar en la naturaleza de forma líquido, sólido y gaseoso. A temperatura ambiente, es insípido, inodoro e incoloro con un ligero rastro de azul. Es considerado uno de los mejores solventes conocidos y tiene el poder de disolver más sustancias que cualquier otro líquido y, debido a este poder, el agua a menudo se conoce como el solvente universal. Las propiedades solventes del agua han influido mucho en la pureza y las propiedades del agua, ya que las pueden hacer variar marginalmente (Hossain, 2015).

El agua la encontramos en forma líquida a las temperaturas y presiones atmosféricas normales que se encuentran en la superficie de la tierra. La mayoría de los compuestos o elementos los encontramos en forma de gas o sólidos en nuestra biosfera (las excepciones incluyen mercurio y algunos compuestos orgánicos). El agua es una molécula inusual porque la estructura de dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno le proporciona varias características que la convierten en el solvente universal. Primero está el hecho de que los dos átomos de hidrógeno, situados en un lado del átomo de oxígeno, llevan cargas positivas, mientras que el átomo de oxígeno retiene una carga negativa (Brusseau et ál., 2019; Dodds et ál., 2020).

Figura 1

Visualización de la distribución del agua en la tierra



Fuente: (Sillanpää y Shestakova, 2017)

A. Calidad de agua

La buena calidad del agua es importante para que un ecosistema sea saludable. Los parámetros físicos, químicos y biológicos de calidad del agua se describen a continuación (D. Li y Liu, 2019).

i. Parámetros fisicoquímicos

Turbidez

La turbidez indica la cantidad de partículas finas que están suspendidas en el agua. Puede contener arcilla, limo, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, plancton y otros organismos microscópicos. Una alta concentración de partículas en suspensión podría dañar el hábitat de los peces y otros organismos acuáticos (Brasington y Richards, 2000).

pH

El pH es uno de los parámetros más importantes y se utiliza con frecuencia para monitorear la calidad del agua, ya que el proceso del tratamiento de aguas residuales depende del pH. La medición del pH muestra si una solución es ácida o alcalina. Si la solución tiene la misma concentración de iones hidrógeno e iones hidroxilo, el pH se considera neutro. La escala de pH es logarítmica y va de 0,0 a 14,0, con 7,0 siendo neutro. Las lecturas inferiores a 7,0 indican soluciones ácidas, mientras que las lecturas superiores a 7,0 indican soluciones alcalinas o básicas (Li et ál., 2019)

Conductividad eléctrica

Es la medida de la capacidad que tiene una solución acuosa para conducir la corriente eléctrica. Esta capacidad está directamente relacionada con la concentración de iones en el agua. Frecuentemente se usa como una medida indirecta de la salinidad y de los sólidos disueltos totales (SDT). Los compuestos inorgánicos son buenos

conductores eléctricos a comparación de los compuestos orgánicos (Crescentini et ál., 2011).

ii. Parámetros inorgánicos

Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno (DQO) es una medida indicativa de la cantidad de oxígeno que pueden consumir las reacciones en una solución medida. Se expresa comúnmente en masa de oxígeno consumido sobre el volumen de solución, que en unidades SI es miligramos por litro (mg/L). Es un indicador del contenido de sustancias reductoras en el agua, que son orgánicas, nitritos, sulfuros, sales ferrosas, etc. La aplicación más común de DQO es cuantificar la cantidad de contaminantes oxidables que se encuentran en las aguas superficiales (por ejemplo, laguna, lagos y ríos) o aguas residuales (D. Li et ál., 2019).

Fósforo total (PT)

El fósforo total es la medida indicativa de la cantidad de especies solubles como ortofosfato, polifosfato y fósforo orgánico, así como también especies coloidales y polímeros. Se expresa comúnmente en masa de fosfato sobre el volumen de solución, que en unidades SI es miligramos por litro (mg/L) (Sánchez, 2001).

2.2.2. 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 (Barraza y Palpa, 2011)

2.2.3. Contaminación del agua por la industria de mataderos

Según Luna, (2017) menciona que en 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, donde su valor numérico varía dependiendo la cantidad de animales sacrificados en el día. Salas y Condorhuamán, (2008) describen que la generación de vertidos de aguas residuales está compuesta por una gran cantidad de carga orgánica y de nutrientes provenientes de la sangre propia de la matanza de ganado asimismo con un contenido importante de sólidos en suspensión, grasas y aceites.

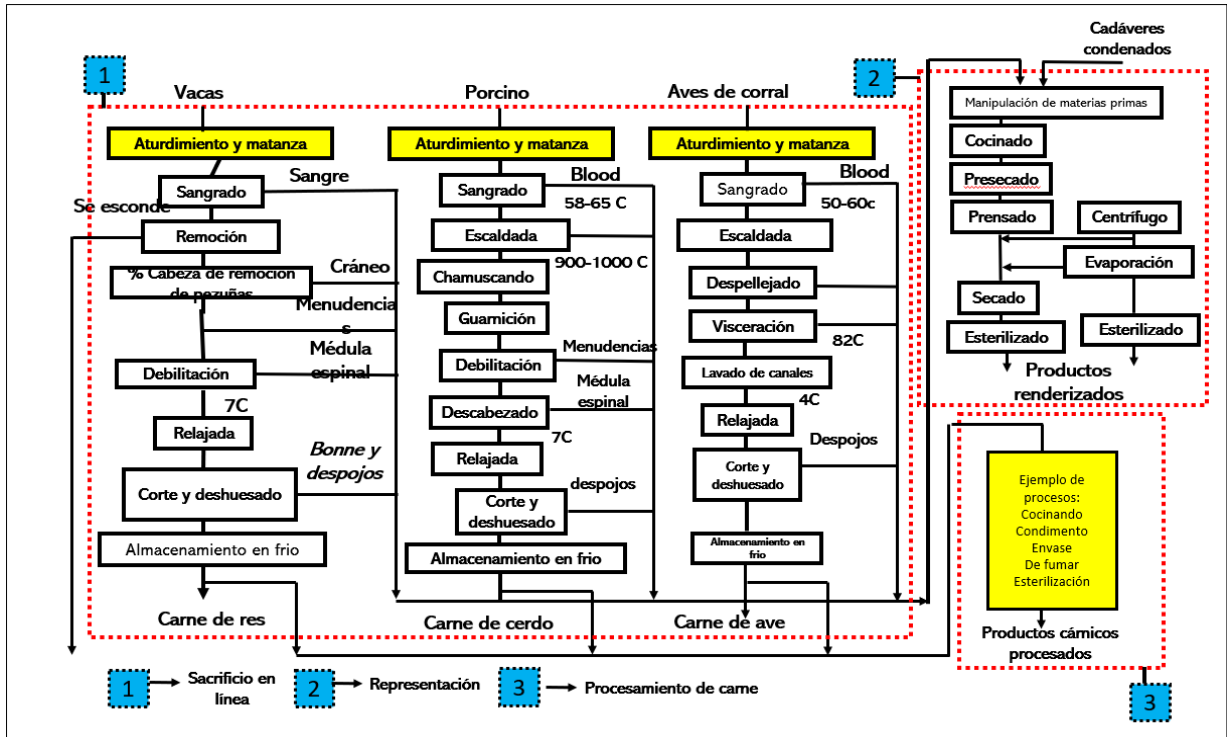
2.2.4. Procesos de la industria de mataderos

A. Corrientes de aguas residuales de un matadero

En los mataderos se lleva a cabo el sacrificio de diferentes animales, ganado, cerdo y aves de corral, mayoritariamente para la comercialización directa de la carne. El proceso está en función al tipo de animal sacrificado, coincidiendo en procesos generales como el sacrificio, sangrado, evisceración, refrigeración y sus respectivos subproductos. En la figura 2 se muestra una comparación entre el proceso de procesamiento de carne de ganado, cerdo y aves de corral.

Figura 2

Diagrama de procesos en mataderos para vacas, porcinos y aves de corral



Fuente: (Ramírez et ál., 2006)

B. Descripción del proceso

A continuación, se describirán de manera general los procesos operativos que se llevan a cabo en mataderos:

Recepción y estabulación del animal: Hasta el momento de ser sacrificado el ganado es retenido en establos durante un periodo de tiempo medio de 12 h (Ruiz y Veca, 1993), se mantiene a los animales relajados y calmados como sea posible para que los niveles de adrenalina sean normales y la calidad de la carne sea mejor. A continuación, los animales son aturridos (después de anestesiar a fin de que no sufran) y se cuelgan (Bugallo et ál., 2014). En el caso de las aves de corral se le aturden mediante la aplicación de una descarga eléctrica en la región de la cabeza.

Sacrificio y despiece: Para cerdos y ganados se corta los grandes vasos del cuello, se realiza la extracción de sangre que se recoge en un canal aislado. Para aves de corral se realiza el sacrificio seccionando la yugular, con la extracción de sangre para su reutilización. Una vez muerto el animal se le desangra, se le arranca la piel o plumas, se abre el canal separando

las vísceras blancas (estómago y tripas) de las rojas (pulmones ,corazón ,hígado) y se le cortan las partes que no se aprovechan ,las que no entran en la definición de peso en canal (cabeza y pezuña) (Ruiz y Veca, 1993).

Lavado de viseras: Un posterior lavado de vísceras comestibles (hígado, corazón y molleja), intestinos y los pulmones (aspiración extraída), también se vacía el contenido de los estómagos (rumen) y de las tripas y se procede al lavado para aprovechamiento posterior (Ramirez et ál., 2006).

2.2.5. Tratamiento de aguas residuales de mataderos

El gran consumo mundial de carnes de cerdo, ganado o aves de corral sugiere una alta demanda de estos productos (Borowski y Kubacki, 2015), siendo los efluentes procedente de los mataderos clasificados según la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) como uno de la más nociva para el medio ambiente (Seif y Moursy, 2001). Los efluentes de matadero se caracterizan por un alto contenido orgánico principalmente de proteínas y grasas. De hecho, hay poca información disponible sobre su cuantificación, características de los efluentes y opciones de tratamiento de los residuos (Palatsi et ál., 2011).

A. Tratamiento fisicoquímico de aguas residuales industriales

Los procesos para el tratamiento de aguas residuales se basan en la eliminación de los contaminantes hasta alcanzar los valores máximos permisibles de acuerdo a las normas y estándares nacionales o internacionales (Del Carpio y De Celis, 2019)

La finalidad del tratamiento fisicoquímico consiste en la eliminación de las materias finas en suspensión no decantables, y de las materias coloidales. Estas partículas coloidales se componen de sílice coloidal, arcilla y/o partículas orgánicas las cuales presentan gran estabilidad en el agua con un tamaño comprendido entre 0,001 y 1 μm . Debido a la gran estabilidad que presentan, resulta imposible separarlas por decantación o flotación. Tampoco es posible separarlas por filtración porque pasarían a través de cualquier filtro (Del Carpio y De Celis, 2019).

iii. Proceso de coagulación

La coagulación es el proceso que consiste en la adición de sustancias químicas al agua, su distribución uniforme en ella y la formación de un floculo fácilmente sedimentable. También se puede definir como el proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua llamadas floculos (Vargas y Romero, 2010) La coagulación prepara el agua para la sedimentación, incrementa grandemente la eficiencia de los sedimentadores y tiene como función principal desestabilizar, agregar y unir las sustancias coloidales presentes en el agua. El proceso remueve turbiedad, color, bacterias, algas y otros organismos planctónicos, fosfatos y sustancias productoras de olores y sabores. La coagulación es el proceso que se usa más ampliamente para remover las sustancias turbiedad en el agua, las cuales son a menudo inorgánicas, mientras que las que causan olor, sabor o color son generalmente orgánicas (Vargas y Romero, 2010).

El proceso de coagulación se usa principalmente para:

- Remoción de turbidez orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- Remoción de color verdadero y aparente.
- Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos.
- Destrucción de algas y plancton en general.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos en otros.

En cuanto a mecanismos de coagulación, se pueden clasificar en:

- Compresión de la doble capa.
- Adsorción y neutralización de cargas.
- Atrapamiento de partículas en un precipitado.
- Adsorción y puente.

Tipos de coagulantes

Los componentes son productos químicos que al adicionar al agua son capaces de producir una reacción química con los componentes químicos

del agua, especialmente con la alcalinidad del agua para formar un precipitado voluminoso, muy absorbente, constituido generalmente por el hidróxido metálico del coagulante que se está utilizando.

Los principales coagulantes utilizados para desestabilizar las partículas y producir el floc son (Andía, 2000) :

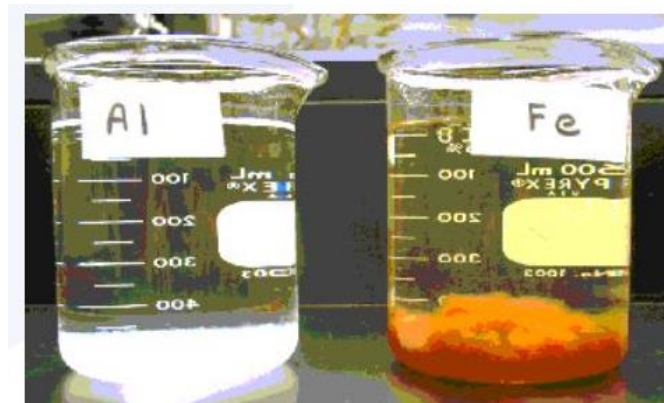
- Sulfato de aluminio.
- Aluminato de sodio.
- Cloruro de aluminio.
- Cloruro férrico.
- Sulfato férrico.
- Sulfato ferroso.
- Polielectrolitos (como ayudantes de floculación).

Siendo los más utilizados las sales de aluminio y de hierro; cuando se adiciona estas sales al agua se producen una serie de reacciones muy complejas donde los productos de hidrólisis son más eficaces que los iones mismos; estas sales tal y como se muestra en la figura 3 reaccionan con la alcalinidad del agua y producen los hidróxidos de aluminio o hierro que son insolubles y forman los precipitados (Andía, 2000).

Entre los tipos de coagulantes que son utilizados en el tratamiento del agua, se tienen los siguientes: los coagulantes inorgánicos y sintéticos.

Figura 3

Cloruro férrico y sulfato de aluminio en el proceso de coagulación-floculación

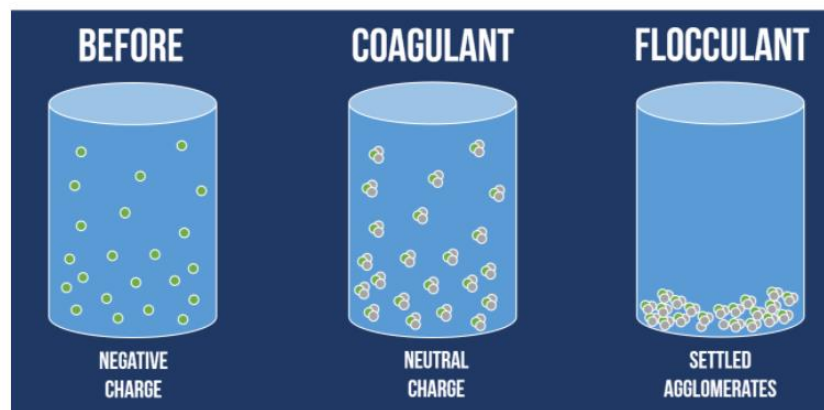


Fuente: (WWOA, 2018)

El cloruro férrico usado como coagulante, tiene ventajas al compararlo con otros, entre las que se destacan su efectividad en amplios rangos de pH y temperatura. Además genera iones trivalentes de mayor peso molecular, esenciales para el proceso de coagulación (Zerbatto et ál., 2009). Se muestra en la figura 4.

Figura 4

Coagulación- floculación antes y después



Fuente: (Bradley, 2019)

Coagulantes inorgánicos

Desde siglos atrás los coagulantes más utilizados han sido las sales metálicas por su alta efectividad y su bajo precio, estas sales metálicas reaccionan con la alcalinidad del agua y forman los hidróxidos de aluminio o hierro los cuales son insolubles y permiten la formación de precipitados. El principal problema de los coagulantes inorgánicos es derivado de su naturaleza química, ya que los fangos que se forman contienen sustancias dañinas para la salud humana y el ambiental, así que para ser reutilizados como fertilizantes en cultivos agrícolas necesitarían un tratamiento, lo cual supone costos extras. Dentro de los coagulantes sintéticos más utilizados en el tratamiento del agua encontramos: sulfato de aluminio $[Al_2(SO_4)_3]$, sulfato ferroso $(FeSO_4)$, sulfato férrico $[Fe_2(SO_4)_3]$ y cloruro férrico $(FeCl_3)$ (Yanguas, 2016).

Coagulantes sintéticos

Los coagulantes sintéticos son productos líquidos con carácter orgánico e inorgánico que presentan una mayor eficacia que los coagulantes inorgánicos, ya que, desestabilizando tanto las partículas coloidales suspendidas como las partículas coloidales disueltas, permiten la formación de flóculos más consistentes, minimizan la variación del pH y el incremento de la conductividad (Yanguas, 2016).

Coagulantes orgánicos

Los coagulantes orgánicos están compuestos por productos químicos líquidos que presentan una gran eficiencia debido a su estructura polimérica y en la fuerza de cargas catiónicas. Debido a su carácter orgánico, se minimiza la posible variación del pH y de la conductividad. Además, se elimina totalmente el incremento de sales (Yanguas, 2016).

