

Application of different inorganic coagulants and cost evaluation in the clarification of water from rivers in the Ecuadorian Amazon

Aplicación de diferentes coagulantes inorgánicos y evaluación de costos en la clarificación del agua de ríos de la amazonia ecuatoriana

Autores:

Jiménez-Jumbo, Luis David
Universidad Estatal Amazónica
Técnico docente
Santa Clara – Ecuador



ld.jimenezj@uea.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0000-0862-2048>

Torres-González, Mayra Dayana
Universidad Estatal Amazónica
Técnico docente
Santa Clara – Ecuador



mayrat450@gmail.com



<https://orcid.org/0009-0000-0698-3827>

Coyago-Durán, Adriana Daniela
Universidad Estatal Amazónica
Técnico docente
Santa Clara – Ecuador



ad.coyagod@uea.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0003-8799-3964>

Morales-Ibadango, Carla Mishell
Universidad Estatal Amazónica
Técnico docente
Santa Clara – Ecuador



cm.moralesi@uea.edu.ec



<https://orcid.org/0009-0008-2378-8423>

Fechas de recepción: 21-DIC-2023 aceptación: 23-ENE-2024 publicación: 15-MAR-2024



<https://orcid.org/0000-0002-8695-5005>

<http://mqrinvestigar.com/>



Resumen

Un tratamiento de coagulación es una tecnología de separación ampliamente utilizada en las industrias como paso previo al tratamiento para eliminar la materia orgánica disuelta en las aguas residuales. Sin embargo, se debe investigar el tipo de coagulante, la dosis optimizada y el costo del tratamiento asociado con varios coagulantes empleados comercialmente para el tratamiento del agua de fuentes naturales o procesadas. En este estudio, se probaron tres coagulantes ampliamente utilizados (sulfato férrico, sulfato de aluminio e hidróxido de calcio) para el tratamiento de agua en ríos de la amazónica ecuatoriana aledaños al Centro Experimental de Investigación y Producción Amazónica (CEIPA). Se evaluaron parámetros de calidad del agua, específicamente los que otorgan propiedades organolépticas visibles como la turbidez y el color, para comprender mejor las diferentes actividades coagulantes frente al tratamiento del agua de los ríos. Todos los coagulantes fueron eficientes para el tratamiento del agua analizada. Los hallazgos de este estudio mostraron que el sulfato de aluminio condujo a la mejor eliminación de turbidez a una concentración de 10 ppm en comparación a su costo (22.64%); por otro lado, el sulfato férrico a una concentración de 40 ppm tuvo un mejor rendimiento en la remisión del color en comparación de su costo (21.9%). Los resultados de este estudio contribuyen a la aplicación más amplia, rentable y respetuosa con el medio ambiente de un tratamiento de coagulación del agua de los ríos en mención con coagulantes químicos.

Palabras clave: agua de río; coagulación; costo del tratamiento; sulfato férrico; sulfato de aluminio; hidróxido de calcio; color; turbidez; porcentaje de remisión

Abstract

A coagulation treatment is a separation technology widely used in industries as a prior step to treatment to eliminate organic matter dissolved in wastewater. However, the coagulant type, optimized dosage, and treatment cost associated with various coagulants used commercially for the treatment of water from natural or processed sources should be investigated. In this study, three widely used coagulants (ferric sulfate, aluminum sulfate and calcium hydroxide) were tested for water treatment in rivers in the Ecuadorian Amazon surrounding the Amazon Experimental Research and Production Center (CEIPA). Water quality parameters, specifically those that provide visible organoleptic properties such as turbidity and color, were evaluated to better understand the different coagulant activities in the treatment of river water. All coagulants were efficient for the treatment of the analyzed water. The findings of this study showed that aluminum sulfate led to the best turbidity removal at a concentration of 10 ppm compared to its cost (22.64%); On the other hand, ferric sulfate at a concentration of 40 ppm had a better performance in color remission compared to its cost (21.9%). The results of this study contribute to the broader, cost-effective and environmentally friendly application of a coagulation treatment of river water with chemical coagulants.

Keywords: river water; coagulation; cost of treatment; ferric sulphate; aluminum sulfate; calcium hydroxide; color; turbidity; remission percentage

Introducción

La gestión eficiente y sostenible de los recursos hídricos se ha convertido en un imperativo global en el contexto actual de crecimiento demográfico, desarrollo industrial y cambio climático. En este contexto, la calidad del agua de los ríos desempeña un papel fundamental, ya que su preservación y tratamiento adecuado son cruciales para garantizar la salud pública y la integridad de los ecosistemas acuáticos (Encalada, 2010). La provincia de Pastaza en Ecuador, rica en biodiversidad y recursos hídricos, no escapa a los desafíos asociados con la contaminación de sus fuentes de agua, especialmente en los ríos Piatua, Anzu y Junia.

