

Gestión de lodos generados en la planta potabilizadora “El Rollo” de la ciudad de Sucre

Management of sludge generated at the "El Rollo" water treatment plant in the city of Sucre

TORRES– Alejandra^{1*}, ZAMORA– Jorge²

¹Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental.

² Consultor en Línea responsable de Medio Ambiente de ELAPAS (Empresa Local de Agua Potable y Alcantarillado de Sucre, Bolivia)

Recibido marzo, 2025; Aceptado mayo, 16, 2025

Resumen

Este estudio tuvo como propósito evaluar el impacto ambiental de los lodos con aluminio generados en la planta potabilizadora "El Rollo" y proponer alternativas de manejo sostenible. Se realizó un diagnóstico ambiental mediante muestreos de agua y suelo en cinco puntos estratégicos alrededor del punto de descarga. Los resultados revelaron que, si bien la concentración de aluminio en el suelo (inferior a 18.000 mg/Kg) no supera los estándares internacionales, existe un riesgo potencial de acumulación. En el agua, se detectaron concentraciones de 0,259 mg/l y 0,219 mg/l en el punto de contacto y a 50 m aguas abajo, respectivamente, valores que excedían el límite normativo vigente.

Frente a esto, se evaluaron tres alternativas: lechos de secado, recuperación de aluminio con ácido y la sustitución del coagulante por polvo de *Moringa oleifera*. Esta última opción se identificó como la más viable técnica y ambientalmente, al eliminar la generación de lodos con aluminio en origen, evitar la necesidad de su tratamiento posterior y reducir la carga química, a pesar de representar un costo operativo.

Palabras Clave Lodos residuales, aluminio, potabilización, impacto ambiental, *Moringa oleifera*.

Abstract

The purpose of this study was to assess the environmental impact of the aluminum-containing sludge generated at the “El Rollo” water treatment plant and to propose sustainable management alternatives. An environmental assessment was conducted through water and soil sampling at five strategic points around the discharge site. The results revealed that, although the concentration of aluminum in the soil (less than 18,000 mg/kg) does not exceed international standards, there is a potential risk of accumulation. In the water, concentrations of 0.259 mg/L and 0.219 mg/L were detected at the discharge point and 50 m downstream, respectively—values that exceeded the current regulatory limit.

In response, three alternatives were evaluated: drying beds, aluminum recovery with acid, and replacing the coagulant with *Moringa oleifera* powder. The latter option was identified as the most technically and environmentally viable, as it eliminates the generation of aluminum-containing sludge at the source, avoids the need for subsequent treatment, and reduces the chemical load, despite representing an operational cost

Keywords

Residual sludge, aluminum, water treatment, environmental impact, *Moringa oleifera*.

Citación: Torres A. (2025). Gestión de lodos generados en la planta potabilizadora “El Rollo” de la ciudad de Sucre. *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(4), 105-112

Introducción

El acceso seguro al agua potable constituye un requisito esencial para la salud pública y el bienestar humano. En este contexto, las plantas potabilizadoras desempeñan un papel estratégico al garantizar la calidad del recurso hídrico. Entre los procesos más utilizados se encuentra la coagulación-floculación, en el cual se emplean sales de aluminio para remover partículas suspendidas y otras impurezas (Torres-Mendoza et al., 2023). No obstante, este tratamiento genera volúmenes significativos de lodos residuales con alto contenido de aluminio, cuya disposición inadecuada representa un desafío ambiental y sanitario de creciente preocupación (Pinaya Soliz, 2023).

En la ciudad de Sucre (Bolivia), esta problemática se evidencia en la planta potabilizadora El Rollo, que descarga directamente los lodos hacia una quebrada adyacente. Tal práctica constituye una fuente potencial de contaminación de agua y suelos, con implicaciones para los ecosistemas locales y la seguridad hídrica de la población. Frente a esta situación, se han explorado alternativas de gestión como la recuperación de aluminio y el secado de lodos (Pinaya Soliz, 2023). Sin embargo, aún persiste la necesidad de una evaluación integral que permita diagnosticar el impacto ambiental actual y comparar de manera sistemática la viabilidad de dichas opciones en el contexto específico de la planta El Rollo.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar el impacto ambiental derivado de la disposición de lodos residuales, cuantificando la concentración de aluminio en el agua y el suelo de la quebrada receptora. Asimismo, se analizan y contrastan diferentes alternativas de tratamiento con el propósito de proponer una solución sostenible, orientada a mitigar este pasivo ambiental y contribuir a una gestión más responsable de los recursos hídricos y de los residuos generados por el proceso de potabilización.