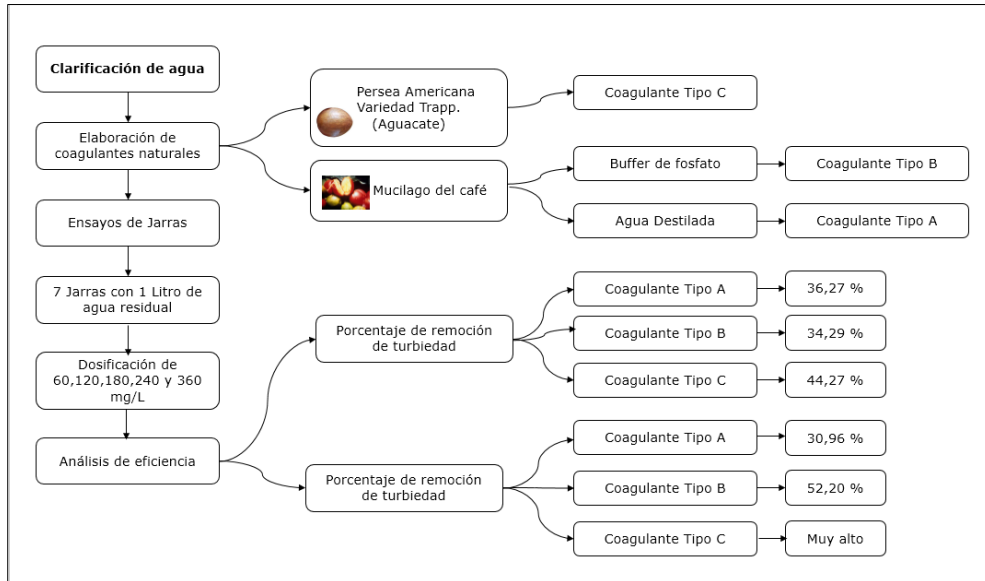
Coagulantes naturales

Los coagulantes naturales son sustancias de origen vegetal o animal que actúan de modo similar a los coagulantes de origen sintético, desestabilizando y aglomerando las partículas coloidales en suspensión, para reducir la turbidez del sistema coloidal. Algunos coagulantes naturales poseen propiedades antimicrobianas, por lo que disminuyen o eliminan el contenido de microorganismos patógenos. Son coagulantes alternativos que pueden lograr un rendimiento igual o incluso mayor a los de origen sintético, además presentan un valor agregado adicional relacionado con las características de ser biodegradable (Yanguas, 2016).

El origen natural de estos coagulantes mostrados en la figura 5 hace que su manipulación sea más segura para las personas, los lodos generados pueden ser utilizados en la agricultura, ya que no contienen metales. Al utilizar este tipo de coagulantes se consigue un menor volumen de fango (Yanguas, 2016).

Figura 5

Coagulantes naturales



Fuente: (Yanguas, 2016)

Factores que influyen en el proceso de coagulación

Es necesario tener en cuenta los siguientes factores con la finalidad de optimizar el proceso de coagulación (Yanguas, 2016):

- pH.
- Turbidez.
- Sales disueltas.
- Temperatura del agua.
- Tipo de coagulante utilizado.
- Condiciones de mezcla.
- Sistemas de aplicación de los coagulantes.
- Tipos de mezcla y el color.

iv. Proceso de floculación

La floculación es un proceso que sirve como complemento de la coagulación y consiste en la agitación de la masa coagulada para favorecer el crecimiento y aglomeración de los flóculos recién formados con la finalidad de aumentar el tamaño y peso necesarios para sedimentar con facilidad. Estos flóculos, inicialmente pequeños, al

juntarse crean aglomerados mayores que son capaces de sedimentar (Andía, 2000).

A veces los flóculos formados por la aglomeración de varios coloides no llegan a ser lo suficientemente grandes como para sedimentar con la rapidez deseada, por lo que el empleo de un floculante es necesario para reunirlos en forma de red, formando puentes de una superficie a otra y enlazando las partículas individuales en aglomerados, como se muestra en la figura 6 (Andía, 2000).

La floculación es favorecida por el mezclado lento que permite juntar poco a poco los flóculos. Al realizar un mezclado intenso, se rompen y raramente se vuelven a formar. La floculación no solo incrementa el tamaño de los flóculos, sino que también aumenta su peso (Andía, 2000).

Figura 6

Mecanismo de aglomeración de partículas coloidales empleando floculante



Fuente: (Andía, 2000)

2.3. Conceptual

2.3.1. Coagulación

La coagulación puede entenderse como la desestabilización eléctrica de algunas partículas mediante la adición de sustancias químicas llamadas coagulantes. La operación se efectúa en tanques de mezcla rápida en los que mediante una agitación intensa se forma una solución homogénea de los coagulantes con el agua en el menor tiempo posible (Jordán, 2019).

2.3.2. Floculación

Se refiere a un proceso que ocurre de forma lenta con la finalidad permitir los contactos entre flóculos. La mezcla debe ser lo suficiente para crear diferencias de velocidad del agua dentro de la unidad pero no muy grande, ya que los flóculos corren el riesgo de romperse; aún si el tiempo es no más del tiempo óptimo de floculación (Andía, 2000).

2.3.3. Coagulación-floculación

El proceso de coagulación–floculación consiste en añadir al agua o agua residual determinados aditivos químicos con el objetivo de favorecer la sedimentación de materia coloidal no sedimentable o aumentar la rapidez de sedimentación por la formación de flóculos (Bermúdez et ál., 2009).

2.3.4. Reducción de contaminantes

Se define como la disminución de un exceso de materia o energía (calor) que provoque daño a humanos, animales, plantas y bienes, o que perturbe las actividades que se desarrollan con agua, es decir, que limitan su uso en condiciones seguras de salud para el hombre y el ambiente (Torre, 2015).

2.3.5. Aguas residuales

Aguas cuyas características han sido modificadas por actividades antropogénicas, requieren de tratamiento previo y pueden ser vertidas a un cuerpo natural de agua o ser reutilizadas. Las aguas residuales municipales comprenden tanto a las aguas residuales domésticas como también la mezcla con aguas residuales industriales en tanto estas últimas cumplan con los requisitos para ser admitidas en la red de alcantarillado (MINAM, 2012).

2.4. Definición de términos básicos

Aguas residuales

Aguas cuyas características han sido modificadas por actividades antropogénicas (MINAM, 2012).

Matadero

Sitio donde se mata y desuella el ganado destinado al abasto público (RAE, 2001).

Efluente

Descarga directa de aguas residuales que son descargadas al ambiente, cuya concentración de sustancias contaminantes es medida a través de los Límites Máximos Permisibles (LMP) (RAE, 2001)

Vertimiento

Está referido a toda descarga deliberada de aguas residuales a un cuerpo natural de agua. Se excluyen las provenientes de naves y artefactos navales, así como la descarga de aguas residuales al alcantarillado (MINAM, 2012).

Floculante

Agente que produce floculación (RAE, 2001).

Coagulante

Agente que produce coagulación (RAE, 2001).

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis general

- La optimización del proceso coagulación-floculación usando cloruro férrico y fosfato mejora significativamente la reducción de contaminantes del agua residual del Camal Conchucos S.A., Lima.

3.1.2. Hipótesis específicas

- Al menos alguno de los efectos de los parámetros de operación, la dosificación de cloruro férrico y fosfato será significativo en la reducción de contaminantes.
- Los modelos estadísticos en función de los parámetros de operación, la dosificación de cloruro férrico y fosfato, explican la variabilidad de la reducción de contaminantes en un R^2 mayor al 85%.
- Existen algunas condiciones de operación óptimas que permitirán maximizar la reducción de contaminantes.

3.2. Definición conceptual de variables

Tabla 1

Definición conceptual de las variables

Variables	Definición conceptual
Variable independiente X= Proceso de coagulación-floculación	El proceso de coagulación–floculación consiste en añadir al agua residual determinados aditivos químicos con el objetivo de favorecer la sedimentación de materia coloidal no sedimentable o aumentar la rapidez de sedimentación por la formación de flóculos (Bermúdez et ál., 2009) Para esta investigación los aditivos químicos serán el cloruro férrico y el fosfato diácido de potasio.
Variable dependiente Y= Reducción de contaminantes	El grado de contaminación por agentes contaminantes se define como aquellos que contienen un exceso de materia o energía (calor) que provoque daño a humanos, animales, plantas y bienes, o que perturbe las actividades que se desarrollan con agua, es decir, que limitan su uso en condiciones seguras de salud para el hombre y el ambiente (Torre, 2015). Por lo tanto, la reducción de contaminantes se referirá a la disminución del grado de estos parámetros.

3.2.1. Operacionalización de las variables

Tabla 2

Operacionalización de las variables

Variable independiente	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Unidad de medición	Método	Técnica
Proceso de coagulación-floculación	El proceso de coagulación-floculación se realizará en un equipo de prueba de jarras variando la velocidad rápida y lenta, y la dosificación de cloruro férrico y de fosfato diácido de potasio.	Dosificación	Cantidad del cloruro férrico	mg/L	Hipotético-deductivo	Observación experimental
			Cantidad del fosfato diácido de potasio	mg/L		
		Parámetros de operación	Velocidad de agitación rápida	rpm		
			Velocidad de agitación lenta	rpm		
Variable dependiente	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Unidad de medición	método	Técnica
Reducción de contaminantes	La reducción de contaminantes del agua es evaluada mediante la medición de DQO, fósforo total, turbidez, pH y conductividad.	Porcentaje de reducción	% de reducción de DQO	%	Hipotético-deductivo	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Parte 5220 D, 23rd Ed:2017.
			% de reducción fósforo total	%		SMEWW-APHA-AWWA-WEF Parte 4500 P, E, 23rd Ed:2017
			% turbidez	NTU		SMEWW-APHA-AWWA-WEF Parte 2130 B; 23rd Ed:2017
			pH	0-14		EPA 300.0 Rev. 2.1:1993
			Conductividad	uS/cm		Electrometría

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1. Tipo y diseño de investigación

4.1.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, porque busca la aplicación o utilización de los conocimientos adquiridos para resolver problemas prácticos, también será longitudinal, analítica y explicará un proceso de “mejora” al optimizar el proceso coagulación-floculación usando cloruro férrico y fosfato diácido de potasio para la reducción de contaminantes (Hernández et ál., 2014)

4.1.2. Diseño de investigación

El diseño de la investigación es de tipo experimental (Hernández y Baptista, 2014)

Para llevar a cabo la investigación se observa las etapas del diseño de la investigación en la figura 7. El diseño de investigación hace referencia a un diseño factorial compuesto mediante el método de superficie de respuesta (entre grupos: velocidad de agitación rápida, velocidad de agitación lenta, dosis de fosfato y dosis de cloruro férrico) y los parámetros de respuesta (medidas con 2 repeticiones de los indicadores conductividad eléctrica, pH, DQO y fósforo total). Este modelo analítico responde a un análisis de varianza factorial (ANOVA) mixto formando un arreglo experimental.

Figura 7

Diseño de la investigación



a. Caracterización del agua

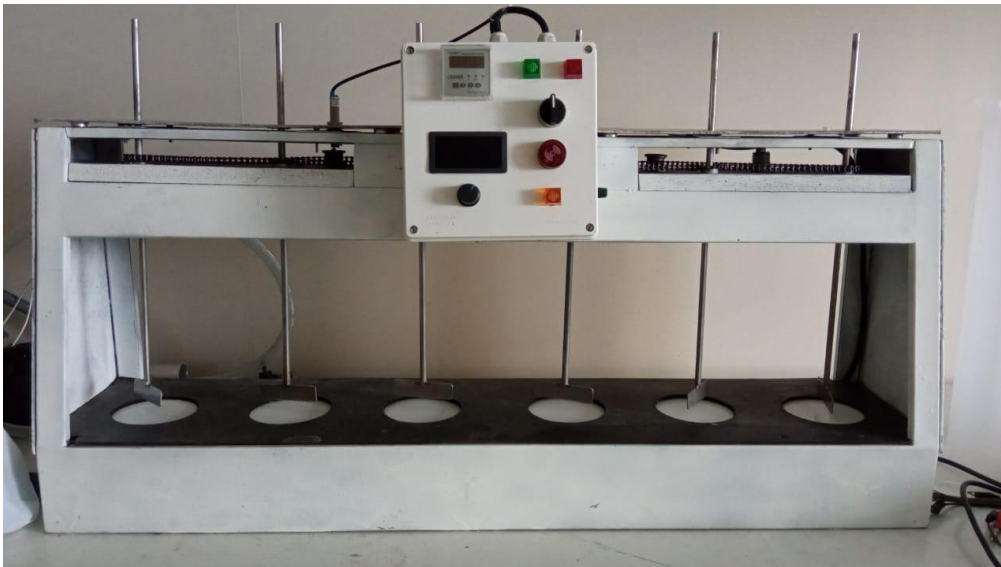
El agua residual se recolectó de la empresa Camal Conchucos S.A., dedicada a la actividad comercial de producción de carnes y productos cárnicos, se usó un volumen aproximado de 50 L para las experiencias que se realizaron en la prueba de jarras. Posteriormente, se realizó una caracterización inicial del efluente del agua residual del camal, tomando en cuenta los parámetros fisicoquímicos, como se indica en la matriz de Operacionalización.

b. Experiencia en la prueba de jarras

Luego de recolectado las aguas residuales, para el inicio de la investigación, se realizó las experiencias en el equipo de prueba de jarras que se muestra en la figura 8, este equipo se encuentra en el laboratorio de la facultad de Ingeniería Ambiental y de RR.NN. de la Universidad Nacional del Callao. Posteriormente se realizó la preparación del FeCl_3 y el fosfato en diferentes dosificaciones.

Figura 8

Equipo de prueba de jarras de la Facultad de ingeniería ambiental y de recursos naturales



c. Selección de los coagulantes-floculantes

- i. Sal de cloruro férrico (FeCl_3)

El cloruro férrico es usado en plantas de tratamiento de agua potable y aguas residuales como un excelente coagulante, muy usado por su alta eficiencia en remoción de orgánicos y de metales pesados; usado también como agente de grabado en litografías y fotografía, catalizador, mordiente, agente oxidante, desinfectante, pigmento, aditivo de piensos. En la figura 9 se muestran las especificaciones técnicas de este.

Figura 9

Especificaciones técnicas del cloruro férrico

PARÁMETRO	UNIDAD	LIQUIDO 42%		SÓLIDO ANHIDRO		MÉTODO DE ANÁLISIS
		ESPECIFICACIÓN	VALOR TÍPICO	ESPECIFICACIÓN	VALOR TÍPICO	
Apariencia		Líquido	Líquido	Cristales	Cristales	Visual
Color		Café oscuro	Café oscuro	Verde oscuro	Verde oscuro	Visual
Cloruro férrico (FeCl ₃)	% p/p	40 - 45	42.5	Min 98	99.2	LJ - 006 - *
Cloruro ferroso (FeCl ₂)	% p/p	< 0.92	< 0.2		< 0.20	LJ - 006 - *
Acidez (HCl)	% p/p	< 1.0	< 0.3			LJ - 006 - *
Insolubles	% p/p	< 0.5	< 0.1	Máx 0.5	0.15	LJ - 006 - *
Densidad (20 °C)	g / mL	1.418 - 1.485	1.451			Hidrometría

Nota: La especificación de cloruro ferroso es equivalente a < 2.5 % de hierro total, referenciado por la norma NTC 3976

Fuente: Quimpac S.A.

ii. Sal de fosfato diácido de potasio (KH₂PO₄)

Es una fuente de fósforo y potasio de alta solubilidad. Este agente permitirá generar iones de fosfato para potenciar la coagulación-floculación del cloruro férrico con el agua residual polimerizada.

d. Diseño de optimización

Es el modelo de interés para reducir los contaminantes del agua residual del camal en el proceso de coagulación-floculación mediante las experiencias con la prueba de jarras. Para obtener una explicación más amplia de las variables independientes a manipular se determinó un número óptimo de experimentos, basado en los factores y niveles asumidos en la tabla 3, y así aplicar el método de superficie de respuesta (RSM) como optimización.

Tabla 3

Factores y sus niveles para el método de superficie de respuesta-diseño central compuesto

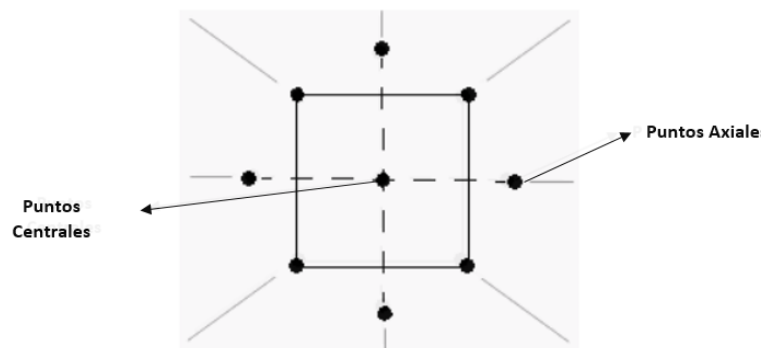
Factor	Unidad	Niveles	
		Bajo (-1)	Alto (+1)
Dosis de cloruro férrico	mg/L	500	700
Dosis de fosfato diácido de potasio	mg/L	700	900
Velocidad de agitación rápida	Rpm	250	320
Velocidad de agitación lenta	Rpm	90	100

iii. Diseño central compuesto y optimización

El diseño central compuesto de superficie de respuesta que se muestra en la figura 10 es el diseño más usado. Los diseños centrales compuestos son un diseño factorial o factorial fraccionado con puntos centrales, ampliado con un grupo de puntos axiales (también denominados puntos de estrella) que permiten estimar la curvatura.

