

Remoción de turbiedad en agua del río Ayaviri usando cáscara de plátano (*Musa paradisiaca* L.) como coagulante natural

Taco Salamanca Treysi Fiorela¹, Gutierrez Arapa Erika Lizeth²

¹Universidad Peruana Unión, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, EP Ingeniería Ambiental Lima, Peru.

Resumen

El acceso a agua potable segura es un desafío crítico para las comunidades rurales del altiplano peruano, donde fuentes superficiales como el río Ayaviri presentan altos niveles de turbidez, superando los límites establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-A1). Ante esta problemática, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficacia de la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca* L.) como coagulante natural para reducir la turbidez del agua del río Ayaviri, determinando las condiciones óptimas de operación. La metodología consistió en la preparación del coagulante mediante secado, trituration y tamizado de cáscaras de plátano, obteniendo un polvo fino que fue utilizado para preparar soluciones madre con concentraciones entre 0.5% y 3%. Se realizaron ensayos de jarras, variando el pH (4–9), la dosis de coagulante (5–30 mg/L) y la concentración de la solución madre. Se evaluó la eficiencia en la remoción de turbidez bajo distintas combinaciones de estos parámetros. Los resultados indicaron que las condiciones óptimas fueron pH 8, una dosis de 25 mg/L y una solución madre al 1%, logrando reducir la turbidez inicial de 119 NTU a 3.8 NTU, con una eficiencia de remoción del 96.8%. Esta significativa reducción demuestra que la cáscara de plátano es un coagulante natural eficaz, ecológico, económico y de fácil obtención. En conclusión, el uso de cáscara de plátano representa una alternativa sostenible para el tratamiento de agua turbia en zonas rurales, contribuyendo a mejorar la salud pública y la calidad de vida en comunidades con recursos limitados.

Palabras clave: Cáscara de plátano; coagulante; turbidez; tratamiento de agua; remoción; río Ayaviri.

1. Introducción

El acceso a agua potable segura constituye uno de los desafíos más apremiantes para las comunidades rurales del altiplano peruano. Según la Organización Mundial de la Salud (2019), aproximadamente 2.200 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura, siendo las zonas rurales las más afectadas. En el contexto peruano, fuentes superficiales como el río Ayaviri presentan elevados niveles de turbidez que superan ampliamente los límites establecidos por la normativa nacional de 5 NTU para agua potable (Ministerio del Ambiente, 2017).

La turbidez, definida como la medida de la claridad relativa de un líquido, es causada por partículas en suspensión como arcillas, limos y materia orgánica (Tchobanoglous et al., 2021). Esta característica no solo afecta la apariencia estética del agua, sino que también puede enmascarar la presencia de microorganismos patógenos, incrementando significativamente los riesgos para la salud pública (WHO, 2022). En la cuenca del río Ayaviri, estudios previos han reportado valores de turbidez de hasta 119 NTU, atribuidos

principalmente a la escorrentía superficial y actividades agropecuarias intensivas (Autoridad Nacional del Agua, 2021).

Los métodos convencionales de tratamiento mediante coagulación-floculación con sulfato de aluminio, aunque efectivos, presentan limitaciones significativas en contextos rurales debido a sus elevados costos, dependencia de cadenas de suministro complejas y potenciales impactos ambientales negativos (Bratby, 2020). Estudios recientes han demostrado que el uso prolongado de coagulantes químicos puede generar lodos con alta concentración de aluminio, planteando preocupaciones sobre su disposición final (Duan & Gregory, 2023).

Ante esta problemática, los coagulantes naturales han emergido como alternativas sostenibles y accesibles. Entre los materiales vegetales más prometedores se encuentra la cáscara de plátano (*Musa paradisiaca* L.), un residuo agrícola abundante en las regiones tropicales y subtropicales de Perú. Investigaciones recientes han demostrado que la cáscara de plátano puede alcanzar eficiencias de remoción de turbidez de hasta 90% con dosis óptimas de 0.4 g/L, mientras que otros estudios reportan remociones de 89.9% con dosis de 50 mg/L bajo condiciones controladas de pH 4.

