UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR

POSGRADOS

Maestría en

RECURSOS HÍDRICOS con mención en gestión e ingeniería de agua potable y saneamiento

RPC-SE-03-NO.041-2020

Opción de Titulación:

Artículos profesionales de alto nivel

Tema:

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE PROCESAMIENTOS CÁRNICOS MEDIANTE PROCESOS FISICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS CONVENCIONALES (LODOS ACTIVADOS) A ESCALA DE LABORATORIO

Autora:

PATRICIA MICHELLE HERRERA PAUCAR

Director:

RENATO GABRIEL SÁNCHEZ PROAÑO

QUITO -Ecuador

2024

Autora:

Patricia Michelle Herrera Paucar
Ingeniera Ambiental
Candidata a Magíster en Recursos Hídricos con Mención en Gestión e Ingeniería de Agua Potable y Saneamiento por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito.
pherrerap1@est.ups.edu.ec

Dirigido por:

Renato Gabriel Sánchez Proaño
Ingeniero Ambiental
Magíster en Economía Ecológica
Doctor en Salud Colectiva, Ambiente y Sociedad
rsanchezp@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS
2024 © Universidad Politécnica Salesiana.
Quito – ECUADOR -SUDAMÉRICA
Patricia Michelle Herrera Paucar.

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE PROCESAMIENTOS CÁRNICOS MEDIANTE PROCESOS FISICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS CONVENCIONALES (LODOS ACTIVADOS) A ESCALA DE LABORATORIO

Tratamiento de aguas residuales de procesamientos cárnicos mediante procesos fisicoquímicos y biológicos convencionales (lodos activados) a escala de laboratorio

Treatment of wastewater from meat processing using conventional physicochemical and biological processes (activated sludge) on a laboratory scale

RESUMEN

La industria cárnica es considerada una de las más contaminantes por la cantidad de residuos generados en sus procesos productivos: efluentes con elevada carga orgánica, altas concentraciones de sólidos, material coloidal, grasas, aceites y sangre.

El presente trabajo evalúa un sistema de tratamiento de aguas residuales en la industria cárnica, a través de procesos físico químicos y biológicos convencionales a escala de laboratorio, a fin de determinar la eficiencia de remoción de la carga orgánica medida en forma de DQO.

Para ello, se caracterizó el efluente y se aplicó un tratamiento primario de coagulación – floculación y un tratamiento secundario con lodos activados. Para el tratamiento físico - químico se analizó la eficiencia de tres coagulantes (Sulfato de Aluminio, Policloruro de Aluminio y Cloruro Férrico) a seis diferentes concentraciones cada uno. Para el tratamiento secundario se adicionó lodos activados a la muestra de agua previamente clarificada con el coagulante más eficiente y se midió la DQO durante 8 días para determinar el porcentaje de remoción.

Se concluye que, el pH inicial (7,96) está dentro de los rangos óptimos para la formación de coágulos, ya sea con el uso del Sulfato de Aluminio (5,5 a 8), Policloruro de Aluminio (4 a 8) o Cloruro Férrico (6,5 a 8,5), por lo que no es necesario su regulación. El Policloruro de Aluminio presentó mayor porcentaje de remoción de DQO con una eficiencia de 50,55% a una concentración de 0,01 mg/L, posterior al tratamiento de lodos activados se obtiene una eficiencia de remoción de DQO de 46,45% y el tratamiento propuesto en su totalidad, tanto con la aplicación

del coagulante PAC con la aplicación de lodos activados alcanza en total una eficiencia del 91,81% de remoción de DQO.

ABSTRACT

The meat industry is considered one of the most polluting industries due to the amount of waste generated in its production processes: effluents with a high organic load, high concentrations of solids, colloidal material, fats, oils and blood.

The present work evaluates a wastewater treatment system in the meat industry, through conventional physicochemical and biological processes on a laboratory scale, in order to determine the removal efficiency of the organic load measured in the form of COD.

To do this, the effluent was characterized and a primary coagulation-flocculation treatment and a secondary treatment with activated sludge were applied. For the physical-chemical treatment, the efficiency of three coagulants (Aluminum Sulfate, Polyaluminum Chloride and Ferric Chloride) at six different concentrations each was analyzed. For secondary treatment, activated sludge was added to the water sample previously clarified with the most efficient coagulant and the COD was measured for 8 days to determine the removal percentage.

It is concluded that the initial pH is within the optimal ranges for the formation of clots, so its regulation is not necessary. The Polyaluminum Chloride presented a higher percentage of COD removal with an efficiency of 50.55% at a concentration of 0.01 mg/L, for the biological treatment, an efficiency of 46.45% is obtained and the proposed treatment reaches a total efficiency of 91.81%.

Palabras claves

Coagulación - floculación, aireación de lodos activados, Sulfato de Aluminio, Policloruro de Aluminio, Cloruro Férrico

Keywords

Coagulation – flocculation, activated sludge aeration, Aluminum Sulfate, Aluminum Polychloride, Ferric Chloride

1. Introducción

Desde que surgió la especie humana, ha sido necesario satisfacer varias necesidades esenciales, entre las cuales destaca la alimentación. Antiguamente, los humanos dependían de la caza de animales para sobrevivir, pero enfrentaban el desafío de la descomposición de la carne (Arroyo, 2008).

El crecimiento poblacional, la urbanización y el desarrollo industrial han impulsado una mayor demanda de alimentos de origen animal Sánchez (2021). Esto conlleva a que, tanto el sector privado como púbico del ámbito agropecuario deben prepararse para este aumento global en la demanda de carne, implementando políticas e inversiones a largo plazo que satisfagan las necesidades de los consumidores, garantizando la salud alimentaria sin descuidar el cuidado del ambiente y el desarrollo sostenible (Hernández, 2005).

La producción y conservación de carne es una de las industrias significativas en la economía ecuatoriana, formando parte del aparato productivo del país. Según el Banco Central del Ecuador (BCE), esta industria ha mostrado un crecimiento constante a lo largo de los años, ocupando el puesto 20 entre 47 industrias a nivel nacional. En 2019, contribuyó con $1.176,5 millones de dólares (1,1% del PIB) y registró una tasa de crecimiento anual promedio de 11,4% entre 2007 y 2019 (Mayorga, 2022).