Figura 10

Referencia gráfica del diseño central compuesto



Fuente: Adaptado de *Diseños de superficie de respuesta* por Soporte de Minitab 18, (<https://support.minitab.com/>)

El diseño factorial permite comparar el efecto de los factores manipulados en los distintos parámetros de respuesta y obtener una diferencia estadísticamente significativa. Para el análisis y procesamiento de los datos se usó el análisis de varianza (ANOVA) (Gutiérrez y Vara, 2004). La ecuación 1, muestra el modelo de regresión usado.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{12} X_2^2 + \beta_{23} X_3^2 \quad (1)$$

Dónde: y es una respuesta, X_1 , X_2 , X_3 y X_4 como cloruro férrico, fosfato diácido de potasio, velocidad de agitación y tiempo de agitación, son factores manipulados y β_0 , β_1 , β_{12} , β_{23} son parámetros que se encontrarán.

Para la validación de modelo se realizó el análisis de los residuos, de este modo se contrastó globalmente todas las asunciones y, por consiguiente, una falta de normalidad de los residuos puede ser debido a que el modelo sea inapropiado o también a una existencia de heterocedasticidad, por ello para dar aceptabilidad del modelo de cada respuesta se analizó el F-valor y el p-valor. En la tabla 4 se muestra el arreglo experimental de 44 corridas para el modelo en el cual hemos considerado los siguientes factores: cloruro férrico (FeCl_3), fosfato diácido de potasio (K_2HPO_4), velocidad rápida (VR), velocidad lenta (VL).

Tabla 4*Arreglo experimental para el modelo*

N° de corridas	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
	FeCl ₃ mg/L	K ₂ HPO ₄ mg/L	VR rpm	VL rpm
1	500	900	250	80
2	500	700	250	100
3	600	800	355	90
4	500	700	250	80
5	500	700	320	80
6	600	800	215	90
7	500	900	320	100
8	700	700	250	80
9	700	900	320	80
10	600	600	285	90
11	500	700	250	100
12	600	800	285	110
13	700	700	250	100
14	500	900	320	80
15	500	700	250	80
16	600	800	285	90
17	700	900	320	80
18	600	800	285	90
19	700	900	250	100
20	600	800	285	70
21	700	700	320	100
22	500	700	320	100
23	500	900	250	80
24	800	800	285	90
25	500	900	250	100
26	700	700	320	80
27	700	700	320	80
28	700	700	320	100
29	400	800	285	90
30	500	900	320	100
31	600	1000	285	90
32	700	900	250	100
33	700	900	320	100
34	700	700	250	80
35	700	900	320	100
36	600	800	285	90
37	700	700	250	100
38	700	900	250	80
39	600	800	285	90
40	700	900	250	80
41	500	900	250	100
42	500	700	320	100
43	500	900	320	80
44	500	700	320	80

Para esta investigación se usó un diseño central compuesto que consiste en un diseño factorial completo (o una fracción de él) 2^4 , donde el nivel de los factores está codificado a los valores usuales -1, +1 estándares (esto es llamado la porción factorial del diseño) con 1 réplica, con 4 puntos centrales y 8 puntos axiales a una distancia α desde el centro de diseño (esta porción es llamada la porción axial el diseño); desarrollando 44 corridas en la prueba de jarras.

Este método permitirá determinar los efectos de los 4 factores. Los factores independientes y sus niveles aplicados en el diseño se presentan en la tabla 4. Para los rangos elegidos para los factores, se ajustó en la posibilidad más cercana.

e. Modelo de deseabilidad

Como parte del método de respuesta múltiple, se usará el modelo de deseabilidad para obtener una función objetivo concurrente para representar todas las respuestas transformadas combinando los rangos deseados para cada respuesta usando la Ecuación (2):

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3 \times d_4 \dots \times d_n)^{1/n} = (\prod_i^n d_i)^{1/n} \dots (2)$$

donde, D , d_i y n son la función de deseabilidad, cada respuesta individual y el número total de respuestas, respectivamente. Para una optimización simultánea, cada respuesta requiere valores altos y bajos. De lo contrario, si se encuentra alguna respuesta fuera de su rango de deseabilidad, la deseabilidad global se vuelve igual a cero.

4.2. Método de investigación

El método de investigación a desarrollarse será hipotético-deductivo. En este método, las hipótesis son puntos de partida para nuevas deducciones. Se parte de una hipótesis inferida de principios o leyes o sugerida por los datos empíricos, y aplicando las reglas de la deducción, se arriba a predicciones que se someten a verificación empírica, y si hay correspondencia con los hechos, se comprueba la veracidad o no de la hipótesis de partida (Rodríguez y Pérez, 2017).

4.3. Población y muestra

Población:

El agua residual generado en el Camal Conchucos S.A.

Unidad de análisis: L/día del agua residual generado en el Camal Conchucos S.A.

Muestra:

La muestra corresponde a un volumen de 50 litros de aguas residuales generadas en el Camal Conchucos S.A.

4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

La presente investigación toma como lugar de estudio las aguas residuales generadas en el Camal Conchucos S.A.

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

4.5.1. Técnica

La técnica utilizada fue la de observación, que consiste en registrar de manera sistemática, válida y confiable los datos, a través de un conjunto de reglas y procedimientos derivados del problema de investigación (Hernández et ál., 2014a).

4.5.2. Instrumentos

Para el desarrollo experimental se utilizó la prueba de jarras para obtener el pH adecuado, velocidad y dosis para remover los contaminantes. El método empleado tradicionalmente para obtener el valor de la reducción de

contaminantes serán tomados del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, los cuales son ampliamente aceptados por la comunidad Científica (Metcalf y Eddy, 2014).

4.6. Análisis y procesamiento de datos

Para el diseño de superficie de respuesta se utilizó el software estadístico Design-Expert 11 y la estimación de los coeficientes para cada función de respuesta. La significación de cada ecuación del modelo, los parámetros individuales y las interacciones de los factores se evaluaron mediante análisis de varianza (ANOVA) en los intervalos de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$). Se obtuvieron gráficos de contorno bidimensionales (2D) y respuestas de superficie tridimensionales (3D) para los modelos estadísticos.

V. RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

5.1.1. Resultados de las características fisicoquímicos del agua residual del Camal Conchucos S.A.

Según los análisis realizados a las aguas residuales del Camal Conchucos S.A, en la tabla 5 se muestran las características fisicoquímicas evaluadas antes de ser tratadas mediante la adición cloruro férrico y fosfato diácido de potasio.

Tabla 5

Características fisicoquímicas iniciales del agua residuales del Camal Conchucos S.A.

Parámetros	Unidad	Resultado
Aceites y grasas	mg/L	25
Conductividad eléctrica	mS/cm	2,12
Demanda bioquímica de oxígeno	mgDBO ₅ /L	759
Demanda química de oxígeno	mgO ₂ /L	4005,4
pH	unidad de pH	6,88
Turbidez	NTU	485
Fósforo total	mg/L	244,5

5.1.2. Resultados descriptivos del tratamiento del agua residual del Camal Conchucos S.A.

Se presentan 5 tablas con los resultados descriptivos de los resultados experimentales obtenidos para cada indicador de la variable dependiente (DQO, fosforo total, turbidez, pH y conductividad).

- Resultados obtenidos del tratamiento con relación del DQO

La tabla 6 muestra los resultados experimentales del DQO obtenidos mediante el método colorimétrico reflujó cerrado, y su % de reducción de este con respecto al valor de la concentración indicado en la tabla 5.

Tabla 6*Resultados del DQO y su % de reducción*

N° de corridas	Factor 1 FeCl ₃ mg/L	Factor 2 K ₂ HPO ₄ mg/L	Factor 3 VR Rpm	Factor 4 VL rpm	Resultados	
					DQO mg/L	% DQO
1	500	900	250	80	1535	61,68
2	500	700	250	100	2635	34,21
3	600	800	355	90	2440	39,08
4	500	700	250	80	2015	49,69
5	500	700	320	80	1705	57,43
6	600	800	215	90	2410	39,83
7	500	900	320	100	1905	52,44
8	700	700	250	80	2035	49,19
9	700	900	320	80	1855	53,69
10	600	600	285	90	1830	54,31
11	500	700	250	100	1785	55,44
12	600	800	285	110	2430	39,33
13	700	700	250	100	2100	47,57
14	500	900	320	80	2430	39,33
15	500	700	250	80	2505	37,46
16	600	800	285	90	2330	41,83
17	700	900	320	80	1355	66,17
18	600	800	285	90	2630	34,34
19	700	900	250	100	1750	56,31
20	600	800	285	70	1595	60,18
21	700	700	320	100	1700	57,56
22	500	700	320	100	2545	36,46
23	500	900	250	80	2050	48,82
24	800	800	285	90	1730	56,81
25	500	900	250	100	1395	65,17
26	700	700	320	80	1365	65,92
27	700	700	320	80	1155	71,16
28	700	700	320	100	1985	50,44
29	400	800	285	90	1720	57,06
30	500	900	320	100	2590	35,34
31	600	1000	285	90	2150	46,32
32	700	900	250	100	2160	46,07
33	700	900	320	100	1735	56,68
34	700	700	250	80	1900	52,56
35	700	900	320	100	1970	50,82
36	600	800	285	90	2530	36,84
37	700	700	250	100	2660	33,59
38	700	900	250	80	2235	44,20
39	600	800	285	90	2310	42,33
40	700	900	250	80	2130	46,82

N° de corridas	Factor 1 FeCl ₃ mg/L	Factor 2 K ₂ HPO ₄ mg/L	Factor 3 VR Rpm	Factor 4 VL rpm	Resultados	
					DQO mg/L	% DQO
41	500	900	250	100	2215	44,70
42	500	700	320	100	2065	48,44
43	500	900	320	80	2160	46,07
44	500	700	320	80	2015	49,69
Promedio					2039,66	49,08

- Resultados obtenidos del tratamiento con relación a la turbidez

La tabla 7 muestra los resultados experimentales de la turbidez obtenidos mediante el turbidímetro, y su % de reducción de este con respecto al valor de la concentración indicado en la tabla 5.

Tabla 7

Resultados de la turbidez y su % de reducción

N°	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Resultados			
	FeCl ₃	K ₂ HPO ₄	VR	VL	Turbidez			%
	mg/L	mg/L	rpm	Rpm	T1	T2	Prom	Turbidez
1	500	900	250	80	54,85	59,51	57,18	88,21
2	500	700	250	100	118,50	123,20	120,85	75,08
3	600	800	355	90	57,48	68,85	63,17	86,98
4	500	700	250	80	65,86	62,23	64,05	86,79
5	500	700	320	80	150,70	151,50	151,10	68,85
6	600	800	215	90	114,30	112,30	113,30	76,64
7	500	900	320	100	128,40	136,10	132,25	72,73
8	700	700	250	80	105,67	107,07	106,37	78,07
9	700	900	320	80	57,05	58,16	57,61	88,12
10	600	600	285	90	110,10	109,30	109,70	77,38
11	500	700	250	100	112,90	123,90	118,40	75,59
12	600	800	285	110	99,80	110,70	105,25	78,30
13	700	700	250	100	185,30	185,60	185,45	61,76
14	500	900	320	80	118,20	117,60	117,90	75,69
15	500	700	250	80	173,90	134,80	154,35	68,18
16	600	800	285	90	134,80	134,30	134,55	72,26
17	700	900	320	80	82,90	88,30	85,60	82,35

N°	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Resultados			
	FeCl ₃	K ₂ HPO ₄	VR	VL	Turbidez			%
	mg/L	mg/L	rpm	Rpm	T1	T2	Prom	Turbidez
18	600	800	285	90	123,30	128,00	125,65	74,09
19	700	900	250	100	116,70	117,20	116,95	75,89
20	600	800	285	70	112,77	112,29	112,53	76,80
21	700	700	320	100	96,50	98,70	97,60	79,88
22	500	700	320	100	64,45	65,21	64,83	86,63
23	500	900	250	80	83,90	79,40	81,65	83,16
24	800	800	285	90	144,40	145,80	145,10	70,08
25	500	900	250	100	110,50	118,90	114,70	76,35
26	700	700	320	80	91,70	93,60	92,65	80,90
27	700	700	320	80	80,16	88,86	84,51	82,58
28	700	700	320	100	85,08	94,70	89,89	81,47
29	400	800	285	90	188,60	192,60	190,60	60,70
30	500	900	320	100	92,60	98,30	95,45	80,32
31	600	1000	285	90	78,70	83,70	81,20	83,26
32	700	900	250	100	188,60	197,70	193,15	60,18
33	700	900	320	100	69,85	66,38	68,12	85,96
34	700	700	250	80	181,60	188,80	185,20	61,81
35	700	900	320	100	109,80	100,50	105,15	78,32
36	600	800	285	90	128,00	133,10	130,55	73,08
37	700	700	250	100	235,60	240,60	238,10	50,91
38	700	900	250	80	138,20	147,50	142,85	70,55
39	600	800	285	90	131,30	125,70	128,50	73,51
40	700	900	250	80	146,70	137,40	142,05	70,71
41	500	900	250	100	114,40	118,90	116,65	75,95
42	500	700	320	100	94,00	99,40	96,70	80,06
43	500	900	320	80	125,60	127,50	126,55	73,91
44	500	700	320	80	103,50	100,30	101,90	78,99
Promedio					116,95	116,95	116,95	75,89

- Resultados obtenidos del tratamiento con relación al fósforo total

La tabla 8 muestra los resultados experimentales del fósforo total obtenidos mediante el método espectrofotométrico del ácido vanadomolibdofosfórico, y su % de reducción de este con respecto al valor de la concentración indicado en la tabla 5.

Tabla 8*Resultados del fósforo total y su % de reducción*

N°	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Resultados			
	FeCl ₃	K ₂ HPO ₄	VR	VL	Fósforo total mg/L			% Fósforo total
	mg/L	mg/L	Rpm	Rpm	PT 1	PT 2	Prom	
1	500	900	250	80	163,47	174,46	168,97	30,88
2	500	700	250	100	166,46	157,15	161,81	33,81
3	600	800	355	90	111,01	108,55	109,78	55,09
4	500	700	250	80	126,39	117,16	121,78	50,18
5	500	700	320	80	135,44	137,82	136,63	44,11
6	600	800	215	90	125,07	116,99	121,03	50,49
7	500	900	320	100	157,68	147,31	152,49	37,62
8	700	700	250	80	102,75	102,58	102,67	58,00
9	700	900	320	80	125,07	123,67	124,37	49,12
10	600	600	285	90	128,06	137,38	132,72	45,71
11	500	700	250	100	152,14	150,21	151,17	38,16
12	600	800	285	110	117,52	120,86	119,19	51,24
13	700	700	250	100	108,47	104,33	106,40	56,47
14	500	900	320	80	180,08	176,39	178,24	27,09
15	500	700	250	80	154,25	155,04	154,64	36,74
16	600	800	285	90	103,10	99,94	101,52	58,47
17	700	900	320	80	157,59	164,62	161,10	34,10
18	600	800	285	90	113,12	112,68	112,90	53,81
19	700	900	250	100	163,56	153,90	158,73	35,07
20	600	800	285	70	112,60	121,29	116,95	52,16
21	700	700	320	100	96,60	101,61	99,11	59,46
22	500	700	320	100	127,62	131,66	129,64	46,97
23	500	900	250	80	198,27	197,13	197,70	19,12
24	800	800	285	90	118,57	119,19	118,88	51,37
25	500	900	250	100	177,97	188,17	183,07	25,11
26	700	700	320	80	147,31	151,44	149,37	38,90
27	700	700	320	80	192,74	188,52	190,63	22,02
28	700	700	320	100	162,51	161,54	162,02	33,72
29	400	800	285	90	207,41	201,17	204,29	16,43
30	500	900	320	100	186,67	186,23	186,45	23,73
31	600	1000	285	90	205,30	204,78	205,04	16,12
32	700	900	250	100	122,79	122,17	122,48	49,90
33	700	900	320	100	111,72	112,68	112,20	54,10
34	700	700	250	80	121,47	119,80	120,64	50,65
35	700	900	320	100	170,68	170,94	170,81	30,12

N°	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Resultados			
	FeCl ₃	K ₂ HPO ₄	VR	VL	Fósforo total mg/L			% Fósforo total
	mg/L	mg/L	Rpm	Rpm	PT 1	PT 2	Prom	
36	600	800	285	90	84,65	75,69	80,17	67,20
37	700	700	250	100	99,77	114,62	107,19	56,15
38	700	900	250	80	155,39	148,80	152,10	37,78
39	600	800	285	90	105,13	111,98	108,55	55,59
40	700	900	250	80	110,40	106,71	108,55	55,59
41	500	900	250	100	157,15	157,06	157,10	35,73
42	500	700	320	100	176,39	177,10	176,74	27,70
43	500	900	320	80	165,58	158,73	162,16	33,67
44	500	700	320	80	154,60	159,34	156,97	35,79
Promedio							142,16	41,85

- Resultados obtenidos del tratamiento con relación al pH

La tabla 9 muestra los resultados experimentales del pH obtenidos mediante colorímetro, y su % de reducción de este con respecto al valor de la concentración indicado en la tabla 5.