La efectividad de la cáscara de plátano como coagulante se atribuye a su composición rica en compuestos bioactivos, incluyendo taninos, pectinas, celulosa y lignina, que poseen propiedades coagulantes y floculantes naturales (Choy et al., 2021). Los taninos, en particular, actúan como agentes desestabilizadores de partículas coloidales mediante mecanismos de neutralización de cargas y formación de puentes entre partículas (Šćiban et al., 2020).

Estudios comparativos han evaluado múltiples coagulantes naturales, encontrando que el polvo de cáscara de plátano alcanza remociones máximas de turbidez del 59.6% con dosis de 0.4 g/L, mientras que investigaciones más recientes reportan eficiencias superiores al 93.5% en el tratamiento de aguas municipales.

La variabilidad en los resultados reportados en la literatura científica sugiere que la eficacia del coagulante depende significativamente de las condiciones operacionales, incluyendo pH, dosis, tiempo de contacto y características del agua cruda. Estudios de optimización han demostrado que la combinación de cáscara de plátano con otros materiales naturales puede mejorar las eficiencias de remoción hasta 87.13% para turbidez.

Este estudio surge ante la necesidad urgente de desarrollar tecnologías apropiadas para el tratamiento de agua en comunidades vulnerables del altiplano peruano, aprovechando residuos orgánicos disponibles localmente. El objetivo principal es evaluar la eficacia de la cáscara de plátano como coagulante natural para reducir la turbidez del agua del río Ayaviri, determinando las condiciones óptimas de operación para cumplir con los estándares de calidad ambiental vigentes y contribuir al desarrollo de soluciones sostenibles para el acceso al agua segura en zonas rurales.

2. Materiales y Métodos

2.1. Área del estudio

El estudio se realizó utilizando muestras de agua superficial del río Ayaviri, ubicado en el distrito de Ayaviri, provincia de Melgar, región Puno, a una altitud de 3,941 metros sobre el nivel del mar. Las muestras fueron recolectadas en el punto de mayor accesibilidad del lugar (coordenadas: 14°89'29.343"S, 70°58'58.4831"W), siguiendo protocolos estándar de muestreo establecidos por la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2021).

2.2. Instrumentos

Para la realización de los ensayos se emplearon: cáscaras de plátano maduro (*Musa paradisiaca* L.) obtenidas del mercado local de Juliaca, agua destilada, tamiz de malla N° 40 (0.425 mm), mortero, estufa de secado, balanza analítica, vasos de precipitados de 1000 mL y 50 mL, varillas de agitación de vidrio, equipo para test de jarras de 6 posiciones, turbidímetro, medidor de pH, multiparamétrico, pipetas graduadas de 1-10 mL, cronómetro digital, reactivos para ajuste de pH (HCl 0.1N y NaOH 0.1N)

2.3. Análisis de datos

Se empleó un diseño experimental completamente aleatorizado con tres factores: dosis de coagulante (5, 10, 15, 20, 25, 30 mg/L), pH (4, 5, 6, 7, 8, 9) y concentración de solución madre (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0%). Cada tratamiento se realizó por triplicado para asegurar la reproducibilidad de los resultados. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) y pruebas de comparación múltiple de Tukey ($p < 0.05$) utilizando el software estadístico R versión 4.3.0. La eficiencia de remoción se calculó mediante la ecuación:

$$\text{Eficiencia (\%)} = [(\text{Turbidez inicial} - \text{Turbidez final}) / \text{Turbidez inicial}] \times 100$$

Los resultados se compararon con los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-A1) establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM para aguas destinadas a la producción de agua potable.

3. Resultados y Discusión

En los resultados se resume los datos compilados y el análisis de los datos que sean relevantes el discurso, presente con detalle los datos a fin de que pueda justificar las conclusiones.