El sector ha formulado una serie de acciones y medidas contempladas dentro de la normativa ambiental vigente, destinadas al cumplimiento de parámetros bajo la descarga de efluentes en base a límites máximos permisibles dispuestos por los entes reguladores (Sánchez Proaño, 2021). Las empresas e industrias cárnicas buscan la manera de regirse y acatar los parámetros establecidos en normativa, con el objeto de evitar multas o sanciones en los procedimientos donde se ejecutan mecanismos de control y seguimiento (Valdez, 2019).

No obstante, dentro de las industrias agroalimentarias, la cárnica es considerada como una de las más contaminantes por los residuos generados en los procesos productivos (Rodríguez & Bermúdez, 2017). Sus actividades tienen un alto impacto ambiental debido a la producción de efluentes con alta carga orgánica, exceso de grasas y una considerable cantidad de residuos sólidos. Los vertimientos son mayoritariamente orgánicos y contribuyen significativamente a la

Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), sólidos, aceites y grasas. Estos contaminantes necesitan ser analizados para identificar los principales parámetros de vertimientos de interés sanitario y garantizar que las industrias cumplan con las normativas establecidas (Pérez, 2016).

Generalmente los efluentes industriales involucran en su depuración un pre tratamiento, tratamientos primarios y tratamientos secundarios, principalmente con sistemas físico-químicos debido a su eficiencia de remoción en cuanto a parámetros a cumplir bajo normativa, así como en su beneficio operacional (Miño, 2014).

El tratamiento adecuado de las aguas residuales en la industria cárnica implica un pre tratamiento para eliminar sólidos mediante rejillas, seguido de un tratamiento primario que puede involucrar métodos físico-químicos o tratamientos aeróbicos y anaeróbicos, y finalmente, un tratamiento secundario o biológico utilizando reactores secuenciados (Grupo Vento, 2018).

Para el tratamiento fisicoquímico, el uso de polímeros como ayudantes de coagulación y floculación, es una práctica común en plantas de tratamiento de agua (Laines et al., 2008) . Los coagulantes suelen ser productos químicos que en solución aportan carga eléctrica contraria a la del coloide. Habitualmente se utilizan sales con cationes de alta relación carga/masa (Fe_{3+}, Al_{3+}) junto con polielectrolitos orgánicos, cuyo objetivo también debe ser favorecer la floculación (Rodríguez, 2006). El proceso de coagulación consiste en la desestabilización y posterior adición de particular en suspensión coloidal presentes en el agua, con la finalidad de efectuar el espesado o decantación para la separación de partículas. Dicha desestabilización se obtiene al neutralizar cargas eléctricas, dejando el actuar de las fuerzas de repulsión hasta la anulación del potencial Zeta y la agregación de coloides (Salazar Peralta et al., 2022).

La floculación es la aglomeración de los coágulos producidos mediante la coagulación, con el objeto de aumentar su volumen y peso para la accesibilidad en la flotación. Mediante esta etapa se capturan las partículas neutralizadas por los floculantes de origen mayor orgánico (Metcalf y Eddy, 2003). Los coagulantes y floculantes típicos incluyen polímeros orgánicos naturales y sintéticos, sales de metales como el Alumbre o el Sulfato Férrico, y metales pres hidrolizados como el Cloruro de Poli aluminio y Cloruro Férrico (Metcalf y Eddy, 2003).

Respecto al tratamiento secundario con lodos activados, consiste en la depuración biológica de las aguas residuales a través de microorganismos para metabolizar y convertir la materia orgánica en suspensión y ya disuelta, en tejido celular nuevo y diferentes gases (Metcalf y Eddy, 1995). No obstante, previo a la depuración de efluentes mediante tratamientos biológicos, resulta importante calcular el índice de biodegradabilidad para conocer si el agua residual que se genera en el proceso es biodegradable e identificar el tratamiento más óptimo (Norma Cubana 27, 2012).

El índice de biodegradabilidad se entiende como la relación DBO_5/DQO, donde si DBO_5/DQO >0,4 el efluente es muy biodegradable, si 0,2≤ DBO_5/DQO < 0,4 el agua residual es medianamente biodegradable y si DBO_5/DQO <0,2 es poco biodegradable o no es biodegradable (Delafuent, Vives, Mestre y Morató, 1995).

La industria cárnica agrupa tanto a los mataderos y salas de despiece como a empresas de procesamiento de productos elaborados. Los primeros producen canales y piezas de carne para su consumo y la industria de elaborados abastece de productos cárnicos transformados, como embutidos, jamón, salchichas. Los efluentes son muy diferentes en función del proceso productivo, la generación de aguas residuales en mataderos es considerable y con una elevada carga orgánica, mientras que en la producción de elaborados es más homogénea y constante en el tiempo (Tuset, s.f.).

Por lo tanto, es necesario detallar y caracterizar el proceso productivo de la industria, con la finalidad de determinar dónde y qué tipo de residuos se generan y así, implementar una propuesta de tratamiento del agua que abarque tanto el pre tratamiento, el tratamiento primario y secundario (Sánchez, 2023).

Con base a lo expuesto, el presente proyecto tiene como objetivo evaluar la eficiencia de tratamientos fisicoquímicos y biológicos convencionales en aguas residuales procedentes del procesamiento de cárnicos, mediante la adición de varios coagulantes y tratamiento de lodos activados.

2. Materiales y Métodos

2.1 Recolección de muestras

Las muestras de agua residual utilizadas para la presente investigación, fueron recolectadas de una empresa de procesamiento de cárnicos, ubicada en el cantón Quito, provincia Pichincha.

El muestreo tuvo una frecuencia de tres veces por semana y un volumen de 20 L, siguiendo las técnicas y precauciones de manejo, conservación y transporte, descritas en la NTE INEN 2169:2013.

2.2 Pre tratamiento y caracterización de la muestra

Previa caracterización de la muestra, los efluentes recolectados pasaron por un sistema tipo cribado mediante un tamiz de laboratorio con la finalidad de remover sólidos.