Tabla 9

Resultados del potencial de hidrógeno (pH)

N°	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Resultados			
	FeCl ₃	K ₂ HPO ₄	VR	VL	pH			
	mg/L	mg/L	Rpm	rpm	pH1	pH2	pH3	Prom
1	500	900	250	80	6,66	6,68	6,68	6,67
2	500	700	250	100	6,24	6,28	6,25	6,26
3	600	800	355	90	6,70	6,77	6,70	6,72
4	500	700	250	80	6,48	6,43	6,44	6,45
5	500	700	320	80	7,15	7,41	7,47	7,34
6	600	800	215	90	6,79	7,03	7,07	6,96
7	500	900	320	100	6,65	6,87	6,95	6,82
8	700	700	250	80	6,22	6,12	6,20	6,18
9	700	900	320	80	6,70	6,90	6,80	6,80
10	600	600	285	90	6,51	6,53	6,34	6,46
11	500	700	250	100	6,07	6,10	6,05	6,07
12	600	800	285	110	6,80	6,50	6,65	6,65
13	700	700	250	100	6,25	6,21	6,24	6,23
14	500	900	320	80	7,21	7,48	7,22	7,30

N°	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Resultados			
	FeCl ₃	K ₂ HPO ₄	VR	VL	pH			
	mg/L	mg/L	Rpm	rpm	pH1	pH2	pH3	Prom
15	500	700	250	80	6,25	6,30	6,25	6,27
16	600	800	285	90	6,35	6,40	6,35	6,37
17	700	900	320	80	7,14	7,37	7,43	7,31
18	600	800	285	90	6,55	6,88	6,89	6,77
19	700	900	250	100	6,45	6,27	6,40	6,37
20	600	800	285	70	7,01	7,21	7,24	7,15
21	700	700	320	100	7,05	6,92	6,90	6,96
22	500	700	320	100	6,47	6,42	6,45	6,45
23	500	900	250	80	6,29	6,35	6,30	6,31
24	800	800	285	90	7,16	7,26	7,00	7,14
25	500	900	250	100	6,05	5,82	6,04	5,97
26	700	700	320	80	6,80	6,77	6,50	6,69
27	700	700	320	80	6,58	6,41	6,50	6,50
28	700	700	320	100	6,71	6,83	6,50	6,68
29	400	800	285	90	7,09	7,30	7,37	7,25
30	500	900	320	100	6,93	7,16	7,16	7,08
31	600	1000	285	90	7,51	7,76	7,84	7,70
32	700	900	250	100	6,85	6,10	7,16	6,70
33	700	900	320	100	7,28	7,25	7,18	7,24
34	700	700	250	80	6,65	6,98	6,98	6,87
35	700	900	320	100	6,89	7,03	6,49	6,80
36	600	800	285	90	6,53	7,06	7,04	6,88
37	700	700	250	100	7,19	7,08	7,10	7,12
38	700	900	250	80	6,61	7,05	6,90	6,85
39	600	800	285	90	7,09	7,21	7,21	7,17
40	700	900	250	80	6,70	6,52	6,60	6,61
41	500	900	250	100	7,13	7,16	7,10	7,13
42	500	700	320	100	6,12	6,07	6,09	6,09
43	500	900	320	80	6,25	5,99	6,30	6,18
44	500	700	320	80	6,80	7,18	7,19	7,06
Promedio								6,74

- Resultados obtenidos del tratamiento con relación a la conductividad eléctrica

La tabla 10 muestra los resultados experimentales de la turbidez obtenidos con el potenciómetro, y su % de reducción de este con respecto al valor de la concentración indicado en la tabla 5.

Tabla 10*Resultados de la conductividad eléctrica (C.E.)*

N°	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Resultados			
	FeCl ₃	K ₂ HPO ₄	VR	VL	Conductividad eléctrica (C.E.)			
	mg/L	mg/L	Rpm	Rpm	C.E.1	C.E.2	C.E.3	Prom
1	500	900	250	80	5,15	5,14	5,15	5,15
2	500	700	250	100	5,55	5,54	5,54	5,54
3	600	800	355	90	5,29	5,3	5,28	5,29
4	500	700	250	80	5,28	5,29	5,28	5,28
5	500	700	320	80	5,72	5,71	5,17	5,53
6	600	800	215	90	6,34	6,33	6,37	6,35
7	500	900	320	100	6,31	6,32	6,31	6,31
8	700	700	250	80	5,54	5,55	5,55	5,55
9	700	900	320	80	5,05	5,03	5,05	5,04
10	600	600	285	90	6,32	6,33	6,33	6,33
11	500	700	250	100	5,75	5,83	5,8	5,79
12	600	800	285	110	6,35	6,06	6,1	6,17
13	700	700	250	100	5,69	5,7	5,69	5,69
14	500	900	320	80	5,67	5,68	5,67	5,67
15	500	700	250	80	5,53	5,51	5,52	5,52
16	600	800	285	90	5,65	5,64	5,64	5,64
17	700	900	320	80	5,8	5,79	5,79	5,79
18	600	800	285	90	6,46	6,46	6,44	6,45
19	700	900	250	100	5,56	5,53	5,54	5,54
20	600	800	285	70	6,17	6,23	6,22	6,21
21	700	700	320	100	6,04	6,05	6,04	6,04
22	500	700	320	100	5,25	5,26	5,25	5,25
23	500	900	250	80	5,63	5,62	5,62	5,62
24	800	800	285	90	5,57	5,98	5,98	5,84
25	500	900	250	100	5,91	5,92	5,92	5,92
26	700	700	320	80	6,12	6,1	6,12	6,11
27	700	700	320	80	5,4	5,43	5,42	5,42

N°	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Resultados			
	FeCl ₃	K ₂ HPO ₄	VR	VL	Conductividad eléctrica (C.E.)			
	mg/L	mg/L	Rpm	Rpm	C.E.1	C.E.2	C.E.3	Prom
28	700	700	320	100	6,55	6,58	6,49	6,54
29	400	800	285	90	5,79	5,85	5,88	5,84
30	500	900	320	100	5,79	5,75	5,75	5,76
31	600	1000	285	90	6,02	6,01	6,09	6,04
32	700	900	250	100	5,86	5,82	5,82	5,83
33	700	900	320	100	6,25	6,22	6,18	6,22
34	700	700	250	80	6,29	6,34	6,35	6,33
35	700	900	320	100	6,2	6,25	6,24	6,23
36	600	800	285	90	5,93	5,99	6,00	5,97
37	700	700	250	100	6,02	6,02	6,07	6,04
38	700	900	250	80	5,82	5,85	5,86	5,84
39	600	800	285	90	5,90	5,99	5,97	5,95
40	700	900	250	80	6,23	6,29	6,29	6,27
41	500	900	250	100	6,22	6,25	6,24	6,24
42	500	700	320	100	6,16	6,24	6,21	6,20
43	500	900	320	80	5,88	5,91	5,91	5,90
44	500	700	320	80	6,05	6,1	6,11	6,09
Promedio								5,87

Luego del tratamiento usando el cloruro férrico y el fosfato diácido de potasio los resultados mostraron las siguientes reducciones promedio: 49,08% de reducción de la DQO, una reducción de turbiedad del 75,89% y un 41,85% de fósforo total. Así también el tratamiento acidificó ligeramente el agua residual e incremento la conductividad eléctrica.

La tabla 11 muestra los resultados de los % de reducción del DQO, fósforo total, turbidez, pH y conductividad eléctrica, los cuales se obtuvieron experimentalmente.

Tabla 11

Resultados de los % de reducción de contaminantes obtenidos experimentalmente

N° de corridas	% DQO	% PT	% Turbidez	pH	C.E.
1	61,68	30,88	88,21	6,67	5,15
2	34,21	33,81	75,08	6,26	5,54
3	39,08	55,09	86,98	6,72	5,29
4	49,69	50,18	86,79	6,45	5,28
5	57,43	44,11	68,85	7,34	5,53
6	39,83	50,49	76,64	6,96	6,35
7	52,44	37,62	72,73	6,82	6,31
8	49,19	58,00	78,07	6,18	5,55
9	53,69	49,12	88,12	6,80	5,04
10	54,31	45,71	77,38	6,46	6,33
11	55,44	38,16	75,59	6,07	5,79
12	39,33	51,24	78,30	6,65	6,17
13	47,57	56,47	61,76	6,23	5,69
14	39,33	27,09	75,69	7,30	5,67
15	37,46	36,74	68,18	6,27	5,52
16	41,83	58,47	72,26	6,37	5,64
17	66,17	34,10	82,35	7,31	5,79
18	34,34	53,81	74,09	6,77	6,45
19	56,31	35,07	75,89	6,37	5,54
20	60,18	52,16	76,80	7,15	6,21
21	57,56	59,46	79,88	6,96	6,04
22	36,46	46,97	86,63	6,45	5,25
23	48,82	19,12	83,16	6,31	5,62
24	56,81	51,37	70,08	7,14	5,84
25	65,17	25,11	76,35	5,97	5,92
26	65,92	38,90	80,90	6,69	6,11
27	71,16	22,02	82,58	6,50	5,42
28	50,44	33,72	81,47	6,68	6,54
29	57,06	16,43	60,70	7,25	5,84
30	35,34	23,73	80,32	7,08	5,76
31	46,32	16,12	83,26	7,70	6,04
32	46,07	49,90	60,18	6,70	5,83
33	56,68	54,10	85,96	7,24	6,22
34	52,56	50,65	61,81	6,87	6,33
35	50,82	30,12	78,32	6,80	6,23
36	36,84	67,20	73,08	6,88	5,97
37	33,59	56,15	50,91	7,12	6,04
38	44,20	37,78	70,55	6,85	5,84
39	42,33	55,59	73,51	7,17	5,95
40	46,82	55,59	70,71	6,61	6,27
41	44,70	35,73	75,95	7,13	6,24
42	48,44	27,70	80,06	6,09	6,20
43	46,07	33,67	73,91	6,18	5,90

44	49,69	35,79	78,99	7,06	6,09
----	-------	-------	-------	------	------

La tabla 12 muestra los resultados de promedio y desviación estándar del % de reducción del DQO, turbidez, fósforo total, pH y conductividad eléctrica, los cuales se obtuvieron de las tablas 6,7,8,9 y 10, respectivamente.

Tabla 12

Resultados de promedio y desviación estándar del % de reducción de contaminantes

Parámetros	Promedio	Desviación estándar
% DQO	49,08	+/- 7,24
% turbidez	75,89	+/- 5,65
% fósforo total	41,85	+/- 9,20
pH	5,87	+/- 0,37
Conductividad eléctrica	6,74	+/- 0,38

5.2. Resultados inferenciales

5.2.1. Resultados del análisis estadístico del diseño central compuesto

a. Análisis de la varianza (ANOVA) del modelo central compuesto

Los efectos significativos principales y de interacción de los factores que influyen en los parámetros de respuestas en el tratamiento del agua residual del camal fueron analizados por el método ANOVA que se muestra en las tablas 13, 14 y 15.

La significancia de cada parámetro del modelo se evaluó mediante las pruebas de F-valor y p-valor para cada variable, incluida la interacción lineal y la interacción cuadrática; para ello los valores de p-valor inferiores a 0,05 identificaron los términos de los modelos como significativos.

En la tabla 13, 14 y 15, se encontraron que los modelos cuadráticos desarrollados para cada respuesta eran significativos, debido a que se obtuvieron valores F iguales a 3,33, 4,27 y 4,16 para el porcentaje de reducción de DQO, turbidez y fósforo total, respectivamente. Además, la precisión de los modelos estadísticos desarrollados para predecir las respuestas fue confirmada por los p-valor ($p < 0,05$). Sin embargo, también

se encontró que algunos coeficientes de los modelos no fueron significativos ($p > 0,10$).

Evaluando las tablas 16 y 17, se encontró que los modelos cuadráticos desarrollados para cada respuesta no fueron significativos. A continuación, se detalla lo descrito en cada ANOVA.

Tabla 13

ANOVA para el modelo cuadrático de superficie de respuesta: método central compuesto estimado de relación entre la variable de respuesta % DQO reducido y variables independientes

Fuente	Suma de cuadrados	GL	F-valor	p-valor	R ²	R ² ajustado	Pred-R ²
$\% \text{ DQO} = +38,20 + 1,64A + 1,13B + 0,7240C + 0,1092D - 0,9987AB + 4,00AC - 0,5110AD - 2,83BC + 1,10BD - 0,8426CD + 4,77A^2 + 3,12B^2 + 0,4026C^2 + 0,7443D^2$							
Modelo	2440,69	14	3,33	0,0030	0,61	0,43	0,1198
A-Dosis de FeCl ₃	81,58	1	1,56	0,2219			
B-Dosis de K ₂ HPO ₄	39,17	1	0,7481	0,3942			
C-Velocidad rápida	15,98	1	0,3052	0,5849			
D-Velocidad lenta	0,7272	1	0,0139	0,9070			
AB	31,91	1	0,6096	0,4413			
AC	512,62	1	9,79	0,0040			
AD	33,43	1	0,6385	0,4308			
BC	256,67	1	4,90	0,0348			
BD	153,81	1	2,94	0,0972			
CD	90,88	1	1,74	0,1980			
A ²	560,47	1	10,71	0,0028			
B ²	239,26	1	4,57	0,0411			
C ²	3,99	1	0,0762	0,7845			
D ²	218,19	1	4,17	0,0504			
Residual	1518,25	29					
Falta de ajuste	316,51	10	0,5004	0,8690			
Error	1201,74	19					
Total	3958,94	43					

La tabla 13 muestra que para el % DQO reducido los valores de la concentración de dosis de cloruro de hierro influyente (A), la dosis de fosfato (B), la velocidad de agitación rápida (C) y la velocidad de agitación lenta (D) mostraron un efecto no significativo, mientras que los cuadráticos de dosis de cloruro de hierro (A^2) y dosis de fosfato (B^2) si tienen efectos significativos. Así también, la interacción entre la dosificación del cloruro de hierro con la velocidad rápida (AC) y la dosis de fosfato con la velocidad rápida (BC) si mostraron un efecto significativo.

Tabla 14

ANOVA para el modelo cuadrático de superficie de respuesta: método central compuesto estimado de relación entre la variable respuesta % turbidez reducida y variables independientes

Fuente	Suma de cuadrados	GL	F-valor	p-valor	R ²	R ² ajustado	Pred-R ²
$\% \text{ Turbidez} = +73,01 - 1,58A + 1,12B + 4,55C + 0,0399D + 0,8921AB + 4,43AC - 0,6199AD - 1,40BC - 0,1912BD + 1,09CD - 1,99A^2 + 1,74B^2 + 2,11C^2 + 0,2624D^2$							
Modelo	1908,79	14	4,27	0,0005	0,67	0,51	0,2371
A-Dosis de FeCl ₃	75,82	1	2,37	0,1342			
B-Dosis de K ₂ HPO ₄	38,50	1	1,21	0,2812			
C-Velocidad rápida	629,80	1	19,72	0,0001			
D-Velocidad lenta	0,0969	1	0,0030	0,9565			
AB	25,47	1	0,7974	0,3792			
AC	628,58	1	19,68	0,0001			
AD	49,19	1	1,54	0,2246			
BC	62,57	1	1,96	0,1722			
BD	4,68	1	0,1464	0,7047			
CD	152,12	1	4,76	0,0373			
A ²	97,43	1	3,05	0,0913			
B ²	74,73	1	2,34	0,1369			
C ²	110,06	1	3,45	0,0736			
D ²	27,12	1	0,8492	0,3644			
Residual	926,21	29					
Falta de ajuste	271,79	10	0,7891	0,6398			
Error	654,42	19					

Total	2835,00	43
--------------	---------	----

La tabla 14 muestra que para el % de turbidez removido los valores de la concentración de dosis de cloruro de hierro influyente (A), dosis de fosfato (B), velocidad de agitación lenta (D) mostraron un efecto no significativo, mientras que la velocidad de agitación rápida (C), dosificación del cloruro de hierro con la velocidad rápida (AC) y la interacción entre las velocidades rápida y lenta mostraron un efecto significativo.