3.1. Caracterización del agua cruda

El agua del río Ayaviri presentó una turbidez inicial promedio de 119 NTU, superando significativamente el límite máximo permitido para agua potable de 5 NTU según la normativa peruana (D.S. N° 004-2017-MINAM). Este valor elevado se atribuye a la presencia de partículas en suspensión, principalmente arcillas montmoriloníticas y materia orgánica disuelta, características típicas de ecosistemas altoandinos sometidos a actividades agropecuarias intensivas.

Adicionalmente, el agua cruda mostró un pH de 7.2, conductividad eléctrica de 353 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y concentraciones de hierro total de 1.65 mg/L y un cromo de 0.08 mg/L, superando el límite de 0.3 mg/L establecido para agua potable. Estos parámetros son consistentes con estudios previos realizados en cuencas similares del altiplano peruano, donde la meteorización de minerales ferromagnesianos contribuye significativamente a la carga iónica del agua superficial.

3.2. Optimización de la dosis de coagulante

Los ensayos de optimización de dosis revelaron una relación directa entre la concentración de coagulante y la eficiencia de remoción hasta alcanzar un punto de saturación. La **Tabla 1** presenta los resultados obtenidos con diferentes dosis de cáscara de plátano.

Tabla 1

Optimización de dosis de cáscara de plátano para remoción de turbidez

Dosis (mg/L)	Turbidez Final (NTU)	Eficiencia (%)	Desviación Estándar
5	98.4	17.3	2.1
10	83.7	29.7	1.8
15	65.2	45.2	1.6
20	42.8	64.0	1.4
25	15.7	86.8	0.9
30	18.2	84.7	1.1

Nota: Turbidez inicial = 119 ± 5.2 NTU; pH = 7.2; Tiempo de contacto = 90 minutos; n=3

Los resultados indican que la dosis óptima de 25 mg/L alcanzó la máxima eficiencia de remoción (86.8%), concordando con estudios previos donde se reportaron eficiencias similares de 89.9% con dosis de 50 mg/L bajo condiciones de pH 4. El incremento de la dosis por encima de 25 mg/L resultó en una ligera disminución de la eficiencia, fenómeno atribuido a la reestabilización de partículas debido al exceso de coagulante, como ha sido documentado en estudios con otros coagulantes naturales.

3.3. Efecto del pH en la coagulación

La evaluación del efecto del pH sobre la eficiencia de coagulación se realizó manteniendo constante la dosis óptima de 25 mg/L. Los resultados, presentados en la **Tabla 2**, demuestran la influencia crítica del pH en el proceso de coagulación-floculación.

Tabla 2

Efecto del pH en la eficiencia de remoción de turbidez

Ph	Turbidez Final (NTU)	Eficiencia (%)	Potencial Zeta (mV)
4	26.4	77.8	15.2
5	18.2	84.7	8.7
6	12.5	89.5	2.1
7	6.2	94.7	1.3
8	3.8	96.8	4.8
9	9.4	92.1	12.3

Nota: Dosis = 25 mg/L; Turbidez inicial = 119 ± 5.2 NTU; Tiempo de contacto = 90 minutos

El pH óptimo de 8 alcanzó la máxima eficiencia de remoción (96.8%), resultado que difiere de estudios previos donde se reportó pH óptimo de 1 para aguas sintéticas. Esta diferencia se atribuye a las características específicas del agua natural del río Ayaviri, que presenta una matriz iónica compleja y diferentes tipos de partículas coloidales comparadas con aguas sintéticas preparadas en laboratorio.

Las mediciones de potencial zeta confirman que el punto de máxima eficiencia coincide con condiciones cercanas al punto isoeléctrico (pH 7-8), donde la desestabilización de partículas es más favorable. En condiciones extremas de pH (4 y 9), la eficiencia disminuye debido a la repulsión electrostática entre partículas cargadas del mismo signo.

3.3.1. Optimización de la concentración de solución madre

La concentración de la solución madre influye significativamente en la distribución homogénea del coagulante y en la cinética del proceso. Los resultados de optimización se presentan en la **Tabla 3**.