El presente artículo aborda la problemática de la calidad del agua en estos tres ríos, explorando la aplicación de diferentes coagulantes como estrategia para mejorar la eficiencia en el tratamiento de sus aguas. Este enfoque, además, busca realizar una evaluación integral de los costos asociados a las distintas alternativas de tratamiento, considerando factores técnicos, económicos y ambientales. En la amazónica ecuatoriana, la provincia de Pastaza, conocida por su rica diversidad biológica y su importancia en la provisión de servicios ecosistémicos, se convierte así en un laboratorio natural para la implementación y evaluación de técnicas de tratamiento de agua innovadoras y sostenibles.

En este contexto, la investigación se propone no solo abordar los desafíos específicos de la calidad del agua en los ríos Piatua, Anzu y Junia, sino también contribuir al conocimiento científico en términos de la aplicación efectiva de coagulantes y la optimización de costos en proyectos de tratamiento de agua a nivel regional. Los resultados de este estudio no solo tendrán implicaciones prácticas para la gestión del agua en la provincia de Pastaza, sino que también podrán extrapolarse a otras regiones con condiciones similares, aportando así a la búsqueda de soluciones transferibles y sostenibles en el ámbito del tratamiento de aguas superficiales.

En este contexto, la investigación se propone no solo abordar los desafíos específicos de la calidad del agua en los ríos Piatua, Anzu y Junia, sino también contribuir al conocimiento científico en términos de la aplicación efectiva de coagulantes y la optimización de costos en proyectos de tratamiento de agua a nivel regional (Moreira y Moreira, 2022). Los resultados de este estudio no solo tendrán implicaciones prácticas para la gestión del agua en la provincia de Pastaza, sino que también podrán extrapolarse a otras regiones con condiciones similares, aportando así a la búsqueda de soluciones transferibles y sostenibles en el ámbito del tratamiento de aguas superficiales

Material y métodos

Para la recolección de la muestra se basó en la normativa de agua, calidad del agua, muestreo, manejo y conservación de muestras INEN 2169 y para la prueba de jarras en el manual de tratamiento de agua y para los parámetros fisicoquímicos se utilizó las metodologías descritas por el IDEAM. Todas las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de Estudios Ambientales del CEIPA de la Universidad Estatal Amazónica.

Material

Recolección de la muestra

Botellas de vidrio o plástico diseñadas para contener muestras de agua.
Poleas telescópicas o dispositivos de muestreo de agua:
Hielo o bolsas isotérmicas
Guantes desechables
Etiquetas y rotuladores resistentes al agua
Formularios de registro

(INEN, 2018)

Preparación de las soluciones de coagulante al 1%

Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)
Agua destilada o desionizada
Balanza analítica
Recipiente de vidrio o plástico
Agitador (como una varilla de vidrio)
Etiqueta para identificación

(Castro, 2013)

Medición de turbidez y color

Turbidímetro
Celda de muestra
Colorímetro

Ajuste del pH

- Para Aumentar el pH (Hacer el Agua Más Alcalina):
Hidróxido de sodio (NaOH)



Ceniza de soda (carbonato de sodio)

Bicarbonato de sodio (NaHCO₃)

- Para Disminuir el pH (Hacer el Agua Más Ácida):

Ácido clorhídrico (HCl)

Ácido sulfúrico (H₂SO₄)

Ácido cítrico

Otros Materiales Útiles:

Medidor de pH

Varilla de agitación o agitador magnético

Probetas o pipetas

(Bueno et al., 2014)

Test de Jarras

Floculador de 6 puestos con un volumen de 2 litros por becker

Coagulantes marca Merck: sulfato de aluminio de 500g, sulfato ferroso de 500g e hidróxido de calcio de 500g.

Jeringas graduadas

Vasos de precipitación graduados

(Acosta, 2006).

Métodos

Recolección de la muestra

Identifica el punto de muestreo de los ríos objetivos del análisis y la normativa aplicable. Considera la profundidad, el caudal y otros factores relevantes.

Lava las botellas de muestreo y otros equipos con agua del lugar de muestreo antes de su uso. Enjuaga las botellas varias veces para asegurar la eliminación de cualquier residuo.

Asegúrate de obtener muestras representativas. Evita contaminar la muestra durante la recolección.

Documenta la información relevante, como la ubicación, fecha, hora, condiciones climáticas y cualquier observación importante.

Realiza mediciones in situ si es necesario (pH, conductividad, oxígeno disuelto, etc.) utilizando los instrumentos adecuados.

Asegúrate de cerrar herméticamente las botellas de muestreo para evitar la contaminación y sin burbujas (llenado absoluto).



Almacena las muestras en una nevera o bolsa isotérmica, según sea necesario, para mantener la temperatura adecuada. Transporta las muestras al laboratorio lo más pronto posible después de la recolección (INEN, 2018).

Preparación de las soluciones de coagulante al 1%

Para calcular la cantidad que se tiene que pesar de coagulante al 1% se usa la fórmula de:

Ecuación 1: porcentaje peso/volumen

$$\% \frac{p}{V} = \frac{\text{Gramos de reactivo}}{\text{Volumen del recipiente en ml}} * 100$$

Fuente: (Delgado, 2021)

$$1\% = \frac{\text{Gramos de reactivo}}{1000} * 100$$
$$\text{Gramos de reactivo} = \frac{1\% * 1000}{100\%} = 10\text{g}$$

Utiliza una balanza analítica para pesar la cantidad precisa del coagulante calculado en el paso anterior.