Tabla 15

ANOVA para el modelo cuadrático de superficie de respuesta: método central compuesto estimado de relación entre la variable respuesta % fósforo total reducido y variables independientes

Fuente	Suma de cuadrados	GL	F-valor	p-valor	R ²	R ² ajustado	Pred-R ²
$\% PT = +58,42 + 6,70A - 4,42B - 0,9678C - 0,9271D + 1,59AB - 2,66AC + 0,5872AD + 2,25BC - 0,1879BD + 0,5811CD - 6,76A^2 - 7,51B^2 - 2,04C^2 - 0,5776D^2$							
Modelo	29486,22	14	4,16	0,0006	0,66	0,55	0,2422
A-Dosis de FeCl ₃	8183,24	1	16,18	0,0004			
B-Dosis de K ₂ HPO ₄	3556,90	1	7,03	0,0128			
C-Velocidad rápida	170,59	1	0,3373	0,5659			
D-Velocidad lenta	313,03	1	0,6189	0,4378			
AB	484,19	1	0,9573	0,3359			
AC	1349,15	1	2,67	0,1132			
AD	263,77	1	0,5215	0,4760			
BC	964,77	1	1,91	0,1778			
BD	27,00	1	0,0534	0,8189			
CD	258,25	1	0,5106	0,4806			
A ²	6723,79	1	13,29	0,0010			
B ²	8289,25	1	16,39	0,0004			
C ²	611,15	1	1,21	0,2807			
D ²	785,05	1	1,55	0,2228			
Residual	14667,01	29					
Falta de ajuste	3675,95	10	0,6355	0,7664			
Error	10991,05	19					

Total	44153,23	43
--------------	----------	----

La tabla 15 muestra que para el % fósforo total removido los valores de la concentración de dosis de fosfato (B), la velocidad de agitación rápida (C) y la velocidad de agitación lenta (D) mostraron un efecto no significativo, mientras que la dosis de cloruro de hierro influyente (A), su cuadrático (A^2) y el cuadrático de la dosis de fosfato (B^2), mostraron un efecto significativo.

Tabla 16

ANOVA para el modelo cuadrático de superficie de respuesta: método central compuesto estimado de relación entre la variable respuesta pH y variables independientes

Fuente	Suma de cuadrados	GL	F-valor	p-valor	R²	R² ajustado	Pred-R²
Modelo	0,5777	4	1,05	0,3937	0,0973	0,0047	-0,1556
A-Dosis de FeCl ₃	0,1832	1	1,33	0,2554			
B-Dosis de K ₂ HPO ₄	0,0006	1	0,0047	0,9459			
C-Velocidad rápida	0,0005	1	0,0039	0,9504			
D-Velocidad lenta	0,3934	1	2,86	0,0987			
Residual	5,36	39					
Falta de ajuste	2,88	20	1,10	0,4196			
Error	2,48	19					
Total	5,94	43					

La tabla 16 muestra que el p-valor es mayor al nivel de significancia ($\alpha = 0,05$), por lo tanto, el modelo para la variable respuesta del pH no es significativo.

Tabla 17

ANOVA para el modelo cuadrático de superficie de respuesta: método central compuesto estimado de relación entre la variable respuesta conductividad y las variables independientes

Fuente	Suma de cuadrados	GL	F-valor	p-valor	R ²	R ² ajustado	Pred-R ²
Modelo	1,57	4	2,71	0,0441	0,2173	0,1370	-0,0051
A-Dosis de FeCl ₃	0,1243	1	0,8555	0,3607			
B-Dosis de K ₂ HPO ₄	0,7389	1	5,08	0,0298			
C-Velocidad rápida	0,5641	1	3,88	0,0560			
D-Velocidad lenta	0,1460	1	1,00	0,3223			
Residual	5,67	39					
Falta de ajuste	2,80	20	0,9245	0,5694			
Error	2,87	19					
Total	7,24	43					

Los valores de R^2 (> 60%) indican que son parámetros significativos para el modelo de la DQO, turbidez y el fósforo total, mientras que para el pH y la conductividad no son significativos.

Por otro lado, los valores del R^2 ajustado expresan una representatividad en el rango de 50%, mientras que los valores del $Pred-R^2$ muestran la variación de los datos predichos. En esta investigación, el $Pred-R^2$ no alcanzó los valores esperados (para eliminación de DQO, turbidez y fósforo total). Además, todos los coeficientes estaban por debajo del nivel satisfactorio.

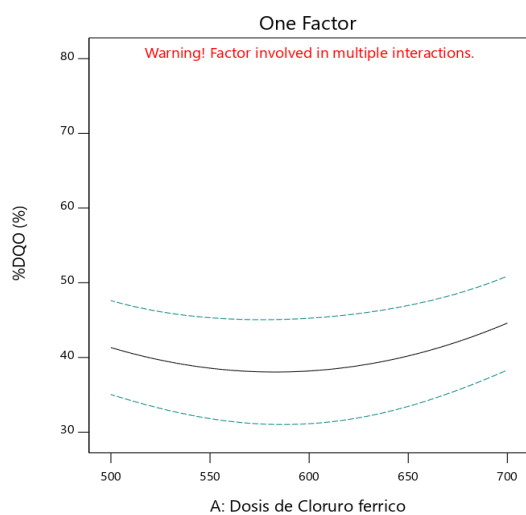
b. Análisis de los efectos

i. Efecto de la dosis de cloruro férrico

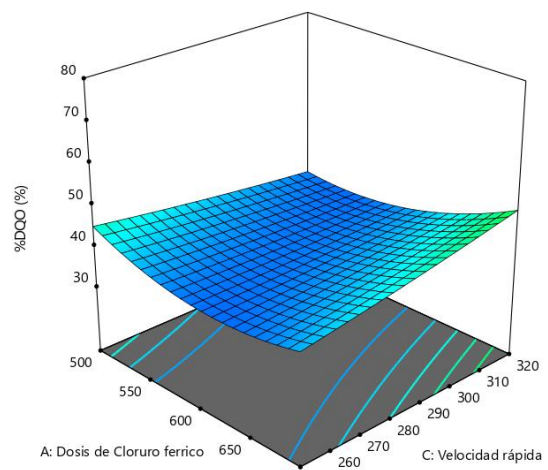
En la figura 11, se muestran los efectos significativos de cloruro férrico sobre el % DQO, % turbidez y % de fósforo total. El cloruro férrico es el factor con mayor significancia durante el tratamiento. Según la figura 11a la eliminación de % DQO se mantuvo constante a medida que el cloruro férrico aumentaba. La mayor eficiencia de eliminación del % DQO lograda fue superior a 40% y 70% en la turbidez. En la figura 11c, se muestra que a medida que el cloruro férrico aumente el % de fósforo total removido se incrementa.

Figura 11

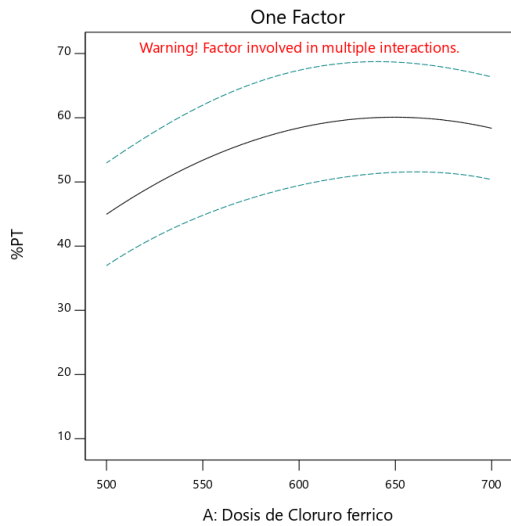
Gráficos de efectos significativos de la dosis de cloruro férrico sobre las diferentes variables respuestas



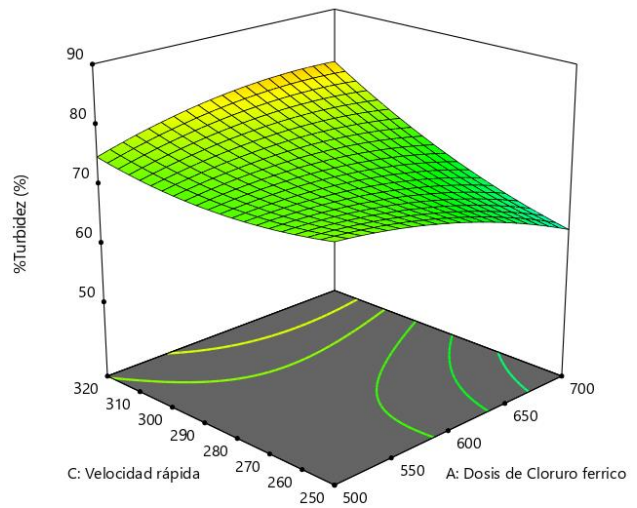
a.



b.



c.



d.

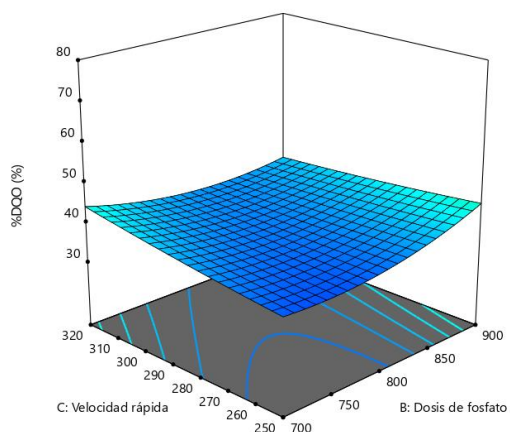
Nota. (a) Gráfico de efecto de la dosis de cloruro férrico sobre % DQO (b) Gráfico del efecto de la dosis de cloruro férrico en interacción con la velocidad de agitación rápida sobre % DQO (c) Gráfico de efecto de la dosis de cloruro férrico sobre % fósforo total (d) Gráfico del efecto de la dosis de cloruro férrico en interacción con la velocidad de agitación rápida sobre % turbidez.

ii. Efecto de la dosis de fosfato

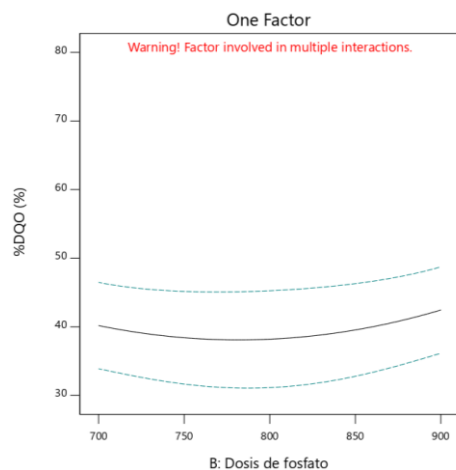
En la figura 12, se muestra los efectos significativos de la dosis de fosfato sobre el % DQO y sobre el % de fósforo total. La mayor eficiencia de eliminación del % PT se genera en una dosis de 750 mg/L.

Figura 12

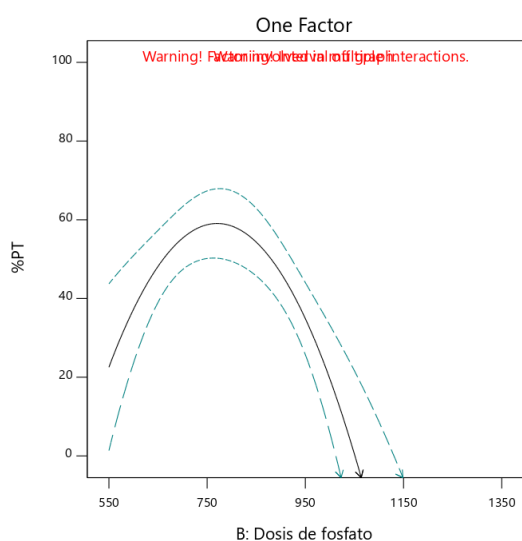
Gráficos de efectos significativos de la dosis de fosfato sobre las diferentes variables respuestas



a.



b.



c.

Nota. (a) Gráfico del efecto de la dosis de fosfato en interacción con la velocidad de agitación rápida sobre % DQO (b) Gráfico de efecto de la dosis de fosfato sobre % DQO; (c) Gráfico de efecto de la dosis de fosfato sobre % fósforo total.

5.2.2. Resultados de la optimización numérica

Luego de obtenido la significancia de los parámetros de respuesta, se planteó la función de deseabilidad para optimizar las respuestas múltiples. Esta función de deseabilidad permite condicionar las diferentes variables para obtener un resultado óptimo de acuerdo con los modelos de ajustes obtenidos. Para los indicadores como % DQO, % turbidez, % fósforo total reducidos se busca maximizar el porcentaje, mientras que el pH y la conductividad no se condicionan puesto que no cumplen ningún modelo significativo.

Tabla 18

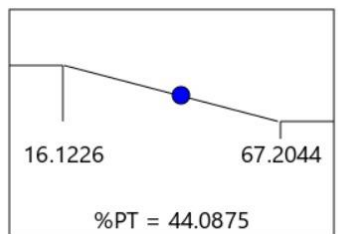
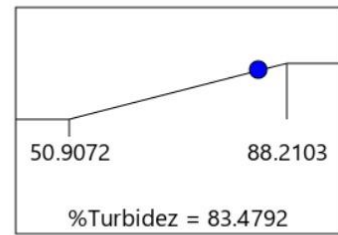
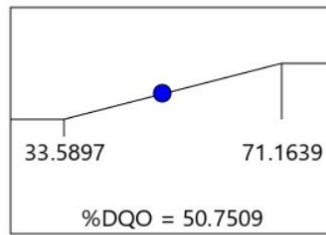
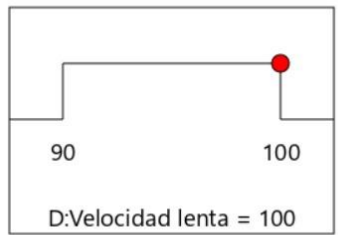
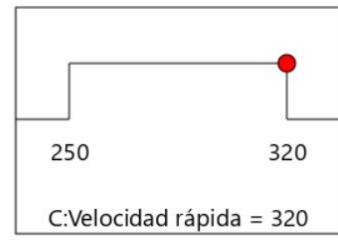
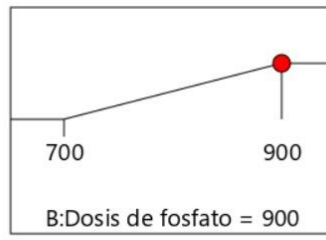
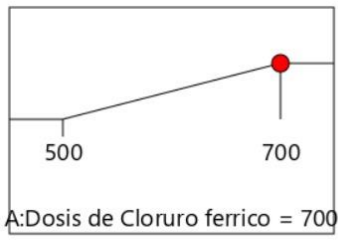
Función de deseabilidad para optimizar el % DQO, % turbidez, % fósforo total

Variables	Indicadores	Condición	Resultado
Independientes	Dosis de cloruro férrico	500-700	700
	Dosis de fosfato diácido de potasio	700-900	900
	Velocidad de agitación rápida	250-320	320
	Velocidad de agitación lenta	90-100	100
Dependientes	% DQO	Maximizar	50,75%
	% turbidez	Maximizar	83,47%
	% fósforo total	Maximizar	44,08%
	pH	-	
	Conductividad	-	

La figura 13 muestra los puntos óptimos numéricos para las variables respuestas como % DQO, % turbidez y % fósforo total.

Figura 13

Gráficas de respuestas a la deseabilidad propuesta



Desirability = 0.710
Solution 1 out of 98

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

6.1.1. Contrastación de hipótesis del modelo estadístico

Hipótesis General: La optimización del proceso coagulación-floculación usando cloruro férrico y fosfato mejora significativamente la reducción de contaminantes del agua residual del Camal Conchucos S.A., Lima.

Del desarrollo de las pruebas experimentales, empleando el diseño central compuesto, se ha obtenido porcentajes de reducción de contaminantes para cada una de las variables optimas las cuales son 50,75% de DQO, 83,47% de turbidez y 44,08% de fósforo total. De esta manera se acepta la hipótesis general que plantea la mejora significativa en la reducción de contaminantes

a. Normalidad de los residuos

Hipótesis

H_0 : Los errores tienen distribución normal

H_1 : Los errores NO tienen distribución normal

Nivel de significación

$\alpha = 0,05$; $p > 0,05$

Estadístico de prueba

Anderson-Darling

Tabla 19

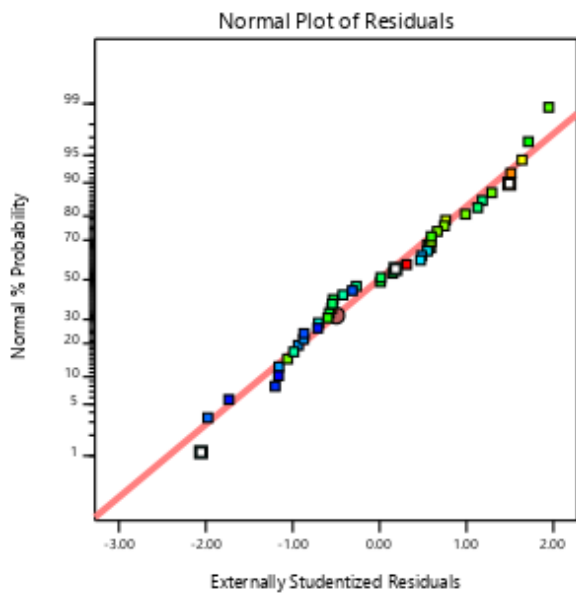
Análisis de normalidad de los residuos usando Anderson-Darling

	% DQO	% turbidez	% fósforo	C.E.	pH
AD	0,442	0,417	0,517	0,371	0,260
p-valor	0,276	0,318	0,180	0,408	0,696

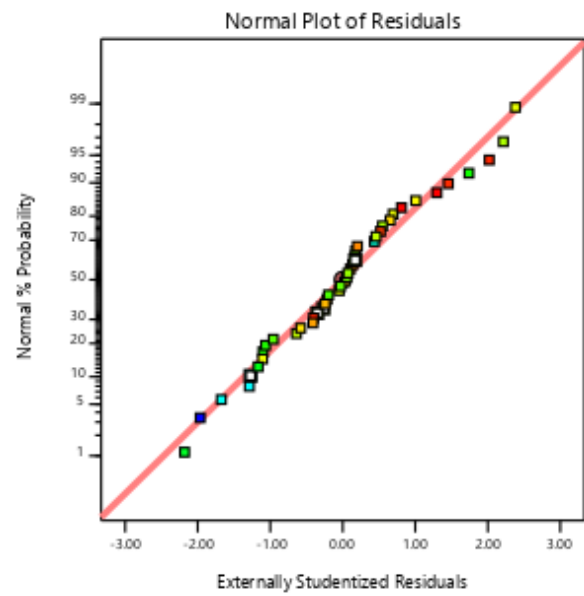
Para los parámetros de % DQO, % turbidez, % fósforo, conductividad, pH no se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, con un nivel de confianza del 95% se concluye que todos los parámetros tienen distribución normal cumpliendo el supuesto.