La caracterización del efluente se basó en parámetros físicos, químicos y biológicos llevados a escala de laboratorio. Los parámetros y métodos utilizados para la caracterización del efluente se mencionan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de caracterización del agua residual

PARÁMETRO	UNIDAD	MÉTODO	EQUIPO
Potencial Hidrógeno	U pH	Instrumental	Multiparámetro de campo
Conductividad eléctrica	uS/cm	Instrumental	Multiparámetro de campo
Temperatura	°C	Instrumental	Multiparámetro de campo
Sólidos suspendidos	mg/L	APHA 2540D	Equipo de filtración al vacío Estufa Desecador
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	APHA 5220D	Digestor Espectrofotómetro
Demanda Bioquímica de Oxígeno	mg/L	Titulación	Incubadora Medidor de Oxígeno Disuelto Agitador magnético Balanza analítica
Oxígeno Disuelto	mg/L	Winkler	

Elaborado por: Herrera, 2024.

2.3 Tratamiento primario (coagulación-floculación)

Para llevar a cabo el tratamiento por coagulación-floculación, se determinó la concentración óptima mediante el ensayo de prueba de jarras. Este método simula los procesos de coagulación y floculación a nivel de laboratorio, permitiendo tratar el agua mediante la separación por decantación de los flóculos formados (Suárez & Trujillo, 2011).

Los coagulantes empleados fueron: Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$, Policloruro de Aluminio (PAC) $Al_2(OH)_3Cl$, Cloruro Férrico $FeCl_3$, los cuales se agregaron en 1000 mL de agua residual, diferentes cantidades de coagulante.

Tabla 2. Concentración de coagulantes utilizados

MUESTRA	COAGULANTE APLICADO		
	Sulfato de Aluminio $Al_2(SO_4)_3$	**Policloruro de Aluminio (PAC) $Al_2(OH)_3Cl$**	**Cloruro Férrico $FeCl_3$**
	g/L	**g/L**	**g/L**
M1	0,01	0,01	0,01
M2	0,05	0,05	0,025
M3	0,1	0,1	0,05
M4	0,25	0,25	0,1
M5	0,5	0,5	0,25
M6	1	1	0,5

Elaborado por: Herrera, 2024.

Se homogenizó la muestra por 1 minuto a 100 rpm, posteriormente a 20 rpm por un lapso de 5 minutos y finalmente, se dejó sedimentar por 30 minutos. Se midió el pH y turbidez de todas las muestras y se seleccionó al de menor turbidez para determinar la DQO.

Se consideraron dos parámetros de control: la turbidez y el pH. La turbidez está relacionada con los sólidos suspendidos. Indica la claridad del efluente por efecto que produce el material suspendido, al reducir el paso de la luz a través de ella, por lo tanto, a menor turbidez, menor cantidad de sólidos suspendidos (Marín & Arriojas, 2020).

El pH también se monitorea porque, según el coagulante utilizado, existe un valor específico de pH que optimiza la formación de coágulos y flóculos en un tiempo mínimo (Barajas & León, 2016).

2.4 Tratamiento secundario (lodos activados)

El tratamiento de aguas residuales con lodos activados es un método biológico aerobio en suspensión. Su nombre se debe a la producción de una masa de microorganismos activados en mezcla con el agua residual en la que, por medio de la aireación, absorben el oxígeno y consumen la materia orgánica y el líquido obtenido es redirigido a un tanque de sedimentación (Castillo Reinoso et al., 2020).

Por lo tanto, del proceso físico-químico realizado previamente, se determinó la dosificación de coagulante con mayor eficiencia en la reducción de la DQO. Al agua clarificada resultante de este proceso (4 L) libre de sedimentos se le añadió 1 L de lodos activados procedentes de un camal de faenamiento y se procedió a airear por 5 minutos.

Posteriormente, se colocó 1 L de muestra aireada en un cono Imhoff por un lapso de 1 hora, y se determinó la cantidad de sólidos sedimentables y en la sección clarificada, se realizó una nueva medición de DQO y se continúa con la aireación al agua clarificada durante 8 días.

2.5 Metodología para análisis estadístico

Para el procesamiento de los datos se utiliza el Método de Análisis propuesto por Romero (2004), empleado para un número de datos (n) menor a 20.

Para ello se tabulan los datos en tres columnas.

- En la primera columna se coloca el número de orden de cada dato (m), o número de posición dentro de la serie ascendente de los datos, comenzando con el número 1.
- En la segunda columna se ordenan los datos, en orden ascendente de magnitud.
- En la columna tres se calcula la frecuencia, probabilidad o porcentaje de ocurrencia del dato correspondiente, según la fórmula:

$$f = \frac{(m-0{,}5)100}{n} \quad (1)$$

Donde:

F= Frecuencia

m= Número de posición del dato

n= Número de datos proporcionados

- Se realiza la recta de Henry sobre el papel normal de probabilidad, para graficar se toma el valor observado contra la probabilidad o frecuencia y se hace una regresión lineal de los datos mediante ajuste por mínimos cuadrados. Se puede aplicar parámetros estadísticos si los datos son ajustables a una recta con una buena correlación entonces la distribución es normal.
- Se determina las características estadísticas de los datos, de acuerdo con la correlación obtenida.

3. Resultados y Discusión

3.1 Caracterización de la muestra

Tabla 3. Resultados de la caracterización del agua residual

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD
Potencial Hidrógeno	7,96	U pH
Conductividad eléctrica	801	uS/cm
Temperatura	16,1	°C
Turbidez	1000	NTU
Sólidos suspendidos	583	mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	1551	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)	1104	mg/L
Oxígeno Disuelto	0,08	mg/L

Elaborado por: Herrera, 2024.

En la Tabla 3 se detallan los valores de la caracterización física y química del efluente recolectado de la industria cárnica. El agua residual tiene alta carga orgánica y pH básico.

Dependiendo del coagulante que se use, hay un valor específico de pH que maximiza la formación de coágulos y flóculos en el menor tiempo posible (Barajas & León, 2016). El pH básico del agua residual se encuentra dentro del rango óptimo para aplicar los tres coagulantes, teniendo en cuenta que, el Sulfato de Aluminio tiene un pH óptimo de 5,5 – 8 (Bedoya & Giraldo, 2012), el Policloruro de Aluminio entre 4 – 8 Vásquez (2023) y el Cloruro Férrico de 6,5 a 8,5

(Navarro, 2012).

El índice de biodegradabilidad del efluente (DBO_5/DQO) de 0,7 indica que, el agua residual es muy biodegradable, valor similar a lo analizado por García (2014), quien analizó un sistema de tratamiento para efluentes de la industria de embutidos por procesos físico químicos y biológicos, y obtuvo una relación de DBO_5/DQO aproximado a 0.5-0.6, lo cual indica que gran parte (60%) de la materia orgánica presente en los vertidos de la industria de embutidos es materia orgánica biodegradable.