Vierte el coagulante pesado en un balón aforado de 1000 ml. Agrega agua destilada o desionizada al balón hasta aforo completo. Asegúrate de agitar para una mezcla homogénea. Puedes verificar la concentración utilizando un refractómetro o un instrumento de medición de la concentración de solutos.

Etiqueta el recipiente con la concentración de la solución, la fecha de preparación y cualquier otra información relevante (Castro, 2013).

Medición de turbidez

Asegúrate de que el turbidímetro esté calibrado según las instrucciones del fabricante.

Llena la celda de muestra con la muestra de agua que deseas analizar.

Inserta la celda en el turbidímetro y asegúrate de que la luz pueda pasar a través de la muestra.

Registra la lectura de turbidez que muestra el instrumento

Enciende y calibra el medidor de pH según las instrucciones del fabricante, utilizando al menos dos soluciones estándar de pH. Limpia los electrodos de pH con agua destilada antes de sumergirlos en la muestra. Sumerge los electrodos en la muestra de agua y espera a que la lectura se estabilice. Registra la lectura de pH que muestra el instrumento.

Ajuste del pH

Enciende y calibra el medidor de pH según las instrucciones del fabricante, utilizando al menos dos soluciones estándar de pH. Limpia los electrodos de pH con agua destilada antes de sumergirlos en la muestra. Sumerge los electrodos en la muestra de agua y espera a que la lectura se estabilice. Registra la lectura de pH que muestra el instrumento.

Mide y ajusta el pH del agua de muestra a un rango óptimo para la coagulación. Esto suele ser alrededor de pH 6.5 a 7.5. Utiliza ácido o base según sea necesario (Bueno et al., 2014).

Test de Jarras

En primer lugar, colocar seis recipientes de 2 litros en la plataforma del equipo Jar-Test. Luego, llenar cada recipiente con agua bruta hasta alcanzar el indicador de 2000 ml. A continuación, conectar el equipo y ajustar la velocidad a su máximo, es decir, 100 revoluciones por minuto (r.p.m).

En simultáneo, añadir la cantidad correspondiente de coagulante a cada recipiente, utilizando la solución de coagulante al 1% previamente calculada para cada Becker, según lo indicado en la Tabla 1. Dejar que la mezcla agite a esta velocidad máxima durante 2 a 3 minutos, lo que representa el tiempo de detención en la cámara de mezcla rápida.

Posteriormente, reducir la velocidad de agitación a 50 r.p.m y mantenerla así durante un periodo de 10 a 30 minutos, correspondiente al tiempo de detención en los floculadores. Permitir que las muestras decanten durante un periodo determinado, el cual se establecerá según la velocidad de sedimentación en el decantador, variando entre 10 a 30 minutos.

Transcurrido este tiempo, recolectar el sobrenadante de todos los recipientes y proceder a analizar los parámetros necesarios. El objetivo es verificar cuál de ellos ha mostrado el mejor resultado. En general, se considerará como mejor resultado aquel que presente la mayor reducción en color y turbidez. La dosificación que haya logrado este mejor resultado será la seleccionada para el proceso (Acosta, 2006).

Tabla 1: Volumen del coagulante en la obtención de la concentración de la muestra de agua

Concentración (PPM)	MI de coagulante al 1% (10000 ppm)
10	2
20	4
40	8
60	12
80	16
100	20

Elaborado por: El autor

Resultados

Para la lectura de la turbidez y color posterior al tratamiento se recolector el sobrenadante de las jarras del equipo de floculación con el fin de garantizar que todo los solidos suspendidos se hayan precipitado. De esta manera, la tabla 2 a la tabla 7 nos muestran el % de remoción mediante la formula:

Ecuación 2: porcentaje de remoción

$$\% \text{ remoción} = \frac{\text{Lectura sin tratamiento} - \text{lectura despues del tratamiento}}{\text{Lectura sin tratamiento}} * 100$$

Fuente: (Villada y Hormaza, 2015)

Esta fórmula es aplicada tanto para la turbidez como para el color; por supuesto, se refleja una relación directamente proporcional ya que esta comprobado que a mayor coagulante, más serán los sólidos que precipiten y eso se evidencia en la gráfica de concentración en el eje x y en el eje y se refleja el porcentaje de remoción sea este de turbidez y color respectivamente.