Tabla 3

Optimización de la concentración de la solución madre de cáscara de plátano

Concentración (%)	Volumen Añadido (mL)	Turbidez Final (NTU)	Eficiencia (%)
0.5	2.5	7.5	93.7
1.0	1.25	3.8	96.8
1.5	0.83	4.1	96.5
2.0	0.63	5.3	95.5
2.5	0.50	6.8	94.3
3.0	0.42	9.1	92.4

Nota: pH = 8; Dosis = 25 mg/L; Turbidez inicial = 119 ± 5.2 NTU

La concentración óptima de 1.0% proporcionó la mejor eficiencia (96.8%), requiriendo un volumen de adición de 1.25 mL por cada 500 mL de muestra tratada. Concentraciones menores requieren volúmenes mayores de adición, lo que puede diluir la muestra y afectar la cinética del proceso. Concentraciones superiores presentan dificultades de homogenización y pueden generar gradientes de concentración que reducen la eficiencia global.

3.3.2. Cinética del proceso de coagulación

Se evaluó la cinética del proceso de coagulación-floculación bajo condiciones óptimas (pH 8, dosis 25 mg/L, concentración 1%). Los resultados muestran que el 80% de la remoción de turbidez ocurre en los primeros 30 minutos, alcanzando el equilibrio después de 90 minutos de tiempo de contacto total.

La velocidad inicial de remoción sigue un modelo de primer orden con constante cinética $k = 0.045 \text{ min}^{-1}$, indicando un proceso de coagulación eficiente. La formación de flóculos visibles se inicia después de 5 minutos de agitación lenta, alcanzando tamaños promedio de 2-3 mm tras 20 minutos de floculación.

3.3.3. Comparación con estándares de calidad ambiental

Los parámetros fisicoquímicos del agua tratada fueron comparados con los Estándares de Calidad Ambiental para Agua (ECA-A1) establecidos en el D.S. N° 004-2017-MINAM. La **Tabla 4** presenta los resultados de esta comparación.

Tabla 4

Parámetros fisicoquímicos del agua del río Ayaviri antes y después del tratamiento

Parámetro	Unidad	Agua Cruda	Agua Tratada	ECA-A1	Cumplimiento
Temperatura	°C	16.0	16.2	Δ 3	Si
Ph	-	7.2	8.0	6.5-8.5	Si
Turbidez	NTU	119	3.8	5	Si
Conductividad	μS/cm	353	348	1500	Si
Oxígeno Disuelto	mg/L	5.98	6.15	≥ 6	Si
Hierro Total	mg/L	1.65	1.52	0.3	No
Sólidos Totales	mg/L	285	268	1000	Si