Figura 14

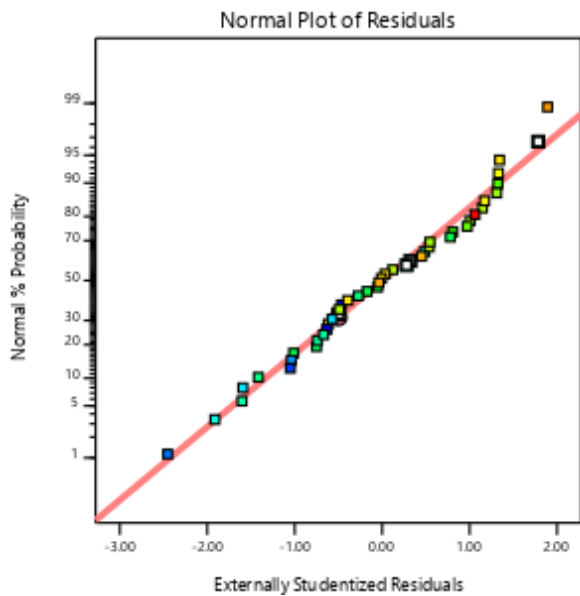
Normalidad de residuos de las variables respuestas del tratamiento



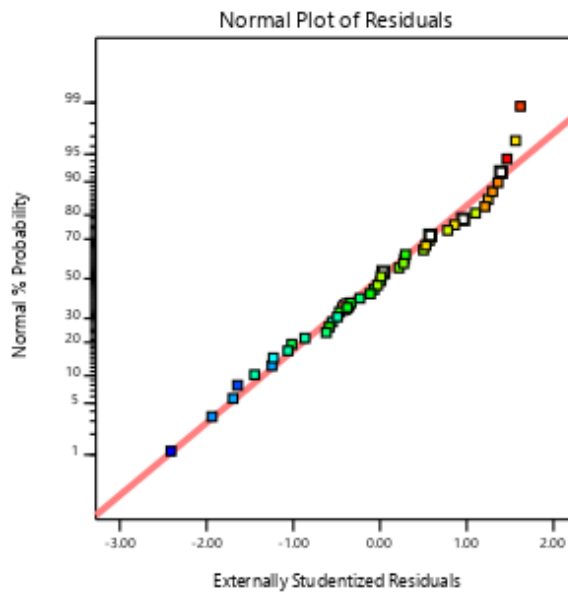
a.



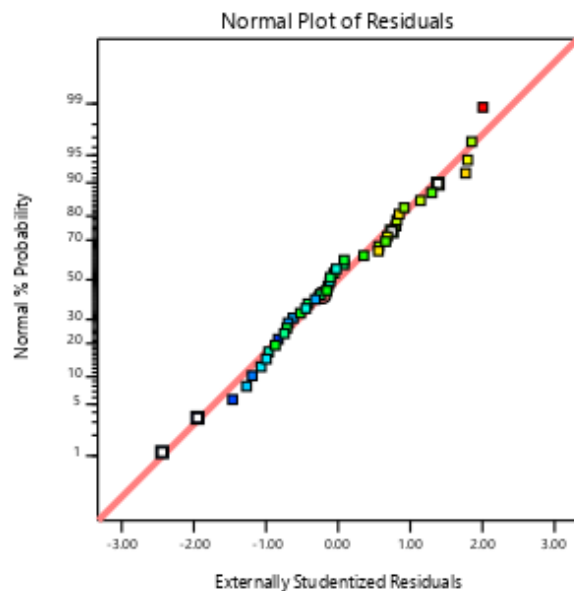
b.



c.



d.



e.

Nota. a. Normalidad del % DQO; b. Normalidad del % turbidez; c. Normalidad del % fósforo total; d. Normalidad de pH; e. Normalidad de conductividad

b. Homogeneidad de la varianza

Hipótesis

H_0 : Las varianzas son iguales

H_1 : Al menos una varianza es diferente

Nivel de significación

$\alpha = 0,05$; $p > 0,05$

Estadístico de prueba

Prueba de Bartlett

Tabla 20

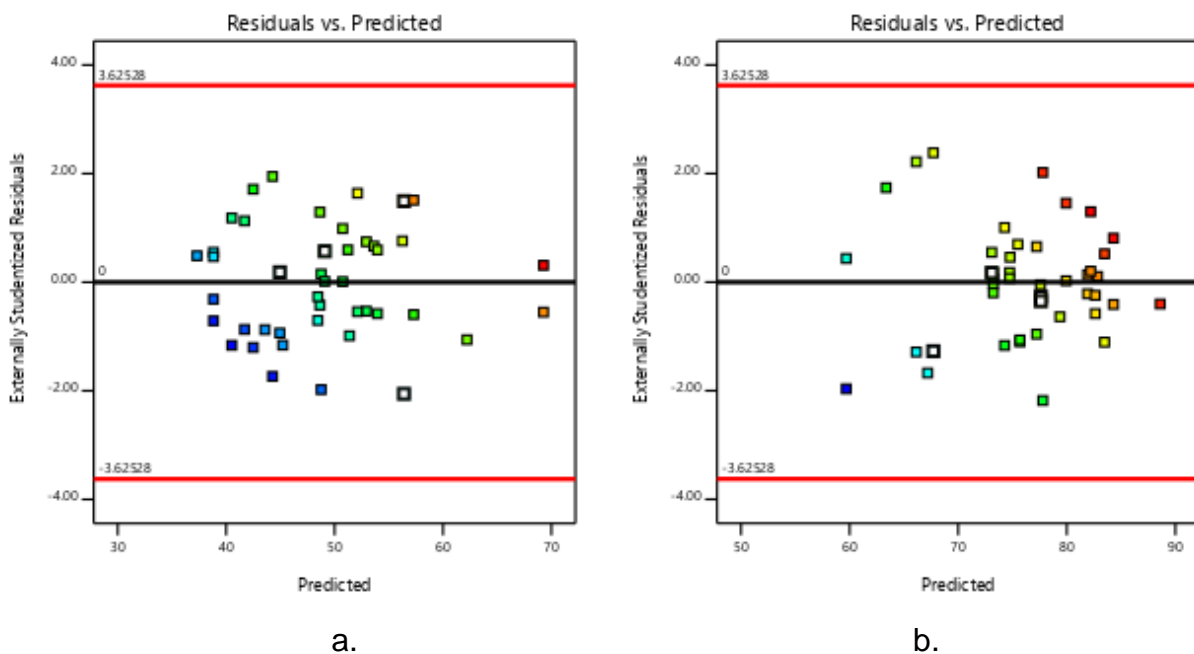
Análisis de la homogeneidad de la varianza de los residuos usando prueba de Bartlett

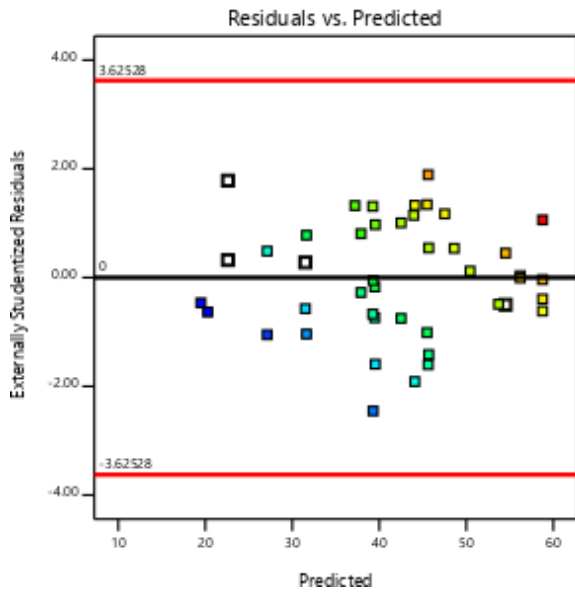
	% DQO	% turbidez	% fósforo	C.E.	pH
BT	8,07	28,82	10,8	9,13	8,98
p-valor	0,947	0,025	0,863	0,908	0,914

Para los parámetros de % DQO, % fósforo, conductividad, pH no se rechaza la hipótesis nula. Respecto al parámetro de la % turbidez se rechaza la hipótesis nula. Por lo tanto, con un nivel de confianza del 95% se concluye que todos los parámetros tienen distribución normal cumpliendo el supuesto con excepción de la turbidez.

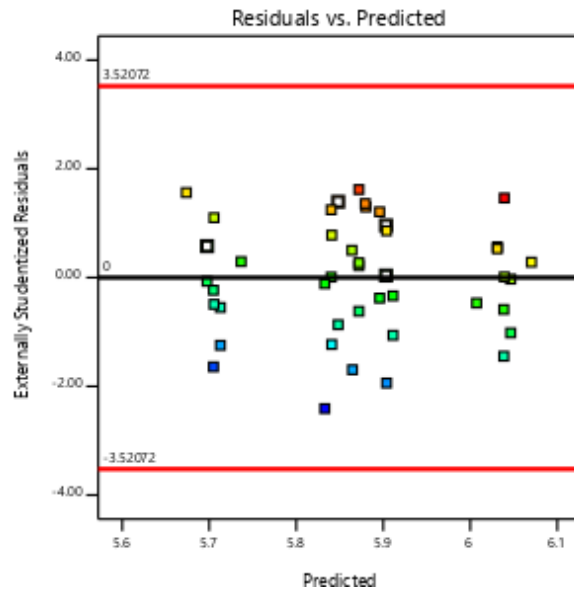
Figura 15

Homogeneidad de la varianza de residuos de los diferentes parámetros de tratamiento

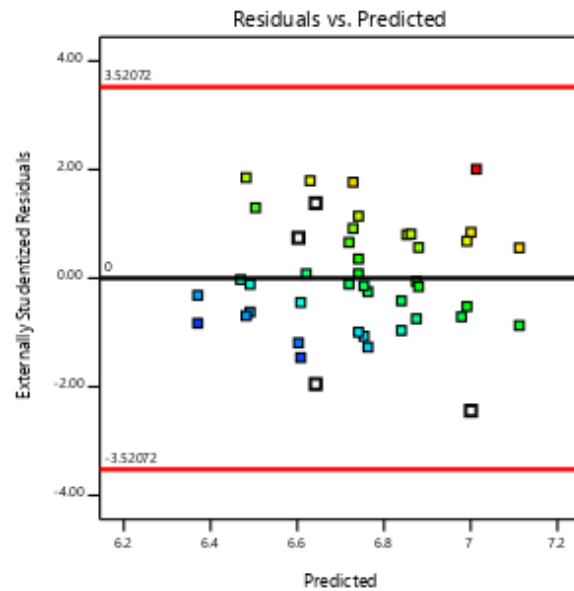




c.



d.



e.

Nota. a. Varianza del % DQO; b. Varianza del % turbidez; c. Varianza del % fósforo total; d. Varianza del pH; e. Varianza de la conductividad

6.1.2. Contrastación de las hipótesis de estudio

a. Hipótesis específica 1

H_0 : Ningún efecto en los parámetros de operación, la dosificación de cloruro férrico y fosfato es significativo en la reducción de contaminantes.

H₁: Al menos alguno de los efectos de los parámetros de operación, la dosificación de cloruro férrico y fosfato es significativo en la reducción de contaminantes.

Según la tabla 13, 14 y 15 se observa que el efecto en los parámetros de operación, la dosificación de cloruro férrico y fosfato es significativo en la reducción de contaminantes ($0,05 < p$). Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la alternativa.

b. Hipótesis específica 2

H₀: Los modelos estadísticos en función de los parámetros de operación, la dosificación de cloruro férrico y fosfato, explican la variabilidad de la reducción de contaminantes en un R^2 menor al 85%.

H₁: Los modelos estadísticos en función de los parámetros de operación, la dosificación de cloruro férrico y fosfato, explican la variabilidad de la reducción de contaminantes en un R^2 mayor al 85%.

Según las tablas 13, 14 y 15 se observan que los modelos estadísticos en función de los parámetros de operación, la dosificación de cloruro férrico y fosfato, explican la variabilidad de la reducción de contaminantes en un R^2 menor al 85%. Por lo tanto se acepta la hipótesis nula (H_0).

c. Hipótesis específica 3

H₀: No existe condiciones de operación óptimas que permitirán maximizar la reducción de contaminantes.

H₁: Existe algunas condiciones de operación óptimas que permitirán maximizar la reducción de contaminantes.

Según la tabla 18, los máximos porcentajes de reducción de DQO, turbidez y fósforo total fueron 50,75%, 83,47% y 44,08% respectivamente, bajo las condiciones de operación y dosis de 700 mg/L de cloruro férrico, 900 mg/L de fosfato diácido de potasio, 320 rpm de velocidad de agitación rápida y 100 rpm de velocidad de agitación lenta. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la alternativa.

6.2. Contrastación de los resultados con estudios similares

De los resultados obtenidos en este trabajo de investigación con relación al uso del coagulante de cloruro de hierro podemos concluir que mantienen una eficiencia relativamente baja de 49,07% y 75,89% en la reducción de DQO y turbiedad, respectivamente. Esto de acuerdo con el estudio de Gökçek y Özdemir, (2020) donde aplicando la metodología de superficie de respuesta con un diseño de Box-Behnken usando el ClFe_3 obtuvieron eficiencias de DQO y de turbidez de 72,64% y 60,17%, respectivamente, tratando aguas de mataderos con eficiencias similares a este estudio. Asimismo, en el estudio de Prazeres et ál., (2019) se trató el agua residual de matadero mediante procesos de oxidación y estos mostraron un mejor desempeño para la reducción de DQO (67%) DQO $\geq 71\%$ y turbidez de 85-100%.

Por otro lado, en cuanto a la eficiencia del cloruro férrico como coagulante para la reducción de contaminantes, Boughou et ál., (2016) realizó en su investigación una saturación del medio con cloruro de hierro dando como resultado una alta remoción de sólidos en suspensión (98%) y demostrando la eficiencia del cloruro de hierro para la reducción de sólidos en suspensión, el cual es un contaminante que no fue incluido como indicador en nuestra investigación. Es así como el cloruro férrico demostró ser el factor con mayor significancia durante el tratamiento de agua residual de matadero, pese a que existen otros estudios de coagulación-floculación de aguas industriales como Bakar y Halim, (2013) que reportaron bajas eficiencias del cloruro férrico (menor al 64%) en comparación de otros coagulantes como sulfato de aluminio (alumbre).

Asimismo, el coagulante de cloruro férrico presenta una ventaja adicional para el tratamiento de aguas residuales que incluye la precipitación de compuestos de azufre y una mayor eficiencia en la eliminación y reducción del consumo de energía en el ámbito biológico (Dabhi y Parmar, 2010). Además, según Thistleton et ál., (2002) al adicionar cloruro de hierro al agua residual se generó la eliminación de fósforo debido a la sustitución del ión cloruro por el ión fosfato. Sin embargo, en esta investigación el efecto del fosfato como floculante fue no significativo. Se esperaba la mejora del proceso de acuerdo con la fuente revisada sobre la alta reacción entre el hierro y el fósforo, pero la adición de FeCl_3 al agua

residual produjo iones de hierro e iones cloruro, donde los iones de hierro cargados positivamente neutralizan a las partículas coloidales cargadas negativamente, las mismas que conducen a la coagulación; es por ello, que al adicionar el fosfato sobre los coágulos no se produjo la sustitución de iones por lo que no aumento el peso molecular esperado para una eficiente floculación.

En relación con la metodología de optimización aplicada, los modelos estadísticos nos permitieron tener un alcance de alto rango del proceso de coagulación-floculación, debido a que se puede predecir los porcentajes de reducción en relación con las dosificaciones. El diseño central compuesto utilizado nos delimitó una región de trabajo óptimo con bajos R^2 (0,61, 0,66, 0,67) con respecto a las otras investigaciones. En el estudio de optimización de Bustillo-Lecompte y Mehrvar, (2017), usó una metodología de superficie de respuesta (RSM) para la optimización del proceso combinado anaeróbico-aeróbico y para maximizar la reducción de contaminantes en el tratamiento de agua residual de mataderos, la cual mostró un R^2 (0,9910, 0,9963, 0,9900) para carbono orgánico, nitrógeno total y solidos suspendidos totales. Asimismo, Gutiérrez y Pilco, (2020) en su estudio usaron un diseño experimental de cribado para el proceso foto-Fenton demostrando que es muy efectivo para tratar el agua residual textil sintética con un R^2 de 0,99962 para el DQO.