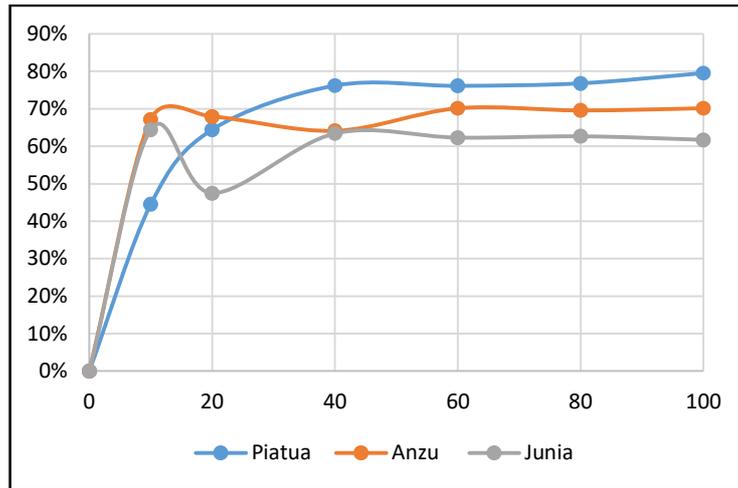
Tabla 2: Remoción de turbidez con sulfato de aluminio

Concentración (PPM)	Piatua	% remoción	Anzu	% remoción	Junia	% remoción
0	7,025	0,000%	6,236	0,000%	7,026	0,000%
10	3,9	44,484%	2,050	67,126%	2,500	64,418%
20	2,5	64,413%	2,000	67,928%	3,692	47,452%
40	1,67	76,228%	2,236	64,144%	2,569	63,436%

60	1,68	76,085%	1,863	70,125%	2,650	62,283%
80	1,63	76,797%	1,900	69,532%	2,623	62,667%
100	1,44	79,502%	1,863	70,125%	2,690	61,714%

Elaborado por: El autor

Figura 1: Concentración vs remoción de turbidez con sulfato de aluminio



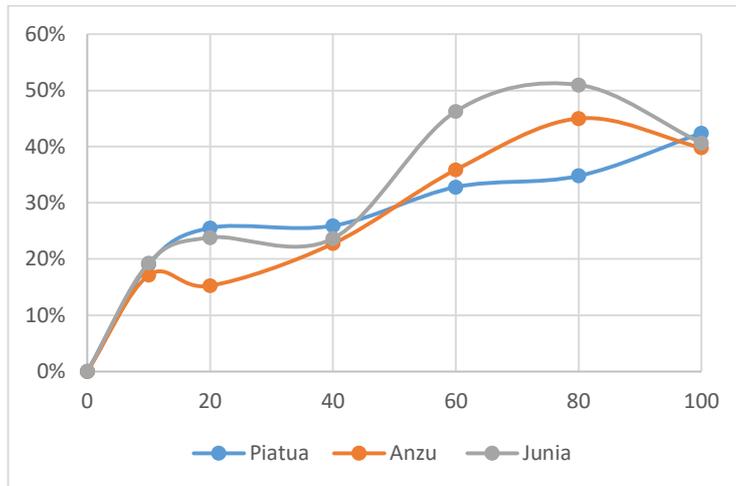
Elaborado por: El autor

Tabla 3: Remoción de color con sulfato de aluminio

Concentración (PPM)	Piatua	% remoción	Anzu	% remoción	Junia	% remoción
0	2,5	0,000%	1,6	0,000%	2,300	0,000%
10	2,023	19,080%	1,326	17,125%	1,856	19,304%
20	1,862	25,520%	1,356	15,250%	1,752	23,826%
40	1,852	25,920%	1,236	22,750%	1,756	23,652%
60	1,68	32,800%	1,026	35,875%	1,236	46,261%
80	1,63	34,800%	0,880	45,000%	1,128	50,957%
100	1,44	42,400%	0,963	39,813%	1,365	40,652%

Elaborado por: El autor

Figura 2: Concentración vs remoción de color con sulfato de aluminio



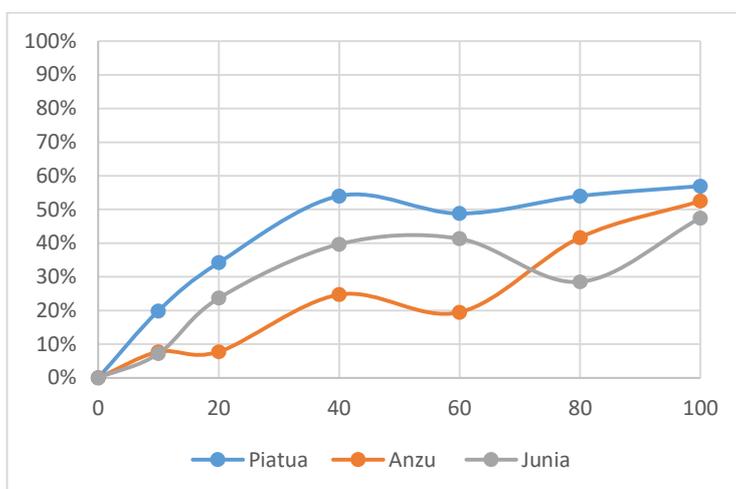
Elaborado por: El autor

Tabla 4: Remoción de turbidez con sulfato ferroso

Concentración (PPM)	Piatua	% remoción	Anzu	% remoción	Junia	% remoción
0	7,025	0,000%	6,236	0,000%	7,026	0,000%
10	5,63	19,858%	5,756	7,697%	6,523	7,159%
20	4,623	34,192%	5,752	7,761%	5,362	23,683%
40	3,23	54,021%	4,695	24,711%	4,236	39,710%
60	3,596	48,811%	5,023	19,452%	4,123	41,318%
80	3,233	53,979%	3,639	41,645%	5,023	28,508%
100	3,023	56,968%	2,963	52,486%	3,693	47,438%