Los resultados obtenidos en cuanto al parámetro de DQO (1551 mg/l) y DBO_5 (1104 mg/l) son similares a los valores reportados por Gascón (2006) correspondiente a 2500 mg/l y 1200 mg/l, respectivamente, quien estudió estrategias para la minimización de nitrógeno y fósforo en una planta de tratamiento de aguas residuales de una planta de embutidos.

3.2 Resultados de tratamiento primario (coagulación - floculación)

En la Tabla 4 se detalla los valores de turbidez y pH de las muestras tratadas con diferentes concentraciones de coagulantes. Las muestras con los coagulantes Policloruro de Aluminio y Cloruro Férrico, con menor turbidez comparten un pH cercano a la neutralidad (pH=7). Sin embargo, la muestra con Sulfato de Aluminio de menor turbidez tiene un pH ácido.

Los coagulantes inorgánicos más comunes usados en el tratamiento de efluentes son compuestos de Aluminio o Hierro. Después de agregarlos al agua residual, reaccionan con la alcalinidad y se hidratan, formando precipitados de hidróxido metálico y funcionando mediante un mecanismo de floculación por barrido (Huerta, 2022). Estos coagulantes, al ser sales ácidas, disminuyen el pH del agua cruda (Cogollo, 2010). Por tanto, los valores obtenidos en la presente investigación, concuerda con lo mencionado anteriormente, el pH inicial del agua residual fue de 7,96 y para las muestras de los tres coagulantes empleados, independientemente de las concentraciones analizadas, el pH disminuyó.

Tabla 4. Medición de pH y turbidez en muestras con adición de coagulante

MUESTRA	COAGULANTE APLICADO								
	Sulfato de Aluminio			Policloruro de Aluminio (PAC)			Cloruro Férrico		
	pH	Turbidez	Eficiencia de remoción de turbidez (%)	pH	Turbidez	Eficiencia de remoción de turbidez (%)	pH	Turbidez	Eficiencia de remoción de turbidez (%)
M1	7,82	535	46,5%	**6,96**	**9,8**	**99%**	7,28	310	69%
M2	7,44	463	53,7%	4,8	218	78,2%	7,1	289	71,1%
M3	7,12	449	55,1%	4,76	220	78%	6,85	161	83,9%
M4	6,73	234	76,6%	4,48	178	82,2%	**6,58**	**17,9**	**98,2%**
M5	5,69	8,25	99,2%	4,4	136	86,4%	5,25	153	84,7%
M6	**4,52**	**4,28**	**99,6%**	4,36	112	88,8%	3,76	196	80,4%

Elaborado por: Herrera, 2024.

En la tabla 4 se muestra el porcentaje de remoción de turbidez. Durante el proceso se realizó pruebas en 6 muestras a diferentes concentraciones de coagulantes, obteniendo como resultado con el Sulfato de Aluminio en la muestra número 6 un 99,6% de remoción en turbidez, mientras que con el Policloruro de Aluminio (PAC), la muestra número 1 presentó mayor porcentaje de remoción del 99%. Con el Cloruro Férrico el mayor porcentaje de remoción ocurrió en la muestra número 4 al alcanzar el 98,2%.

Se evidenció que los 3 coagulantes a diferentes concentraciones presentaron elevados porcentajes de remoción de turbidez, por lo que fue necesario en las muestras con mayor porcentaje analizar la remoción de DQO para finalmente determinar cuál es el mejor coagulante para los efluentes procedentes de industrias de procesamientos cárnicos.

3.3 Análisis estadístico

Se utilizó los datos obtenidos de cada muestra a diferentes concentraciones de coagulantes, para determinar la media aritmética, geométrica y desviación estándar.

3.3.1 Sulfato de Aluminio

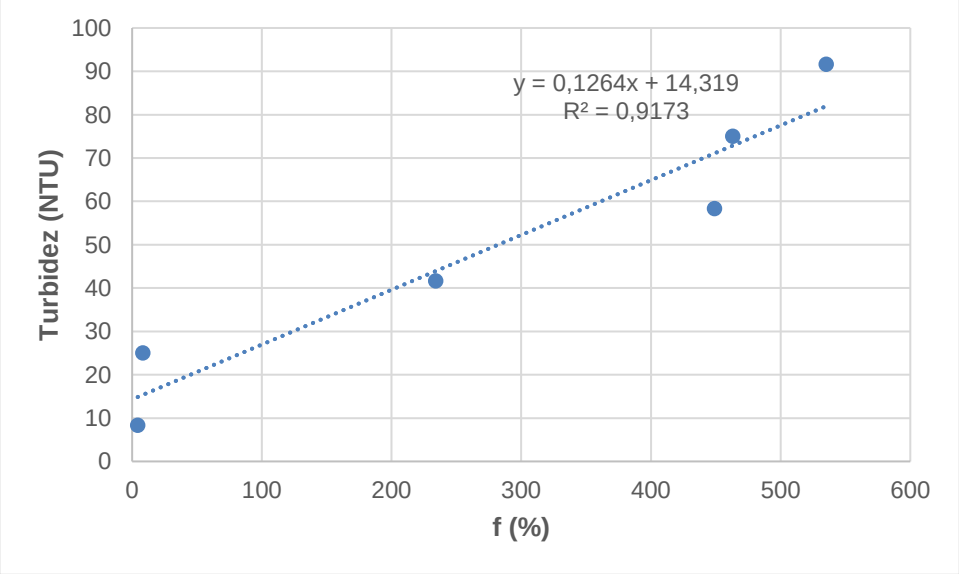
Tabla 5. Análisis estadístico de la turbidez para el coagulante Sulfato de Aluminio

M	Turbidez (NTU)	Frecuencia, f (%)
1	535	8,33
2	463	25,00
3	449	41,67
4	234	58,33
5	8,25	75,00
6	4,28	91,67

Elaborado por: Herrera, 2024.

Los datos de la Tabla 5 presentan una distribución Log normal, es decir, que los valores de turbidez y concentración de coagulante aplicado, se ajustan mejor a una distribución normal logarítmica de una variable aleatoria. En la Figura 1 se muestra la tendencia de los resultados.