6.3. Responsabilidad ética

La presente tesis titulada “OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN USANDO CLORURO FÉRRICO Y FOSFATO PARA LA REDUCCIÓN DE CONTAMINANTES DEL AGUA RESIDUAL DEL CAMAL CONCHUCOS S.A., LIMA” se encuentra dentro de los principios y compromisos de responsabilidad ética según los reglamentos vigentes de la Universidad Nacional del Callao.

Así mismo, este estudio cumple con el rigor de originalidad en el tema de investigación.

VII. CONCLUSIONES

Luego de llevar a cabo el tratamiento fisicoquímico del agua residual del Camal Conchucos S.A. mediante el proceso de coagulación-floculación con cloruro férrico y fosfato diácido de potasio para lograr la reducción de DQO, turbidez y fósforo total, se concluyó lo siguiente.

- Que luego de evaluar los efectos de los parámetros de operación y de las dosificaciones de cloruro férrico y fosfato al menos alguno fue significativo en la reducción de contaminantes, ya que presentaron un valor p menor al 0,05 que fue expresado en los modelos estadísticos de los porcentajes de reducción del DQO, turbidez y fósforo total.
- Luego de analizar los modelos estadísticos en función de los parámetros de operación (velocidad de agitación rápida y lenta), la dosificación de cloruro férrico y fosfato, estos explicaron la variabilidad de la reducción de contaminantes con un R^2 menor al 85%.
- Se determinaron como condiciones de operación óptimas a 700 mg/L de cloruro férrico, 900 mg/L de fosfato diácido de potasio, 320 rpm de velocidad de agitación rápida y 100 rpm de velocidad de agitación, que permitieron maximizar los porcentajes de reducción DQO, turbidez y fósforo total al 50,75%, 88,47% y 44,08% respectivamente.

VIII. RECOMENDACIONES

- Para poder evaluar mejor los efectos de los parámetros de operación y de las dosificaciones de cloruro férrico y fosfato, se sugiere realizar una caracterización microbiológica debido a que se visualizó una resuspensión post-tratamiento de este tipo de agua residual lo que dificultaba la medición de los parámetros. Asimismo, analizar la influencia de los parámetros DBO_5 y aceites y grasas en el proceso de coagulación-floculación, dado que en la caracterización del agua residual tratada se observan que sobrepasan los Valores Máximos Admisibles (RCD N° 011-2020-SUNASS-CD).

- Para mejorar los resultados del valor de R^2 en los modelos estadísticos es importante realizar 2 o más replicas para cada tratamiento, del mismo modo 2 o más repeticiones por cada toma de muestra para disminuir el porcentaje de error durante el análisis estadístico.
- Se recomienda probar con otros químicos o polímeros pesados como floculantes debido a que el fosfato diácido de potasio no tuvo un aporte significativo en los porcentajes de reducción de DQO, turbidez y fosforo total.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almansba, A., Kane, A., Nasrallah, N., Maachi, R., Lamaa, L., Peruchon, L., Brochier, C., Béchohra, I., Amrane, A., & Assadi, A. A. (2021). Innovative photocatalytic luminous textiles optimized towards water treatment: Performance evaluation of photoreactors. *Chemical Engineering Journal*, 416, 129195. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129195>
- Alwan, G., & Alwasiti, A. (2013). Improving the Performance of a Catalytic Membrane Reactor via Stochastic Optimization. *International Review of Chemical Engineering (IRECHE)*, 5(2), 165-171–171. <https://doi.org/10.15866/ireche.v5i2.6915>
- Alwan, G. M. (2012). Simulation and optimization of a continuous biochemical reactor. *Chemical and Process Engineering Research*, 5.
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua: coagulación y floculación. *Documento técnico. Planta de Tratamiento de Agua Sedapal, Lima*.
- Arguello, H., Carvajal, A., Collazos, J. A., García-Feliz, C., & Rubio, P. (2012). Prevalence and serovars of Salmonella enterica on pig carcasses, slaughtered pigs and the environment of four Spanish slaughterhouses. *Food Research International*, 45(2), 905–912. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.04.017>
- Ascurra, J., Miranda, D., Vásquez, G., Fernández, F., Rojas, J., & Cabello, J. (2013). *Optimización de sulfato de aluminio para la remoción de materia orgánica en la obtención de agua potable*.
- Azabache Liza, Y. F. (2017). Efecto del proceso de coagulación floculación, en la remoción de hierro (II), presente en las aguas de la quebrada Juningullo, Moyobamba. En *Universidad Nacional De San Martín - Tarapoto*. Universidad Nacional de San Martín- Tarapoto.
- Bakar, A. F. A., & Halim, A. A. (2013). Treatment of automotive wastewater by coagulation-flocculation using poly-aluminum chloride (PAC), ferric chloride (FeCl₃) and aluminum sulfate (alum). *AIP conference proceedings*, 1571(1), 524–529.

- Barraza Félix, A. J., & Palpa Chávez, G. (2011). *Comparación de eficiencias en el tratamiento de las aguas residuales provenientes de un camal utilizando en forma independiente reactores UASB y filtros contenedores a escala piloto.*
- Bermúdez, X. C., Moya, A. M. C., & Ramírez, M. F. (2009). Estudio del proceso de coagulación-floculación de aguas residuales de la empresa Textil "desembarco del granma" a escala de Laboratorio. *Tecnología química*, 29(3), 64–73.
- Bertrand-Krajewski, J. L., Winkler, S., Saracevic, E., Torres, A., & Schaar, H. (2007). Comparison of and uncertainties in raw sewage COD measurements by laboratory techniques and field UV-visible spectrometry. *Water Science and Technology*, 56(11), 17–25. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.759>
- Borowski, S., & Kubacki, P. (2015). Co-digestion of pig slaughterhouse waste with sewage sludge. *Waste Management*, 40, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.021>
- Boughou, N., Majdy, I., Cherkaoui, E., Khamar, M., & Nounah, A. (2016). The physico-chemical treatment by coagulation-flocculation releases of slaughterhouse wastewater in the city of Rabat (Morocco). *Der Pharma Chemica*, 8(19), 93–99.
- Bradley, E. (2019). *Wastewater Coagulation.*
- Brasington, J., & Richards, K. (2000). Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills. *Hydrological Processes*, 14(14), 2559–2574. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(20001015\)14:14<2559::AID-HYP114>3.0.CO;2-E](https://doi.org/10.1002/1099-1085(20001015)14:14<2559::AID-HYP114>3.0.CO;2-E)
- Brusseau, M. L., Walker, D. B., & Fitzsimmons, K. (2019). Physical-Chemical Characteristics of Water. En *Environmental and Pollution Science* (pp. 23–45). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814719-1.00003-3>
- Bugallo, P. M. B., Andrade, L. C., De la Torre, M. A., & López, R. T. (2014). Analysis of the slaughterhouses in Galicia (NW Spain). *Science of the Total Environment*, 481(1), 656–661. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.079>
- Burton, C. H., Cumby, T. R., & Tinker, D. B. (2004). Treatment and disposal of

- poultry processing waste. *Poultry meat processing and quality*, 345–376.
- Bustillo-Lecompte, C. F., & Mehrvar, M. (2015). Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances. *Journal of Environmental Management*, 161, 287–302. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.07.008>
- Bustillo-Lecompte, C. F., & Mehrvar, M. (2017). Treatment of actual slaughterhouse wastewater by combined anaerobic–aerobic processes for biogas generation and removal of organics and nutrients: An optimization study towards a cleaner production in the meat processing industry. *Journal of cleaner production*, 141, 278–289.
- Chambi Hanco, Z. (2018). *Tratamiento de aguas residuales de lavanderías por el proceso de coagulación-floculación y adsorción*.
- Crescentini, M., Bennati, M., & Tartagni, M. (2011). Integrated and autonomous conductivity-temperature-depth (CTD) sensors for environmental monitoring. *Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2011.6026396>
- Dabhi, Y. M., & Parmar, K. A. (2010). Effective use of ferric sulphate and ferric chloride in treatment of dairy industry wastewater. *Asian Journal of Chemistry*, 22(10), 7615–7620.
- Del Carpio Calienes, L. R., & Rubin De Celis Gomez, L. (2019). *Tratamiento fisico quimico y su posible reuso del agua residual proveniente del lavado de fibras proteicas para cumplir con los VMA*.
- Dodds, W. K., Whiles, M. R., Dodds, W. K., & Whiles, M. R. (2020). Properties of Water. En *Freshwater Ecology* (pp. 21–48). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813255-5.00002-8>
- Gilpavas, E., Eliana ARBELÁEZ-CASTAÑO, P., & David MEDINA-ARROYAVE Carlos Mario GÓMEZ-ATEHORTUA, J. (2018). Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia . *Rev. Int. Contam. Ambiental*, 34(1), 157–167.

<https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.14>

- Gökçek, Ö. B., & Özdemir, S. (2020). Optimization of the Coagulation–Flocculation Process for Slaughterhouse Wastewater Using Response Surface Methodology. *CLEAN–Soil, Air, Water*, 48(7–8), 2000033.
- Grubbs, G. H., Rubin, M., Branch, E., Goodwin, J., Lewis, S., & Johnston, C. A. (2002). *Development Document for the Proposed Effluent Limitations Guidelines and Standards for the Meat and Poultry Products Industry Point Source Category (40 CFR 432)*.
- Gutiérrez, C., & Pilco, A. (2020). *OPTIMIZATION OF THE REMOVAL OF PERSISTENT ORGANIC COMPOUNDS THROUGH THE PHOTO-FENTON PROCESS*. 86(1).
- Ha, B. M., & Huong, D. T. G. (2017). *Coagulation for treatment of swine slaughterhouse wastewater*.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la investigación, editorial Mcgraw Hill*. México, DF.
- Hilares, R. T., Atoche-Garay, D. F., Pagaza, D. A. P., Ahmed, M. A., Andrade, G. J. C., & Santos, J. C. (2021). Promising physicochemical technologies for poultry slaughterhouse wastewater treatment: A critical review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 105174.
- Hossain, M. Z. (2015). Water: The Most Precious Resource of Our Life. *Global Journal of Advanced Research*, 2(9), 1436–1445.
- Jordán Santamaría, L. A. (2019). *Sistema de coagulación-floculación a escala laboratorio y su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales provenientes del proceso de preparación de pega para la elaboración de zapatos de cuero*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas
- Julen Yanguas Sáenz. (2016). *Optimización en el proceso de depuración de aguas residuales urbanas*. Universidad de la Rioja.
- Li, D., & Liu, S. (2019). Detection of River Water Quality. En *Water Quality Monitoring and Management* (pp. 211–220). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811330-1.00007-7>

- Li, D., Liu, S., Li, D., & Liu, S. (2019). Detection of River Water Quality. *Water Quality Monitoring and Management*, 211–220. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811330-1.00007-7>
- Luna Chávez, C. M. (2017). *Influencia del pH en la coagulación–sedimentación primaria de aguas residuales de un camal.*
- Medina Valderrama, C. J., Uriarte Tirado, W., Orrego Zapo, S. T., & Montero Del Aguila, E. M. (2018). *Aplicación del proceso Fenton para degradar aguas residuales del camal de Chota.*
- Metcalf, E., & Eddy, M. (2014). Wastewater engineering: treatment and Resource recovery. *Mic Graw-Hill, USA*, 1530–1533.
- MINAM. (2012). *Glosario de Términos para la gestión ambiental peruana.* Lima, Perú: VGA. Disponible en <http://www.usmp.edu.pe/recursoshumanos/pdf>
- Palatsi, J., Viñas, M., Guivernau, M., Fernandez, B., & Flotats, X. (2011). Anaerobic digestion of slaughterhouse waste: Main process limitations and microbial community interactions. *Bioresource Technology*, 102(3), 2219–2227. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.09.121>
- Prazeres, A. R., Fernandes, F., Madeira, L., Luz, S., Albuquerque, A., Simões, R., Beltran, F., Jerónimo, E., & Rivas, J. (2019). Treatment of slaughterhouse wastewater by acid precipitation (H₂SO₄, HCl and HNO₃) and oxidation (Ca (ClO)₂, H₂O₂ and CaO₂). *Journal of environmental management*, 250, 109558.
- RAE. (2001). *Diccionario de la lengua española* (Vol. 22). Real academia española Madrid.
- Rajab, A. R., Salim, M. R., Sohaili, J., Anuar, A. N., & Lakkaboyana, S. K. (2017). Performance of integrated anaerobic/aerobic sequencing batch reactor treating poultry slaughterhouse wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 313, 967–974.
- Ramirez, C. a., Patel, M., & Blok, K. (2006). How much energy to process one pound of meat? A comparison of energy use and specific energy consumption

- in the meat industry of four European countries. *Energy*, 31(12), 1711–1727. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.08.007>
- Rodríguez Jiménez, A., & Pérez Jacinto, A. O. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. *Revista EAN*, 82, 179–200.
- Ruiz, I., & Veca, M. (1993). *Características de efluentes de mataderos, revisión de alternativas de tratamiento*.
- Salas, G., & Condorhuamán, C. (2008). Tratamiento de las aguas residuales de un centro de beneficio o matadero de ganado. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 11(1), 29–35.
- Sánchez de Fuentes, J. (2001). V-100 - El fósforo, parámetro crítico de calidad de agua. Técnicas analíticas y de muestreo. *XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 1, 1–9.
- Seif, H., & Moursy, A. (2001). Treatment of slaughterhouse waste. *Sixth International Water Technology Conference, IWTC*, 269–275. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(96\)00143-6](https://doi.org/10.1016/0273-1223(96)00143-6)
- Shak, K. P. Y., & Wu, T. Y. (2015). Optimized use of alum together with unmodified *Cassia obtusifolia* seed gum as a coagulant aid in treatment of palm oil mill effluent under natural pH of wastewater. *Industrial Crops and Products*, 76, 1169–1178. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.07.072>
- Sillanpää, M., & Shestakova, M. (2017). Introduction. En *Electrochemical Water Treatment Methods: Fundamentals, Methods and Full Scale Applications* (pp. 1–46). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811462-9.00001-3>
- Sucso Noa, M. (2020). *Recuperación de plomo por coagulación-floculación en la cuenca del río Suches*. Universidad Nacional del Altiplano de Puno.
- Thistleton, J., Berry, T. A., Pearce, P., & S.A., P. (2002). Mechanisms of chemical phosphorus removal II Iron (III) Salts. *Institution of Chemical Engineers*, 265-269.
- Torre Postigo, C. H. de la. (2015). *Contaminación del agua y pobreza rural: el caso de la cuenca alta del río Vilcanota*. Cusco.
- Vargas, M., & Romero, L. (2010). *Desarrollo de coagulantes y floculantes para el*

tratamiento de aguas en países en desarrollo. Instituto tecnológico de Costa Rica.

WWOA. (2018). *Metals Removal by pH Adjustment* : WWOA.

Yaakob, M. A., Mohamed, R. M. S. R., Al-Gheethi, A. A. S., & Kassim, A. H. M. (2018). Characteristics of chicken slaughterhouse wastewater. *Chemical Engineering Transactions*, 63, 637–642.

Zerbatto, M., Modini, L., Vaira, S., & Abramovich, B. L. De. (2009). Cloruro Férrico para la coagulación optimizada y remoción de enteroparásitos en agua. *AUGM_DOMUS*, 1(0), 18–26.

X. ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDAD DE MEDICIÓN	ESCALA DE MEDICIÓN DE LA VARIABLE	TÉCNICA	INSTRUMENTO	
¿De qué manera la optimización del proceso coagulación-floculación usando cloruro férrico y fosfato mejora la reducción de contaminantes del agua residual del Camal Conchucos S.A., Lima?	Optimizar el proceso coagulación-floculación usando cloruro férrico y fosfato para la reducción de contaminantes del agua residual del Camal Conchucos S.A., Lima.	La optimización del proceso coagulación-floculación usando cloruro férrico y fosfato mejora significativamente la reducción de contaminantes del agua residual del Camal Conchucos S.A., Lima.	Proceso coagulación-floculación usando cloruro férrico y fosfato di ácido de potasio	El proceso de coagulación-floculación se realizará en un equipo de prueba de jarras variando la velocidad y tiempo de agitación, y la dosificación de cloruro férrico y de fosfato diácido de potasio.	Dosificación del cloruro férrico	Cantidad del cloruro férrico	mg/L	Categoría nominal dicotómica	Observación experimental	Balanza	
					Dosificación del fosfato diácido de potasio	Cantidad del fosfato diácido de potasio	mg/L			Equipo de prueba de jarras	
					Parámetros de operación	Velocidad de agitación rápida	rpm				
						Velocidad de agitación lenta	rpm				
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDAD DE MEDICIÓN	ESCALA DE MEDICIÓN DE LA VARIABLE	TÉCNICA	INSTRUMENTO	
• ¿Cuál será el efecto de los parámetros de operación y de las dosificaciones de cloruro férrico y fosfato en la reducción de contaminantes?	• Evaluar el efecto de los parámetros de operación y de las dosificaciones de cloruro férrico y fosfato en la reducción de contaminantes.	• Al menos alguno de los efectos de los parámetros de operación, la dosificación de cloruro férrico y fosfato será significativo en la reducción de contaminantes.	Reducción de contaminantes	La reducción de contaminantes del agua es evaluada mediante la medición de DQO, fósforo total, turbidez, conductividad y pH.	Porcentaje de reducción	% de reducción de la DQO	%	Numérico Continuo	SMEWW-APHA-AWWA-WEF Parte 5220 D; 23rd Ed:2017.	Digestor, colorímetro, oxidación de viales	
• ¿De qué manera los modelos estadísticos en función de los parámetros de operación, de las dosificaciones de cloruro férrico y fosfato explican la reducción de contaminantes?	• Analizar los modelos estadísticos en función de los parámetros de operación y de las dosificaciones de cloruro férrico y fosfato que explican la reducción de contaminantes.	• Los modelos estadísticos en función de los parámetros de operación, la dosificación de cloruro férrico y fosfato, explican la variabilidad de la reducción de contaminantes en un R cuadrado mayor al 85%.				% de reducción de fósforo total	%			SMEWW-APHA-AWWA-WEF Parte 4500 P, E, 23rd Ed:2017	Espectrofotómetro
						% remoción de la turbidez	%			SMEWW-APHA-AWWA-WEF Parte 2130 B; 23rd Ed:2017	Turbidímetro
						pH	0-14			EPA 300.0 Rev. 2.1:1993	Colorímetro
• ¿Cuáles serán las condiciones de operación óptima para maximizar la reducción de contaminantes?	• Determinar las condiciones de operación óptimas para maximizar la reducción de contaminantes.	• Existe algunas condiciones de operación óptimas que permitirán maximizar la reducción de contaminantes.				Conductividad	µS/cm		Electrometría	Potenciómetro	

Anexo 2. Fotos de experimento en laboratorio



Foto 1. Toma de muestra para la caracterización del agua en un laboratorio externo



Foto 2. Agua residual del Camal Conchucos S.A.