Elaborado por: El autor

Figura 3: Concentración vs remoción de turbidez con sulfato ferroso



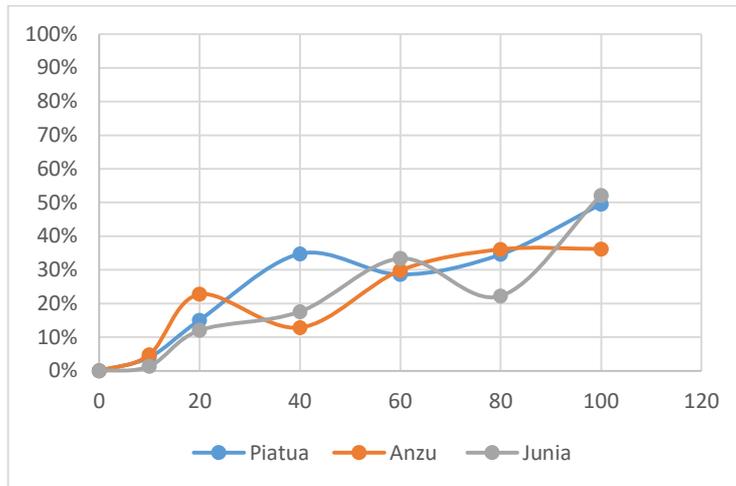
Elaborado por: El autor

Tabla 5: Remoción de color con sulfato ferroso

Concentración (PPM)	Piatua	% remoción	Anzu	% remoción	Junia	% remoción
0	2,5	0,000%	1,6	0,000%	2,300	0,000%
10	2,4	4,000%	1,523	4,813%	2,269	1,348%
20	2,125	15,000%	1,236	22,750%	2,023	12,043%
40	1,632	34,720%	1,395	12,813%	1,896	17,565%
60	1,785	28,600%	1,123	29,813%	1,532	33,391%
80	1,635	34,600%	1,023	36,063%	1,789	22,217%
100	1,263	49,480%	1,021	36,188%	1,102	52,087%

Elaborado por: El autor

Figura 4: Concentración vs remoción de color con sulfato ferroso



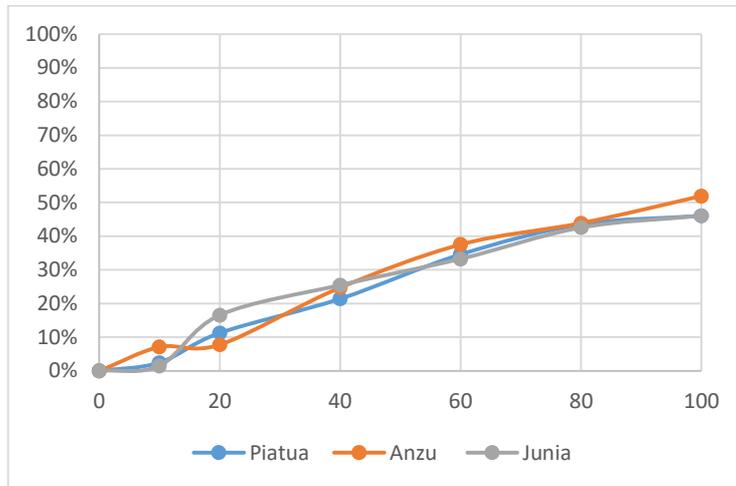
Elaborado por: El autor

Tabla 6: Remoción de turbidez con Cal

Concentración (PPM)	Piatua	% remoción	Anzu	% remoción	Junia	% remoción
0	7,025	0,000%	6,236	0,000%	7,026	0,000%
10	6,856	2,406%	5,796	7,056%	6,923	1,466%
20	6,236	11,231%	5,752	7,761%	5,863	16,553%
40	5,523	21,381%	4,695	24,711%	5,236	25,477%
60	4,596	34,577%	3,896	37,524%	4,693	33,205%
80	3,9685	43,509%	3,500	43,874%	4,036	42,556%
100	3,789	46,064%	3,000	51,892%	3,79	46,058%