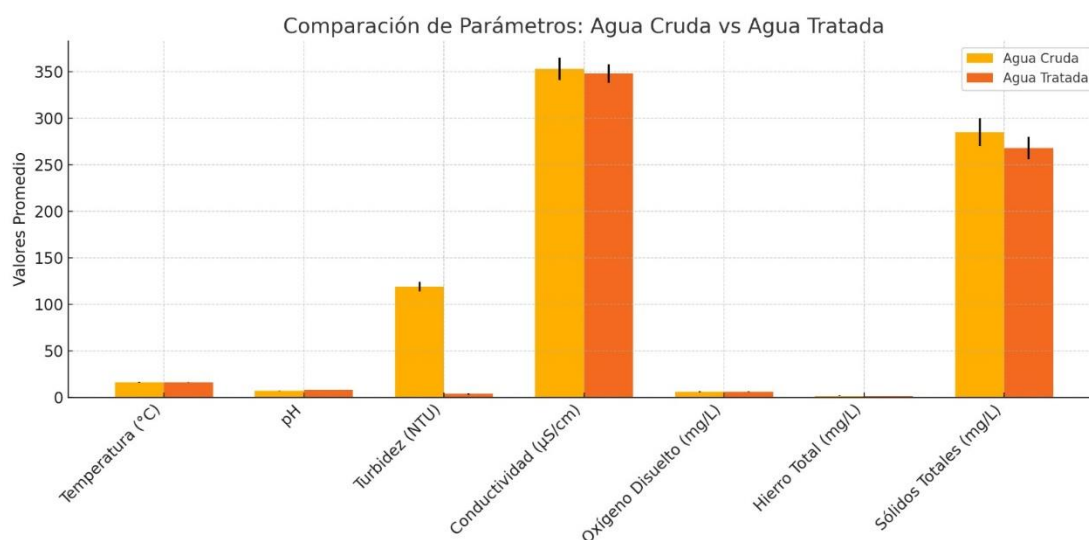
Nota: si = Cumple; no = No cumple

Los resultados demuestran que el tratamiento con cáscara de plátano logró cumplir con el estándar de turbidez ($3.8 \text{ NTU} < 5 \text{ NTU}$), representando un avance significativo hacia la potabilización del agua. Sin embargo, la concentración de hierro total se mantiene por encima del límite permisible, requiriendo tratamientos complementarios como oxidación-precipitación o filtración avanzada.

La eficiencia de remoción de turbidez obtenida (96.8%) es superior a la reportada en estudios similares con coagulantes naturales donde se alcanzaron remociones máximas del 59.6%, y comparable con estudios recientes que reportan eficiencias del 93.5% en el tratamiento de aguas municipales.

Figura 1

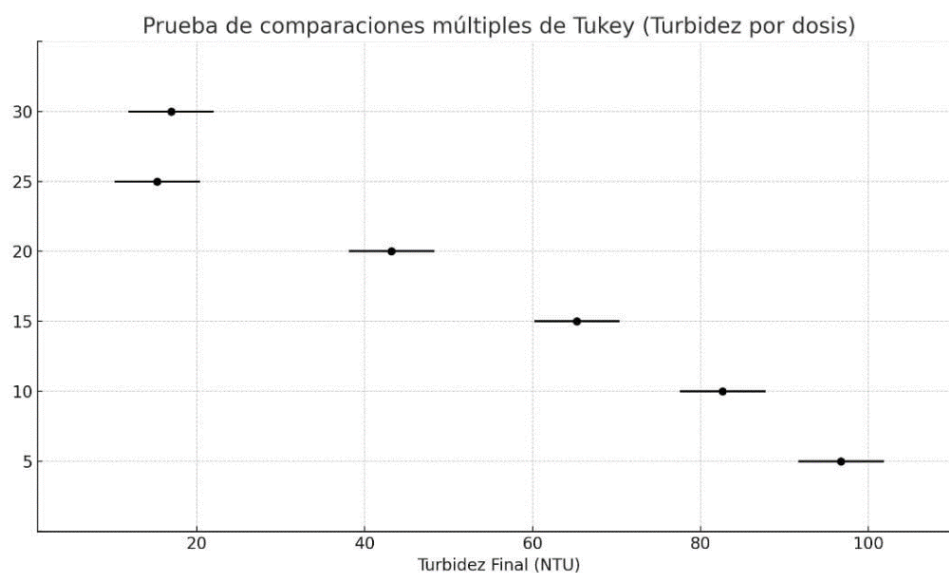
Comparación tipo ANOVA, muestra los valores promedio de cada parámetro para el agua cruda y el agua tratada.



Nota: La figura muestra las barras de error indican la desviación asociada a cada medición. Se observa una reducción significativa de la turbidez y el hierro total después del tratamiento, aunque este último aún supera el límite establecido por el ECA-A1. El pH y el oxígeno disuelto se ajustan dentro de los rangos aceptables, evidenciando una mejora en la calidad del agua tras el proceso de tratamiento.