Figura 1. Gráfica de probabilidad de turbidez para el coagulante Sulfato de Aluminio



Elaborado por: Herrera, 2024.

Se observa en la Figura 1, un R^2= de 0,9173 indicando que el modelo se ajustó a los datos, ya que según (Martínez, 2005), al obtener un R^2 = 1 significa un ajuste lineal perfecto.

Tabla 6. Valores estadísticos de la turbidez para la selección de la muestra con coagulante Sulfato de Aluminio

	Valor (NTU)
Media aritmética	282,26
Media geométrica	2,63
Desviación estándar	236,23

Elaborado por: Herrera, 2024.

La muestra con mayor eficiencia de remoción de turbidez es la muestra con el valor más cercano a la media geométrica, es decir, la muestra 6 con un valor de 4,28 NTU. Se corrobora esta información con los resultados presentados en la Tabla 4, en donde se observa que la muestra 6 es la que cuenta con mayor eficiencia de remoción de turbidez con un valor de 99,6%.

3.3.2 Policloruro de Aluminio

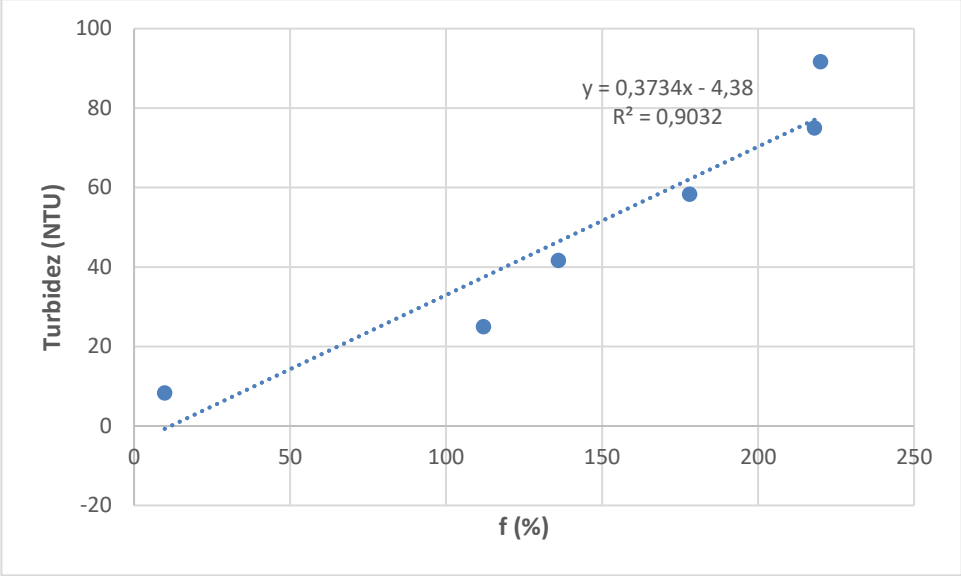
Tabla 7. Análisis estadístico de la turbidez para el coagulante Policloruro de Aluminio

m	Turbidez (NTU)	Frecuencia, f (%)
1	9,8	8,33
2	112	25,00
3	136	41,67
4	178	58,33
5	218	75,00
6	220	91,67

Elaborado por: Herrera, 2024.

La Tabla 7, presenta una distribución normal logarítmica, por lo tanto, el promedio geométrico se relaciona mejor con el promedio estadístico como indica Romero (2002).

Figura 2. Gráfica de probabilidad de turbidez para el coagulante Policloruro de Aluminio



Elaborado por: Herrera, 2024.

En la Figura 2 se observa un R^2= de 0,9032 indicando que el modelo se ajustó a los datos, por lo tanto, el valor de turbidez más cercano a la media geométrica es aquella que presenta mayor porcentaje de remoción.

Tabla 8. Valores estadísticos de la turbidez para la selección de la muestra con coagulante Policloruro de Aluminio

	Valor (NTU)
Media aritmética	145,63
Media geométrica	1,86
Desviación estándar	79,36

Elaborado por: Herrera, 2024.

La muestra con mayor eficiencia de remoción de turbidez es la muestra 1 con un valor de 9,8 NTU como se describe en la Tabla 4, en donde se corroborar, que es la muestra con mayor porcentaje de remoción de turbidez con un valor de 99%.

3.3.3 Cloruro Férrico

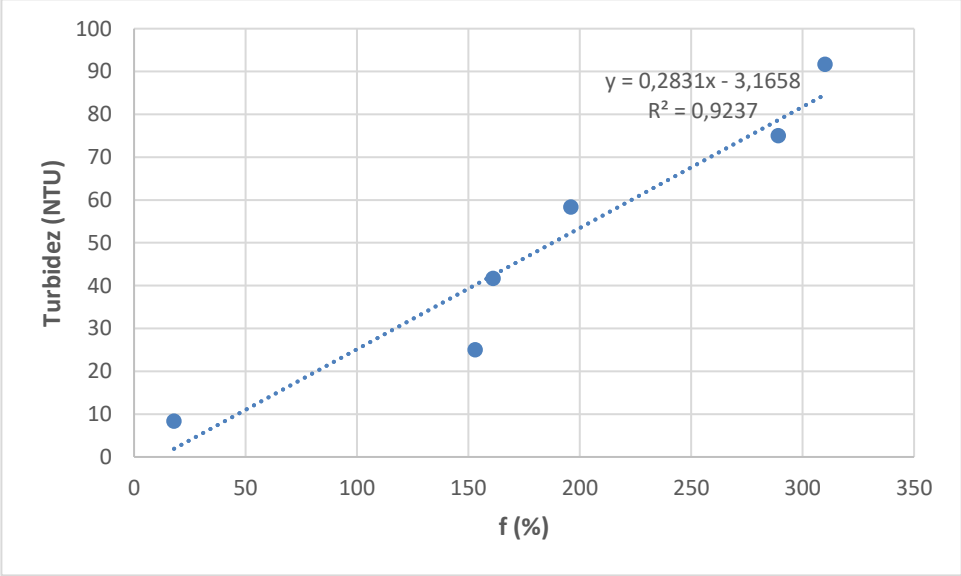
Tabla 9. Análisis estadístico de la turbidez para el coagulante Cloruro Férrico

m	Turbidez (NTU)	Frecuencia, f (%)
1	17,9	8,33
2	153	25,00
3	161	41,67
4	196	58,33
5	289	75,00
6	310	91,67

Elaborado por: Herrera, 2024.