Elaborado por: El autor

Figura 5: Concentración vs remoción de turbidez con Cal



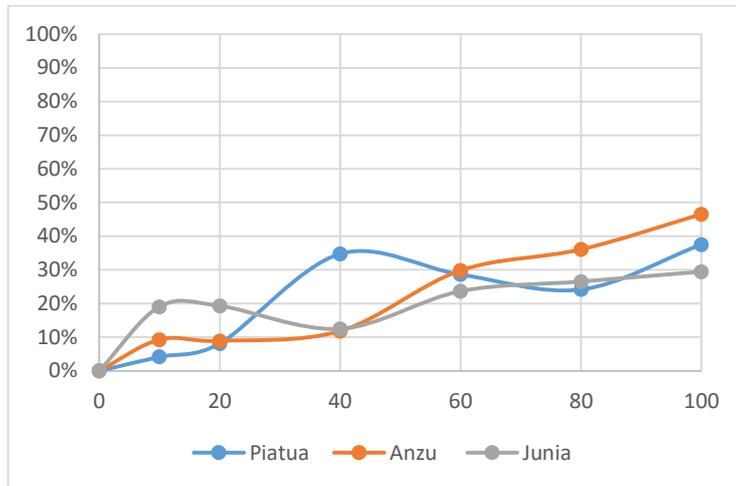
Elaborado por: El autor

Tabla 7: Remoción de color con Cal

Concentración (PPM)	Piatua	% remoción	Anzu	% remoción	Junia	% remoción
0	2,5	0,000%	1,6	0,000%	2,300	0,000%
10	2,396	4,160%	1,452	9,250%	1,862	19,043%
20	2,2965	8,140%	1,458	8,875%	1,856	19,304%
40	1,632	34,720%	1,411	11,813%	2,013	12,478%
60	1,785	28,600%	1,123	29,813%	1,756	23,652%
80	1,896	24,160%	1,023	36,063%	1,690	26,522%
100	1,563	37,480%	0,856	46,500%	1,623	29,435%

Elaborado por: El autor

Figura 6: Concentración vs remoción de color con Cal



Elaborado por: El autor

En la tabla 8 se puede evidenciar el rango de remoción por parámetro según la concentración de cada coagulante, el objetivo de este análisis es obtener la diferencia entre los valores mayores menos los menores para su posterior análisis.

Tabla 8: Rendimientos en la remoción de turbidez y color

Coagulante	Concentración (ppm)	Rango de remoción de turbidez		Rango de remoción de color		
Sulfato de Aluminio	10	44,48%	67,13%	22,64%	17,13% - 19,30%	2,18%
	20	47,45%	67,93%	20,48%	15,25% - 25,52%	10,27%
	40	63,44%	76,23%	12,79%	22,75% - 25,92%	3,17%
	60	62,28%	76,09%	13,80%	32,80% - 46,26%	13,46%
	80	62,67%	76,80%	14,13%	34,80% - 50,96%	16,16%
	100	61,71%	79,50%	17,79%	39,81% - 42,40%	2,59%
Sulfato ferroso	10	7,16%	19,86%	12,70%	1,35% - 4,81%	3,46%
	20	7,76%	34,19%	26,43%	12,04% - 22,75%	10,71%
	40	24,71%	54,02%	29,31%	12,81% - 34,72%	21,91%
	60	19,45%	48,81%	29,36%	28,60% - 33,39%	4,79%
	80	28,51%	53,98%	25,47%	22,22% - 36,06%	13,85%
	100	47,44%	56,97%	9,53%	36,19% - 52,09%	15,90%
Cal	10	1,47%	7,06%	5,59%	4,16% - 19,04%	14,88%
	20	7,76%	16,55%	8,79%	8,14% - 19,30%	11,16%
	40	21,38%	25,48%	4,10%	11,81% - 34,72%	22,91%
	60	33,21%	37,52%	4,32%	23,65% - 29,81%	6,16%
	80	42,56%	43,87%	1,32%	24,16% - 36,06%	11,90%

100	46,06% - 51,89%	5,83%	29,43% - 46,50%	17,07%
	Mayor rango de remisión en turbidez			Mayor rango de remisión en color

Elaborado por: El autor

Los precios de los coagulantes se obtuvieron de las páginas oficiales de proveedores de reactivos químicos, se escogieron presentaciones iguales para los 3 coagulantes y se calculó el precio por gramo para la preparación de la solución del 1% p/v del coagulante (Tabla 9).

Tabla 9: Precios de coagulantes

Coagulante	Numero de referencia	Presentación	Precio	Precio por gramo
Sulfato De Aluminio	A0843-500G	500 g	\$ 114,89	\$ 0,23
Sulfato ferroso	215406-500G	500 g	\$ 191,49	\$ 0,38
Hidróxido de calcio	1021190500	500 g	\$ 220,87	\$ 0,44

Elaborado por: El autor

Teniendo el precio para la preparación de la solución al 1% se hace una relación directamente proporcional para el cálculo del precio por concentraciones de los diferentes coagulantes (Tabla 10).