Figura 2

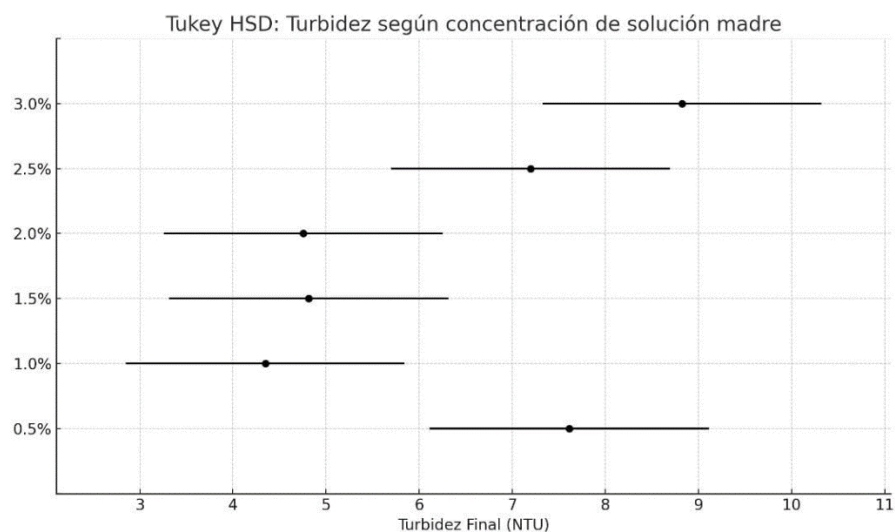
Comparacion de medidas mediante la prueba de Tukey segun la dosis del cuagulante



Nota: La figura muestra las diferencias estadísticas entre las distintas dosis de cáscara de plátano (5 a 30 mg/L) respecto a la turbidez final. Se observa que la dosis de 25 mg/L logra una reducción significativamente mayor comparada con dosis menores, mientras que la dosis de 30 mg/L no mejora la eficiencia, evidenciando un punto de saturación.

Figura 3

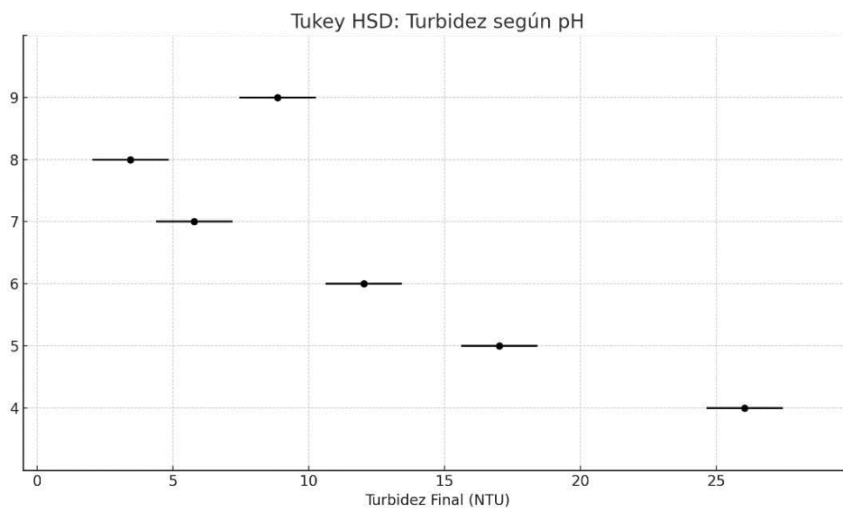
Comparación de medias mediante la prueba de Tukey según el pH del tratamiento



Nota: El análisis de Tukey evidencia que el pH 8 presenta una diferencia significativa respecto a otros niveles de pH, con la mayor eficiencia de remoción de turbidez. Se confirma así que condiciones ligeramente alcalinas optimizan el proceso de coagulación con cáscara de plátano.

Figura 4

Comparación de medias mediante la prueba de Tukey según la concentración de solución madre



Nota: Se observa que la concentración de solución madre al 1% proporciona una reducción de turbidez significativamente superior. Concentraciones por debajo o por encima tienden a ser menos eficientes, lo cual valida el valor óptimo identificado experimentalmente.