Al igual que en el caso de los otros coagulantes (Sulfato de Aluminio y Policloruro de Aluminio), el coagulante Cloruro Férrico presenta una distribución logarítmica normal. En la figura 3 se muestra la gráfica para los datos analizados.

Figura 3. Gráfica de probabilidad de turbidez para el coagulante Cloruro Férrico



Elaborado por: Herrera, 2024.

Al analizar los datos mediante la figura 3 se obtuvo un R^2= de 0,9237 indicando que el modelo se ajustó a los datos.

Tabla 10. Valores estadísticos de la turbidez para la selección de la muestra con coagulante Cloruro Férrico

	Valor (NTU)
Media aritmética	187,82
Media geométrica	1,77
Desviación estándar	105,86

Elaborado por: Herrera, 2024.

La muestra 4 con un valor de turbidez de 17,9 NTU, como se detalla en la Tabla 4, es aquella con mayor eficiencia de remoción con un valor de 98,2%. Se corrobora la información debido a que tiene el valor más cercano a la media geométrica.

Después de haber realizado la prueba de jarras con los tres coagulantes, y determinado las muestras con mayor porcentaje de remoción de turbidez, se analizó la DQO para conocer la muestra con mayor biodegradabilidad y óptima para la siguiente etapa del tratamiento propuesto.

Tabla 11. Medición de DQO en muestras con menor turbidez

PARAMETRO	**SULFATO DE ALUMINIO**	**POLICLORURO DE ALUMINIO**	**CLORURO FÉRRICO**
Concentración	1 g/L	0,01 g/L	0,1 g/L
Turbidez inicial	1000 NTU		
Turbidez final	4,28	9,8	17,9
Eficiencia de remoción de Turbidez (%)	99,6%	99%	98,2%
DQO inicial	1551 mg/L		
DQO final	1422 mg/L	767 mg/L	1362 mg/L
Eficiencia de remoción de DQO (%)	8,32%	50,55%	12,19%

Elaborado por: Herrera, 2024.

Con base a lo detallado en la Tabla 11, se observa que la muestra con adición del Policloruro de Aluminio, presentó el 99% de eficiencia de remoción de turbidez y 50,55% de eficiencia de

remoción de DQO, logrando una reducción de 1000 NTU a 9,8 NTU y de 1551 mg/L a 767 mg/L, respectivamente. A pesar de que el Sulfato de Aluminio presentó la mayor eficiencia en remoción de turbidez, tras realizar el análisis de la DQO presentó únicamente un 8,3% de remoción, a diferencia del Policloruro de Aluminio (PAC) que logró un mayor porcentaje de remoción posterior al análisis de DQO, demostrando su viabilidad para el tratamiento de efluentes de la industrias de procesamientos cárnicos. Debido a que, en concentraciones pequeñas logra la neutralización de las cargas eléctricas presentes en los coloides hasta alcanzar el punto isoeléctrico como lo menciona Acosta (2006), de tal forma que, suma la eficacia en cuanto a la disminución del valor de DQO.

El PAC al ser la muestra con menor cantidad de coagulante agregado y mayor eficiencia de remoción de DQO, se la escoge para ser aplicado en el siguiente tratamiento con lodos activados. Baiza, Martínez, Zeledón y Rivas (2017) en su investigación sobre el tratamiento de un efluente de una industria de embutidos con PAC como coagulante, obtuvo resultados de remoción de 1116 mg/L a 536 mg/L, alcanzando una eficiencia de 54,42%, valor que se asemeja al alcanzado en este trabajo.

3.4 Resultados de tratamiento secundario (lodos activados)

Tabla 12. Medición de DQO en efluente tratado con lodos activados, previo tratamiento físico - químico con Policloruro de Aluminio

TRATAMIENTO CON LODOS ACTIVADOS	DQO INICIAL (mg/L)	DQO FINAL (mg/L)	EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO (%)
Día 1	767	537	29,99
Día 2	537	472	12,10
Día 3	472	410	13,14
Día 8	767	127	83,44

Elaborado por: Herrera, 2024.

En la Tabla 12 se puede visualizar que la eficiencia de remoción de DQO mediante el tratamiento de lodos activados, en el primer día es de 29,99%. Al tercer día el porcentaje de remoción se

mantiene constante en promedio con 13, 14% de eficiencia. No obstante, la muestra en contacto con los lodos activados y aireación constante, al octavo día, obtuvo un valor de DQO de 127 mg/L, alcanzando un mayor porcentaje de remoción de 83,44%.

(García, 2014), reporta un porcentaje de remoción de 89,3% para DQO con lodos activos en su investigación sobre el tratamiento de agua residual de una industria de embutidos. El valor reportado se asemeja al valor alcanzado en esta investigación.

Para la gráfica de la curva se requiere un mínimo de 3 puntos, con la que se puede conocer una tendencia de disminución de la carga mediante un tratamiento de degradación biológica, se optó por medir la DQO al 8vo día con la finalidad de obtener una ecuación más precisa.

Tabla 13. Eficiencia de remoción de DQO en aguas residuales de una industria cárnica, previo tratamiento físico - químico y biológico.

PROCESO	DQO INICIAL (mg/L)	DQO FINAL (mg/L)	EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO (%)
Tratamiento físico – químico con adición de Policloruro de Aluminio con concentración 0,01 g/L	1551	767	50,55
Tratamiento biológico con lodos activados durante 8 días	767	127	83,44
Eficiencia total del proceso (%)		**91,81**	

Elaborado por: Herrera, 2024.

La depuración del efluente, tanto con la aplicación del tratamiento físico - químico como el tratamiento biológico, obtuvo una eficiencia total de 91,81% de remoción de la DQO.

Baiza, Martínez, Zeledón y Rivas (2017)en su investigación sobre el tratamiento de efluentes de una industria alimenticia de embutido, mostró un porcentaje de remoción del Policloruro de Aluminio (PAC) para DQO de 54.42%, valor similar al detallado en la Tabla 13.

Por su parte, García (2014), reporta un porcentaje de remoción de 89,3% para DQO con lodos activos para el tratamiento de agua residual de la industria de embutidos. El valor reportado se

asemeja al valor de 83,44% de remoción alcanzado durante 8 días en esta investigación.