Tabla 10: Gasto de coagulantes ante diferentes concentraciones

Concentración (PPM)	MI de coagulante al 1% (10000 ppm)	Gasto		
		Sulfato De Aluminio	Sulfato ferroso	Hidróxido de calcio
10	2	\$ 0,00046	\$ 0,00077	\$ 0,00088
20	4	\$ 0,00092	\$ 0,00153	\$ 0,00177
40	8	\$ 0,00184	\$ 0,00306	\$ 0,00353
60	12	\$ 0,00276	\$ 0,00460	\$ 0,00530
80	16	\$ 0,00368	\$ 0,00613	\$ 0,00707
100	20	\$ 0,00460	\$ 0,00766	\$ 0,00883

Elaborado por: El autor

Finalmente, en la Tabla 11, se describe el precio de cada concentración de los diferentes coagulantes y se procede a realizar un análisis del rendimiento de cada uno de estos, con el fin de evaluar si es óptimo el precio que se paga con respecto a cuanto turbidez y color remueven.

Ecuación 3: Rendimiento o retorno de inversión

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Utilidad (Rangos de remosion)}}{\text{Gasto (precio de coagulante)}}$$

Fuente: (De La Hoz et al., 2008)

Tabla 11: Determinación del mejor coagulante a una determinada concentración por parámetro mediante la relación costo-beneficio

Coagulante	Parámetro	Concentración	Mayores rangos de remoción	Gasto	Rendimiento
Sulfato De Aluminio	Turbidez	10	22,642%	\$ 0,00046	492,6969
	Color	80	16,157%	\$ 0,00368	43,9456
Sulfato ferroso	Turbidez	60	29,360%	\$ 0,00460	63,8846
	Color	40	21,908%	\$ 0,00306	71,5034
Hidróxido de calcio	Turbidez	20	8,791%	\$ 0,00177	49,7545
	Color	40	22,908%	\$ 0,00353	64,8218
 Mejor rendimiento en remoción de turbidez en relación al precio		 Mejore rendimiento en remoción de color en relación al precio			

Elaborado por: El autor

Discusión

La presente investigación se enfocó en evaluar la eficacia de diferentes coagulantes en la mejora de la calidad del agua, centrándose específicamente en la reducción de turbidez y color. Entre los coagulantes analizados, se destacó el sulfato de aluminio por su notable rendimiento en la disminución de la turbidez en una concentración de 10 ppm, esto evidenciándose con lo que dicen Edwards y Benjamin (2004) quienes afirman que el sulfato de aluminio es efectivo en la coagulación debido a su capacidad para liberar iones de aluminio en solución, los cuales reaccionan con el agua para formar hidróxidos de aluminio altamente cargados negativamente. Estos hidróxidos actúan como coagulantes que neutralizan las cargas superficiales de las partículas coloidales en suspensión, facilitando la formación de floculantes; por lo se afirma, que es la sustancia química más utilizada en los procesos de potabilización. Por otro lado, el sulfato ferroso facilita la formación de floculantes férricos, los cuales tienen la capacidad de adsorber y flocular sustancias orgánicas coloridas. Este proceso contribuye significativamente a la eliminación del color en el agua tratada; este argumento se demostró en los resultados al ser más efectivo en la eliminación del color a una concentración de 40 ppm (Wang et al., 2009).

En cuanto a los costos asociados a la eliminación de la turbidez del agua, los resultados indican que el sulfato de aluminio exhibe una capacidad significativamente mayor para aglomerar partículas suspendidas. Esto conduce a una clarificación más efectiva del agua, especialmente a concentraciones más bajas, resultando en una mejor rentabilidad. Investigaciones han demostrado que el sulfato de aluminio puede ser eficaz en la coagulación y floculación de partículas incluso a concentraciones relativamente bajas. Aunque la dosificación exacta puede depender de las características específicas del agua a tratar, se ha observado que este coagulante logra una clarificación adecuada del agua incluso a concentraciones reducidas. (Barajas y Leon, 2015).

Así mismo, los resultados revelan que el sulfato ferroso exhibe una eficacia significativa en la coagulación y floculación de partículas, incluso cuando se utiliza en concentraciones relativamente bajas. Su capacidad para precipitar hierro en forma de hidróxidos férricos contribuye a la eliminación eficaz de contaminantes, haciéndolo particularmente rentable. Aunque la dosificación precisa puede depender de las características específicas del agua a tratar, se ha observado que el sulfato ferroso logra una remoción eficaz de impurezas incluso a concentraciones bajas, reforzando su viabilidad como una opción costo-efectiva en el tratamiento del agua.

Es importante destacar que las condiciones específicas del agua, como el pH y la composición química, pueden haber influido en los resultados obtenidos. Además, aunque el sulfato de aluminio y el sulfato ferroso destacaron en turbidez y color, respectivamente, la selección de coagulantes para aplicaciones prácticas debería considerar también factores económicos y logísticos, como costos y disponibilidad a gran escala (Barajas y Leon, 2015).

En términos de limitaciones, reconocemos que las condiciones del laboratorio pueden no replicar completamente las complejidades de los sistemas de tratamiento de agua del mundo real. Además, la investigación se centró en dos parámetros específicos (turbidez y color), lo que podría limitar la generalización de los resultados a otros aspectos de la calidad del agua.

Conclusiones

Debido a su operación simple, alta versatilidad, bajo consumo de energía y alto costo, la coagulación y la floculación siguen siendo pasos esenciales en el campo del tratamiento del agua. Esta investigación resumió el desarrollo de la aplicación del proceso de coagulación con diferentes insumos químicos y describió la efectividad del proceso de coagulación mejorado desde la perspectiva costos.