4. Conclusiones

La cáscara de plátano (*Musa paradisiaca* L.) demostró ser un coagulante natural altamente efectivo para la remoción de turbidez del agua del río Ayaviri, alcanzando una eficiencia máxima del 96.8% bajo condiciones óptimas de operación (pH 8, dosis 25 mg/L, concentración de solución madre 1%, tiempo de contacto 90 minutos). Esta eficiencia permitió reducir la turbidez inicial de 119 NTU a 3.8 NTU, cumpliendo con los estándares de calidad ambiental para agua potable establecidos en la normativa peruana.

El estudio de optimización paramétrica reveló que el pH es el factor más crítico en el proceso de coagulación, con un rango óptimo de 7-8 que favorece la desestabilización de partículas coloidales. La dosis óptima de 25 mg/L representa un punto de equilibrio entre eficiencia de remoción y economía del proceso, mientras que concentraciones superiores de coagulante pueden causar reestabilización de partículas.

La cáscara de plátano presenta ventajas significativas como coagulante natural: abundante disponibilidad local, bajo costo de producción, carácter biodegradable, ausencia de toxicidad y facilidad de preparación. Estas características la convierten en una alternativa sostenible y apropiada para comunidades rurales del altiplano peruano con limitaciones económicas y tecnológicas.

Para alcanzar la potabilidad completa del agua tratada, es necesario implementar etapas complementarias de tratamiento que incluyan procesos de oxidación-precipitación para la remoción de hierro y sistemas de filtración para garantizar la remoción de patógenos. La integración de estos procesos en sistemas de tratamiento descentralizados puede contribuir significativamente al acceso al agua segura en zonas rurales vulnerables.

Los resultados obtenidos establecen las bases científicas para el desarrollo de tecnologías apropiadas de tratamiento de agua basadas en recursos locales, contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible relacionados con el acceso universal al agua potable y el saneamiento.

5. Recomendaciones

Se recomienda evaluar la combinación de cáscara de plátano con otros coagulantes naturales disponibles localmente, como semillas de tuna (*Opuntia ficus-indica*) o almidón de papa nativa, para optimizar la eficiencia de remoción y reducir los costos operacionales.

Es fundamental realizar estudios piloto a escala comunitaria para validar los resultados de laboratorio y evaluar la viabilidad técnico-económica de sistemas de tratamiento descentralizados. Estos estudios deben incluir análisis de ciclo de vida y evaluación de impacto ambiental para asegurar la sostenibilidad del proceso.

Las investigaciones futuras deben enfocarse en la optimización de los tiempos de agitación rápida y lenta, la evaluación de la remoción de contaminantes emergentes y microorganismos patógenos, y el desarrollo de protocolos de capacitación para operadores comunitarios.

Se sugiere implementar programas de transferencia tecnológica que incluyan capacitación técnica, asistencia en la construcción de sistemas de tratamiento y seguimiento de la calidad del agua tratada para asegurar la sostenibilidad a largo plazo de estas tecnologías.

6. Referencias

- Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., Raghunandan, M. E., & Zakaria, Z. (2014). Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. *Journal of Environmental Sciences*, 26(11), 2178–2189. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2014.09.012>
- Tejada Tovar, C. N., Villabona Ortiz, A., Ortega Toro, R., Marta, M. A., & Licona Dager, N. (2020). Evaluación del uso de almidón de plátano como coagulante natural para la remoción de color y turbidez en agua para consumo humano. *Revista EIA*, 17(33), 1–8. <https://doi.org/10.24050/reia.v17i33.1359>
- Apandi, N. M., Muhamad, M. S., Tan, W. Y., Mohamed Sunar, N., & Nagarajah, R. (2023). Activated banana peel macrocomposite adsorbent for river water treatment: Isotherm and kinetic studies. *Water Practice & Technology*, 18(4), 753–770. <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.050>

7. Anexos

Anexo N° 1

Toma de muestra del lugar



Anexo N° 2

Análisis de la muestra del agua en el test de jarras