Foto 3. Adición de cloruro férrico al agua residual de matadero en la prueba de jarras



Foto 4. Desarrollo del proceso de coagulación-floculación en la prueba de jarras



Foto 5. Reposo del agua tratada con el cloruro férrico y el fosfato diácido de potasio



Foto 6. Comparación del agua sin tratar y el agua tratada



Foto 7. Medición de la conductividad y el pH



Foto 8. Rotulación de viales para DQO

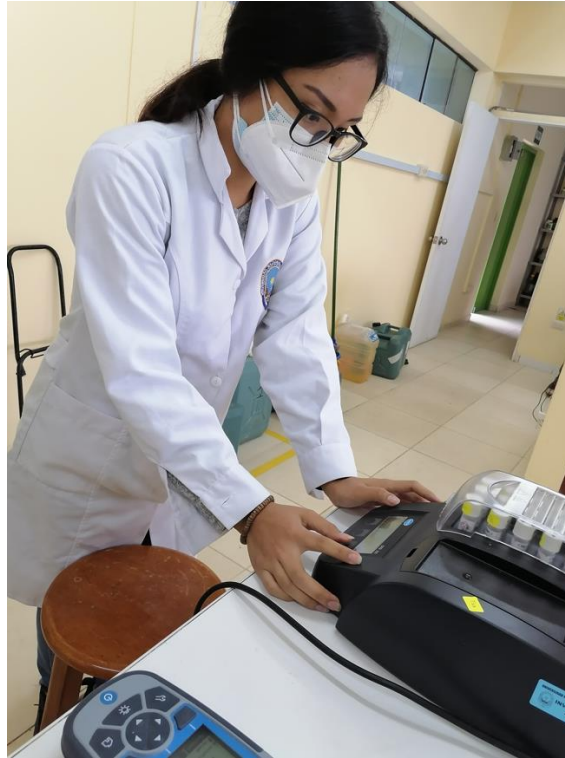


Foto 9. Viales de DQO en el digestor



Foto 10. Lectura de DQO en el colorímetro

Anexo 3. Análisis de caracterización del agua en laboratorio



LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 096



Registro N° LE - 096

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-4688

I. DATOS DEL SERVICIO

1.-RAZON SOCIAL	: MIYASHIRO AGUIRRE RUTH MEGUMI
2.-DIRECCIÓN	: Calle Daniel Alcides Carrion 248, san martin de porres
3.-PROYECTO	: COMPARACION DE LOS TRATAMIENTOS DE ELECTROCOGULACION Y COAGULACION-FLOCULACION EN LA REMOCION DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES DEL CAMAL DE CONCHUCOS
4.-PROCEDENCIA	: CAMAL DE CONCHUCOS-EL AGUSTINO-LIMA
5.-SOLICITANTE	: MIYASHIRO AGUIRRE RUTH MEGUMI
6.-ORDEN DE SERVICIO N°	: OS-21-1864
7.-PROCEDIMIENTO DE MUESTREO	: NO APLICA
8.-MUESTREADO POR	: EL CLIENTE
9.-FECHA DE EMISIÓN DE INFORME	: 2021-06-07

II. DATOS DE ÍTEMS DE ENSAYO

1.-PRODUCTO	: Agua
2.-NÚMERO DE MUESTRAS	: 1
3.-FECHA DE RECEP. DE MUESTRA	: 2021-05-11
4.-PERÍODO DE ENSAYO	: 2021-05-11 al 2021-06-07

Marco Valencia Huerta
Ingeniero Químico
N° CIP 152207

INFORME DE ENSAYO N°: IE-21-4688
IV. RESULTADOS

ITEM				1
CÓDIGO DE LABORATORIO:				M-21-16729
CÓDIGO DEL CLIENTE:				ECUALIZADOR
COORDENADAS:				NO APLICA
UTM WGS 84:				NO APLICA
PRODUCTO:				Agua Residual
SUB PRODUCTO:				Residual Industrial
INSTRUCTIVO DE MUESTREO:				NO APLICA
FECHA y HORA DE MUESTREO :				11-05-2021 08:50
ENSAYO	UNIDAD	L.D.M.	L.C.M.	RESULTADOS
Aceites y Grasas (*)	mg/L	0,48	1,20	25,00
Conductividad (*)	µS/cm	NA	0,01	2 120,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (*)	mg BOD5/L	0,4	2,0	759,0
Demanda Química de Oxígeno (*)	COD as mg O2/L	2,0	5,0	4 005,4
pH (**)	Unidad de pH	NA	0,01	6,88
Turbidez (*)	NTU	NA	0,01	485,00

(*) Los resultados obtenidos corresponde a métodos que han sido acreditados por el INACAL - DA

(**) El Ensayo Indicado no ha sido acreditado

L.C.M.: Límite de cuantificación del método, "<"= Menor que el L.C.M.

L.D.M.: Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M.

*: No ensayado

NA: No Aplica

V. OBSERVACIONES

Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió.

"FIN DE DOCUMENTO"

Anexo 4. Metodologías usadas en laboratorio

MEDICIÓN DE LA DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO POR EL MÉTODO COLORIMÉTRICO REFLUJO CERRADO

Objetivos:

- Determinar la concentración de la demanda química de oxígeno por el método colorimétrico reflujo cerrado.
- Elaborar la curva de calibración

Principio

El método colorimétrico es considerado económico en el uso de materiales y reactivos de sal, además es el método que genera menor cantidad de desechos peligrosos, pero es necesario la homogenización de muestras para obtener los resultados requeridos.

Cuando se digiere una muestra, el ion dicromato la oxida debido a la mezcla y ebullición dando como resultado el cambio de cromo del estado hexavalente (VI) al estado trivalente (III). Ambas especies de cromo están coloreadas y se absorben en la región visible del espectro. El ion dicromato ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) absorbe fuertemente en la región de 400 nm, donde la absorción del ion crómico (Cr^{3+}) es mucho menor. El ion crómico absorbe fuertemente en la región de 600 nm, donde el dicromato tiene una absorción casi nula.

Procedimiento experimental.

Reactivos

Solución de digestión (vial), rango alto (20 - 800 mg/L). Agregar aproximadamente 500 ml de agua destilada, 10,216 g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 167 ml de H_2SO_4 concentrado y 33,3 g de HgSO_4 . Disuelva, enfríe a temperatura ambiente y diluya a 1L.

Solución de digestión (vial), rango bajo (2 - 80 mg/L). Agregar aproximadamente 500 ml de agua destilada, 1,022 g de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, 167 ml de H_2SO_4 concentrado y 33,3 g de HgSO_4 . Disuelva, enfríe a temperatura ambiente y diluya a 1L.

Nota: El ácido Sulfúrico es TÓXICO por inhalación, ingestión o en contacto con la piel y NOCIVO para el medio ambiente, evitar el contacto las vías respiratorias, los ojos y la piel.

Materiales y equipo

- Pipeta aforada de 5 y 10 mL
- Gradilla
- Micropipeta y punta de micropipeta
- Digestor
- Colorímetro
- Tratamiento de muestra

En el caso que la muestra a analizar tenga una carga muy elevada, diluir en tubos de ensayo a concentraciones de 1/10, 1/100, 1/1000, etc. Tener en cuenta que entre mayor sea la dilución el rango de error se incrementa.

Procedimiento de limpieza de vidriería

Los materiales utilizados en el análisis de la DQO deben seguir un procedimiento de lavado de material con ácido sulfúrico a un 20%.

Procedimiento de elaboración de curva de calibración

Tabla 6
Especificaciones de la curva de calibración

DQO (ml/L)	Absorbancia

Procedimiento de análisis




- Añadir el volumen adecuado de muestra en un vial como se indica en la siguiente tabla.

Vial	Cantidad de Muestra
Estándar de 10ml	2,5

- Tapar y limpiar el exterior del vial.
- Agitar de 4 a 5 veces para homogenizar la muestra con la solución digestora.
- En el digestor previamente precalentado 150 °C, colocar lo viales por 120 min.
- Dejar enfriar la muestra dentro del digestor por un tiempo aproximado de 20 min.
- Retirar del digestor, colocar en una gradilla y dejar enfriar a temperatura ambiente.
- Medir el vial en el colorímetro previamente calibrado para un rango de 20 – 800 mg/L.

Anexos

Anexo 1 Reactivos, materiales y equipos

Viales	Materiales	Equipos
		

MEDICIÓN DE FÓSFORO TOTAL POR EL MÉTODO ESPECTROFOTOMÉTRICO DEL ÁCIDO VANADOMOLIBDOFOSFÓRICO

Objetivos

- Determinar la concentración de fósforo total por el método espectrofotométrico del ácido vanadomolibdofosfórico
- Graficar la curva de calibración: concentración vs absorbancia

Principio

En una solución diluida de ortofosfatos, el molibdato de amonio reacciona bajo condiciones ácidas para formar ácido molibdofosfórico. En presencia de vanadato, se forma el ácido vanadomolibdofosfórico de color amarillo. La intensidad del color amarillo es proporcional a la concentración de fosfatos.

Preparación de la muestra

Reactivos

- Indicador fenolftaleína en solución acuosa
- Ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 30%
- Añadir cuidadosamente 300 mL de H_2SO_4 concentrado en aproximadamente 600 mL de agua destilada y diluir a 1 L con agua destilada.
- Persulfato de amonio ($(NH_4)_2S_2O_8$)
- Hidróxido de sodio (NaOH) 1N
- Procedimiento
- Tomar 50 mL de muestra previamente agitada y añadir 1 mL de H_2SO_4 al 30% y 0,4 g de $(NH_4)_2S_2O_8$.
- Calentar por aproximadamente 30 minutos o hasta llegar a un volumen final de 10 mL.
- Dejar enfriar y diluir la muestra hasta 30 mL con agua destilada.
- Añadir 1 gota de indicador fenolftaleína en solución y neutralizar con NaOH hasta llegar a un color rosa.

- Posteriormente, completar hasta los 100 mL con agua destilada. En algunas muestras se puede formar precipitado en esta etapa, pero no se debe filtrar.

Materiales

- Micropipetas aforadas de 1 mL.
- Un (1) vaso de precipitados de 1000 mL.
- Una (1) varilla de vidrio.
- Una (1) probeta de 100 mL.
- Dos (2) celdas de vidrio (para trabajar con el espectrofotómetro).
- Vasos precipitados de 100 mL. La cantidad varía de acuerdo con el número de análisis que se vaya a realizar.
- Luna de reloj.
- Aparatos
- Espectro fotómetro, longitud de onda de 400 a 490 nm.
- Plancha eléctrica
- Balanza analítica

Toma y preservación de muestras

En el caso de que solo se requiera medir fósforo total, añadir H₂SO₄ o HCL hasta llegar a un pH < 2 y refrigerar a 4 °C, o congelar sin realizar ninguna adición. No almacenar muestras con bajas concentraciones de fósforo en botellas de plástico a menos que se congele porque los fosfatos se pueden absorber en las paredes de las botellas de plástico. Nunca use detergentes comerciales para el lavado de los materiales que contengan las muestras.

Procedimiento de preparación de estándares

Para la preparación de la solución madre de fosfato, se debe pesar aproximadamente 219,5 mg de fosfato monobásico de potasio anhidro (KH₂PO₄) previamente secado a 105 °C durante dos horas, aforar con agua a 1 L; cuya concentración es 50 mg/L de P como PO₄³⁻.

Tabla 7

Especificaciones de preparación de estándares de calibración y de control.

Estándar de calibración y/o control (mg P/L)	Alícuota de estándar de 50 mg P / L (mL)	Volumen de estándar preparado (mL)
0,25	0,25	50
0,5	0,5	50
1,0	1,0	50
2,0	2,0	50
4,0	4,0	50

Procedimiento de análisis

Reactivos

Indicador de fenolftaleína en solución

- Ácido clorhídrico (1:1)
- Disolución A: pesar aproximadamente y con precisión 25,0 g de heptamolibdato de amonio y diluir en 300 mL de agua.
- Disolución B: pesar aproximadamente y con precisión 1,25 g de metavanadato de amonio y diluir en 300 mL de agua destilada, calentar hasta ebullición. Enfriar y añadir 330 mL de ácido clorhídrico concentrado. Dejar enfriar a temperatura ambiente.
- Disolución reactiva vanado-molibdato: Adicionar la disolución A a la disolución B, mezclar y aforar a 1 L.
- Disolución de hidróxido de sodio (1N)

Procedimiento

- Si el pH de la muestra es mayor a 10, añadir una gota de indicador de fenolftaleína a la muestra de 50 mL y disminuya el color rojo con 1+1 HCL antes de diluir a 100 mL.

- Remoción del color de las muestras: Remover el exceso de color en las muestras por medio de la adición de 200 mg de carbón activado a una muestra de 50 mL en un matraz Erlenmeyer y agitar por 5 min, posteriormente filtrar para remover el carbón activado.
- Viera 35 mL de la muestra en un recipiente de 50 mL. Añada 10 mL del reactivo vanadato-molibdato y diluya hasta la marca con agua destilada. Prepare un blanco en donde los 35 mL de la muestra se reemplacen por 35 mL de agua destilada.
- Luego de 10 minutos, medir la absorbancia de la muestra contra un blanco a una longitud de onda entre 400 a 490 nm, dependiendo de la sensibilidad deseada.
- Los intervalos de concentración para diferentes longitudes de onda son:

Intervalo de P mg/L	Longitud de onda nm
1,0 - 5,0	400
2,0 - 10	420
4,0 - 20	470

Cálculo de resultados

Calcular la concentración de la muestra por medio de la ecuación obtenida de la curva de calibración y que es representada por la siguiente ecuación:

$$y = mX + b$$

Donde:

m = pendiente

b = es la ordenada

y = es la absorbancia

x = es la concentración (mg P/ L)

En caso de haber dilución de la muestra a lo largo del desarrollo del método (digestión y alícuota de muestra), utilizar la siguiente ecuación:

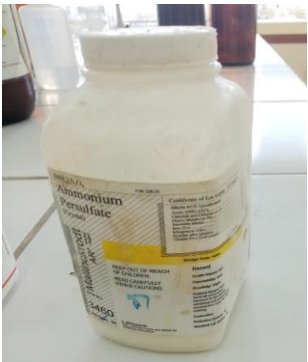
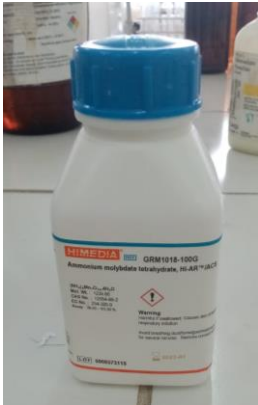
$$\frac{mg\ P}{L} = \text{concentración} \times \text{Factor de dilución}$$

Bibliografía

Standar Methods for the Examination of water and wastewater (23 ed.). (2017). Washington doi:10.2105/SMWW.2882.216

Anexos

Anexo 1 Reactivos empleados para la medición

Persulfato de amonio	Metavanadato de Amonio	Molibdato de Amonio tetrahidratado
		
Fosfato de potasio dihidrogenado	Ácido Sulfúrico concentrado	Ácido Clorídrico concentrado
		

Anexo 2 Equipos empleados para la medición

Espectrofotómetro	Plancha eléctrica	Campana de gases
 A black and blue spectrophotometer with a digital display and a keypad, sitting on a white surface.	 A black electric hot plate with a control knob and a power cord, sitting on a light-colored floor.	 A blue and white fume hood with a glass front and a control panel on top, mounted on a wall.