3.5 Factibilidad económica

- **Costo de tratamiento fisicoquímico**

Concentración óptima de Policloruro de Aluminio= 0,01 g/L

Costo de Policloruro de Aluminio= $0,68 /kg

$$\frac{0{,}01\ \mathrm{g}}{\mathrm{l}} * \frac{\$0{,}68}{1000\ \mathrm{g}} * \frac{1000\ \mathrm{l}}{1\ \mathrm{m3}} = \$0{,}0068/\mathrm{m3}$$

El tratamiento fisicoquímico de 1 m^3 de agua tendría un costo de $0,0068.

- **Costo de tratamiento biológico**

Potencia de blower = 2 HP/m^3

$$\frac{2\ \mathrm{HP}}{1\mathrm{m3}} * \frac{0{,}7457\ \mathrm{kw}}{1\ \mathrm{hp}} * \frac{\$0{,}09}{1\ \mathrm{kw} * \mathrm{h}} * 8\ \mathrm{h} = \$1{,}075/\mathrm{m3}$$

El tratamiento biológico de 1 m^3 de agua tendría un costo de $1,075.

- **Costo de operación total**

$$\$0{,}0068 + \ \$1{,}075 = \$1{,}082.$$

El tratamiento propuesto en esta investigación tendría un costo de operación de $1,082 por m^3 de agua tratada. Cabe recalcar que, existen diferentes tipos de costos: operación, mantenimiento de equipos, capital, mano de obra, no obstante, el precio concluido es solamente de operación, teniendo en cuenta un tratamiento primario de coagulación-floculación de $0,0068 y un tratamiento secundario de aireación de $1,075 por cada m^3 tratado.

En resumen, el costo de operación para el tratamiento del agua en esta investigación se establece en $1,082 por m^3 de agua tratada. Es importante destacar que este valor representa únicamente los costos de operación, excluyendo otros componentes financieros como el mantenimiento de equipos, el capital y la mano de obra. El tratamiento propuesto incluye un proceso primario de coagulación-floculación, cuyo costo es significativamente bajo, y un tratamiento secundario de aireación, que representa la mayor parte del costo total. Estos resultados proporcionan una base económica clara para evaluar la viabilidad financiera del

tratamiento de agua propuesto, y subrayan la importancia de considerar los distintos tipos de costos involucrados en el proceso para una gestión eficiente.

En las industrias alimenticias el consumo de agua para el proceso productivo es significativo, generando caudales extremadamente altos de agua, lo que resulta viable el proceso ya que significaría un menor costo de tratamiento comparado a la entrega del agua residual a gestores. El costo operativo propuesto en este análisis, que incluye un tratamiento secundario de aireación, es particularmente competitivo cuando se escala a niveles industriales. En una operación a gran escala, el costo por m^3 tiende a reducirse aún más debido a la eficiencia lograda por el volumen de tratamiento. Esto es especialmente relevante para las industrias alimenticias, donde los caudales elevados permiten aprovechar al máximo la capacidad del sistema de tratamiento biológico, optimizando el costo-beneficio.

Además, los tratamientos biológicos son ampliamente reconocidos por su efectividad en la degradación de materia orgánica y su capacidad de cumplir con las normativas ambientales vigentes.

Así pues, el tratamiento biológico del agua residual a un costo de $1,075 por m^3 en escala industrial no solo representa una opción económica para las industrias alimenticias, sino también una estrategia sostenible que favorece la gestión eficiente de los recursos hídricos y el cumplimiento normativo.

4. Conclusiones

La caracterización del agua residual a tratar de la industria cárnica mostró que el pH del efluente es de 7,96 y contiene alta carga orgánica con un valor de DQO de 1551 mg/L, sobrepasando los límites máximos permisibles para descargas al alcantarillado.

El pH del efluente está dentro de los rangos óptimos para la formación de coágulos tanto para el Sulfato de Aluminio (5,5 a 8), Policloruro de Aluminio (4 a 8) y Cloruro Férrico (6,5 a 8,5), por lo que no es necesario la regulación de este parámetro antes de iniciar el tratamiento físico – químico, permitiendo reducir costos de operatividad.

De los tres coagulantes empleados para el tratamiento físico químico del agua residual, el Policloruro de Aluminio presentó mayor porcentaje de remoción de DQO con una eficiencia de

50,55% a una concentración de 0,01 mg/L.

El tratamiento biológico con lodos activados presenta una eficiencia de remoción de DQO de 83,44% a los 8 días.

La eficiencia total para la reducción de DQO, a través del tratamiento propuesto (coagulación - floculación y biológico con lodos activados) alcanza un porcentaje de 91,81%, a los 8 días.

Referencias

Acosta, L. (2006). *Estado del Arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación*. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002

Arroyo, P. (2008). La alimentación en la evolución del hombre: su relación con el riesgo de enfermedades crónico degenerativas. *Bol Med Hosp Infant Mex*, *65*(6).

Baiza, R., Martínez, V., Zeledón, H., & Rivas, L. (2017). *Estudio experimental de la electrocoagulación y diseño preliminar de una planta piloto*. http://repositorio.uca.edu.sv/jspui/bitstream/11674/6205/1/Revista%20CONIA2016_137-154.pdf

Barajas, C., & León, A. (2016). *Determinación de la dosis óptima de Sulfato de Aluminio (Al2(SO4)3 18h2O) en el proceso de coagulación - floculación para el tratamiento de agua potable por medio del uso de una red neuronal artificial [Tesis de Pregrado, Universidad Santo Tomas].* https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2916/Barajasclaudia2015.pdf

Bedoya, D., & Giraldo, M. (2012). *Determinación de las dosis óptimas del coagulante Sulfato de Aluminio granulado tipo b en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana [Tesis de Pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira].* https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/2b18eb4d-a5ff-45a1-9f33-79beba866dcc/content

Castillo Reinoso, A. M., Criollo Quizphi, E. C., & Oñate Oñate, M. P. (2020). Diseño e implementación de una PTAR por lodos activos a escala de laboratorio, Facultad de Ciencias Espoch. *Ciencia Digital*, *4*(1), 385–406. https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v4i1.1119

Cogollo, J. (2010). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del Hidroxicloruro de Aluminio. *DYNA*, *78*(165), 18–27. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011000100002&lng=e&nrm=iso&tlng=

Delafuent-García AC, Vives-Vidal M, Mestre-Marcé M, Morató-Matas C. Depuración de aguas y residuales, Ozone Systems. Barcelona: TRAT-AR; 1995.