Los resultados obtenidos han revelado que la elección del coagulante no solo afecta la eficiencia del proceso de coagulación-floculación, sino también la remoción de

contaminantes específicos presentes en aguas fluviales. La identificación de coagulantes más efectivos para la clarificación y eliminación de impurezas ha permitido no solo optimizar los recursos, sino también reducir la carga de productos químicos utilizados, contribuyendo así a prácticas más sostenibles y económicas.

Además, esta investigación ha destacado la necesidad de considerar las características específicas de las aguas de ríos al seleccionar coagulantes, reconociendo que cada cuerpo de agua presenta desafíos únicos en términos de composición química y variabilidad estacional. La aplicación de un enfoque personalizado, basado en el análisis detallado de las características del agua de un río particular, se revela como una estrategia clave para garantizar resultados óptimos en los procesos de tratamiento.

En última instancia, los hallazgos de esta investigación proporcionan una base sólida para la toma de decisiones informadas en la selección de coagulantes, permitiendo a los profesionales del tratamiento del agua abordar de manera más efectiva los desafíos asociados con la clarificación y descontaminación de las aguas de ríos. Este conocimiento contribuye a la mejora continua de las prácticas de tratamiento, promoviendo la gestión sostenible de los recursos hídricos y, en última instancia, asegurando un suministro de agua más seguro y de alta calidad para las comunidades afectadas.

Referencias bibliográficas

- Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 15(2), 10-17.
<https://doi.org/https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120664002>
- Barajas, C., y Leon, A. (2015). *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*. Universidad Santo Tomás, Bogotá. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2916/Barajasclaudia2015.pdf
- Bueno, K., Torres, P., y Delgado, L. (2014). MONITOREO Y MEDICIÓN DEL AJUSTE DEL pH DEL AGUA TRATADA DEL RÍO CAUCA MEDIANTE ÍNDICES DE ESTABILIZACIÓN. *Revista Actualidad y Divulgación UDCA*, 17(2), 563-575.
<https://doi.org/https://doi.org/10.31910/rudca.v17.n2.2014.422>
- Castro, J. (2013). *Manual de procedimiento para la preparación de soluciones en los laboratorios de caracterización y calidad del agua y operación de plantas de tratamiento de aguas*. Instituto politécnico nacional secretaria academica dirección de educación media centro de estudios científicos y tecnológicos, Mexico. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.repositoriodigital.ipn.m

x/bitstream/123456789/26030/1/PREPARACION%20DE%20SOLUCIONES%20%28bueno%29.pdf

- De La Hoz, B., Ferrer, M., y De La Hoz, A. (2008). Indicadores de rentabilidad: herramientas para la toma de decisiones financieras en hoteles de categoría media ubicados en Maracaibo. *Revista de Ciencias Sociales*, 14(1).
https://doi.org/http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-95182008000100008&lng=es&tlng=es.
- Delgado, E. (2021). *Química Inorgánica Básica*. Editorial Universitaria Abya-Yala.
<https://doi.org/file:///C:/Users/juanj/Downloads/Qui%CC%81mica%20inorga%CC%81nica.pdf>
- Edwards, M., y Benjamin, M. (2004). Emphasizing coagulation for enhanced floc settling. *Journal - American Water Works Association*, 96(4), 92-101.
https://doi.org/https://www.academia.edu/35991504/_American_Water_Works_Association_American_Societ_Bookos_org_
- Encalada, A. (2010). Funciones ecosistémicas y diversidad de los ríos. *Polemika*, 2(5), 40-47. <https://doi.org/https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/polemika/article/view/370>
- INEN. (2018). *Consejo Nacional de competencia*. Instituto Ecuatoriano de Normalización : chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.competencias.gob.ec/wp-content/uploads/2021/03/05-03NOR2000-INEN05.pdf
- Moreira, J., y Moreira, C. (2022). Aplicación de coagulantes naturales obtenidos de las semillas de habas (*Vicia faba*) y durazno (*Prunus persica*) en la potabilización del agua. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 9(1), 1-6.
<https://doi.org/http://portal.amelica.org/ameli/journal/215/2152932006/>
- Villada, Y., y Hormaza, A. (2015). Análisis simultáneo de la remoción de azul brillante y rojo 40 mediante espectrofotometría de derivadas. *Ingeniería y Desarrollo*, 33(1), 38-58. <https://doi.org/https://doi.org/10.14482/inde.33.L5526>
- Wang, L., Chen, J., y Hung, Y.-T. (2009). Handbook of Environmental Engineering. *Humana Press*, 13(3), 126-139. <https://doi.org/DOI 10.1007/978-1-59745-278-6>

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

Extendemos un fraternal agradecimiento al Dr. David Sancho, rector de la Universidad Estatal Amazónica, cuya gestión y administración nos permitió tener los medios necesarios para contribuir a la investigación.

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior.