García, J. (2014). *Sistema de tratamiento para el agua residual de la industria de embutidos por procesos fisicoquímicos y biológicos [Tesis de Pregrado, Centro de investigación y asistencia en diseño y tecnología del estado de Jalisco A.C.].* https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/434/1/Jorge%20Eduardo%20Garc%c3%ada%20Camacho.pdf

Gascón, M. (2006). *Estrategias para la disminución de nitrógeno y fósforo en la planta de embutidos de Plumrose Latinoamérica [Tesis de Pregrado, Universidad Central de Venezuela].* http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/1417/1/TEG-Mar%c3%ada%20Ang%c3%a9lica%20Gasc%c3%b3n.pdf

Grupo Vento. (20 de febrero de 2020). *Tratar aguas residuales en la industria cárnica: mataderos y fábricas.* Grupo Vento. Recuperado DE https://evaporadoresindustriales.grupovento.com/tratar-aguas-residuales-en-la-industria-carnica/

Hernández, J. (2005). *Crecimiento en la demanda mundial de carne Implicaciones para América Latina y el Caribe.* https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/7728/BVE19040037e.pdf?sequence=1&i

sAllowed=y
Huerta, C. (2022). *El coagulante en el tratamiento de agua.* Recuperado de https://contyquim.com/blog/el-coagulante-en-el-tratamiento-de-aguas
Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. Agua, calidad del agua, muestreo, manejo y conservación de muestras. NTE INEN 2169. Quito. 2013.
Laines, J., Goñi, J., Adams, R., & Camacho, W. (2008). Mezclas con potencial coagulante para tratamiento de lixiviados de un relleno sanitario. *Interciencia*, *33*(1), 22–28. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000100006&lng=es&nrm=iso&tlng=es
Marín, T., & Arriojas, D. (2020). Remoción de turbidez de agua mediante filtración utilizando cáscara de coco (Cocos nucífera) a nivel de laboratorio. Revista ION, 33(2). *Revista ION*. https://doi.org/10.18273/revion.v33n2-2020008
Martínez, E. (2005). *Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal*.
Mayorga, F. (2022). *Elaboración y conservación de carne en el Ecuador. Universidad Técnica de Ambato.* https://obest.uta.edu.ec/wp-content/uploads/2022/03/elaboracion_y_conservacion_de_carne_en_el_ecuador-1.pdf
Metcalf y Eddy (1995). *Ingeniería de las aguas residuales* (vol. I), Madrid: McGraw-Hill
Metcalf y Eddy (2003) *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. Rev. Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD. McGraw Hill. Boston, EEUU. 479 pp.
Miño, D. (2014). *Reingeniería del sistema de tratamiento de aguas residuales de la empresa Induash Cía. Ltda [Tesis de Pregrado, Universidad de las Américas].* https://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/7146/1/UDLA-EC-TIAM-2014-08.pdf
Navarro, M. (2012). *Estudio del tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales de una industria de procesado y congelado de verduras [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia].* https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/30140/TFM.pdf?sequence=1&isAllowed=y
Oficina Nacional de Normalización. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado, Especificaciones. Norma Cubana 27/2012. La Habana. 2012
Pérez, D. (2016). *Diagnóstico ambiental de las industrias procesadoras y transformadoras del sector cárnico y sus derivados en Bogotá [Tesis de Pregrado, Universidad Militar Nueva Granada].* https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/15668/PerezHernandezDianaLucia2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y
Proaño, Renato Sánchez, Cerón Pánchig, Carlos, & Landeta Jibaja, Karla. (2023). Cálculo de la carga fluvial de plaguicidas en el río Pisque (Ecuador) entre junio de 2018 y mayo de 2019. LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida, 38(2), 96-105. https://doi.org/10.17163/lgr.n38.2023.07
Rodríguez, A. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales. CEIM.*
Rodríguez, E., & Bermúdez, C. (2017). *Características de las aguas residuales y producción de fango en el sector cárnico Español. ResearchGate.* https://www.researchgate.net/publication/315741707_Caracteristicas_de_las_aguas_residuales_y_produccion_de_fango_en_el_sector_carnico
Romero, A. (2002). Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Colombia: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
Romero Rojas, J. A. (2004). *Tratamiento de Aguas Residuales. III.*
Salazar Peralta, A., Pichardo Salazar, J. A., Pichardo Salazar, U., & Hilda Chávez, R. (2022). Tratamiento fisicoquímico de agua residual proveniente del proceso de cromatizado. *Científica*, *26*(2), 1–9. https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v26n2a10
Sánchez Proaño, R. (2021). Análisis de la primarización de la economía en América Latina desde la base material del método dialéctico. *Conciencia Digital*, *4*(3.2), 79–94. https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v4i3.2.1852
Sánchez Proaño, R., Cerón Pánchig, C., & Landeta Jibaja, K. (2023). Cálculo de la carga fluvial de plaguicidas en el río Pisque (Ecuador) entre junio de 2018 y mayo de 2019. *La Granja*, *38*(2), 96–105. https://doi.org/10.17163/lgr.n38.2023.07
Suárez, V., & Trujillo, D. (2011). *Diseño y construcción de un equipo de prueba de jarras para la tratabilidad de aguas residuales [Tesis de Pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].* http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/684/1/96T00136.pdf
Tuset, S. (s.f.). Tratamiento de las aguas residuales en la industria cárnica. *Condorchem enviro Solutions*. Recuperado de https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-aguas-residuales-

industria-carnica/
Valdez, G. (2019). *Diseño de un Sistema de Gestión Ambiental para INAPESA S.A., basado en la norma ISO 14001:2015* [Tesis de Pregrado, Universidad Técnica Particular de Loja]. https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/20.500.11962/24958/1/Valdez%20Masache%20Geovanny%20Rolando.pdf
Vásquez, D. (2023). *Dosificación del coagulante policloruro de aluminio (coagulante) - polímero aniónico (floculante) como sustituto del sulfato de aluminio en la planta de tratamiento de agua potable de Tixán [Tesis de Pregrado, Universidad de Cuenca].* http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/43373/1/Trabajo-de%20-Titulacion.pdf