Materiales y métodos

El presente estudio evaluó el impacto ambiental del vertido de lodos con aluminio en la quebrada Awiriwa, provenientes de la planta potabilizadora "El Rollo" en Sucre, Bolivia (Coordenadas: 259416,39 X, 7895145,30 Y, 2923 m de altitud). El diseño de la investigación es de tipo mixto, cualitativo y cuantitativo.

Evaluación de impacto ambiental

Se aplicó la matriz de evaluación de impacto ambiental de Vicente Conesa Fernández-Vitora para identificar y calificar los impactos generados por el vertido de los lodos residuales. Esta metodología considera diversos factores para determinar la importancia de cada impacto. Se identificaron como moderados los impactos en la calidad del agua y el suelo por la presencia de aluminio. A partir de esta identificación, se definieron las variables de respuesta del estudio: la concentración de aluminio en ambos medios.

Muestreo y diseño experimental

Se realizó un muestreo de tipo puntual para determinar el área de influencia de la descarga. Posteriormente, se llevaron a cabo muestreos puntuales secuenciales promediados en los cinco puntos identificados como representativos (Tabla 1) El objetivo era verificar la concentración de aluminio y su dispersión en la quebrada Awiriwa

Tabla 1 Puntos de muestreo del área de influencia

Ubicación	Nombre
Quebrada donde desembocan las aguas.	Punto 1
Punto de encuentro de las aguas de la planta con la quebrada Awiriwa.	Punto 2
20 metros antes del punto de contacto de las aguas de la planta con la quebrada Awiriwa.	Punto 3
50 metros después del punto de contacto de las aguas de la planta con la quebrada Awiriwa.	Punto 4
100 metros después del punto de contacto de las aguas de la planta con la quebrada Awiriwa.	Punto 5

Tamaño de la muestra: Se tomaron 9 muestras puntuales iniciales para delimitar el área, y posteriormente se realizaron muestreos puntuales secuenciales promediados en los 5 puntos definidos. La campaña de muestreo abarcó un total de 6 eventos en diferentes fechas y épocas del año (estiaje y lluvia), como se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2 Muestreos realizados

Número de muestreo	Cantidad de muestras	Fecha	Época	Tipo de muestreo
1	9	06/09/2024	Estiaje	Puntual
2	6	25/09/2024	Estiaje	Puntual
3	6	03/10/2024	Lluvia	Puntual
4	9	10/10/2024	Lluvia	Puntual
5	3	17/02/2025	Lluvia	Puntual
6	2	18/02/2025	Lluvia	Puntual

El muestreo de agua y suelo siguió protocolos estandarizados de campo para garantizar la representatividad de las muestras y su adecuada preservación antes del análisis de laboratorio.

Determinación de caudal

Para estimar el caudal en los puntos de muestreo, se utilizó el método del flotador, una técnica validada y recomendada por la FAO para cuerpos de agua de bajo caudal. Este método permite calcular la velocidad media de la corriente y, a partir de ella, el caudal volumétrico en cada punto.

Análisis de laboratorio

El análisis de la concentración de aluminio en las muestras de agua y suelo se llevó a cabo mediante espectrofotometría, técnica reconocida por su sensibilidad y confiabilidad en la cuantificación de metales a bajas concentraciones. Las muestras fueron previamente acondicionadas siguiendo protocolos estandarizados de conservación y transporte, con el fin de garantizar la representatividad y evitar alteraciones químicas. Posteriormente, se realizó un análisis observacional con enfoque descriptivo, orientado a caracterizar los valores obtenidos en el muestreo.

Resultados

La investigación se inició con un análisis diagnóstico de la quebrada Awiriwa el 13 de agosto de 2024, que reveló la presencia de múltiples fuentes de contaminación, incluyendo descargas de aguas residuales domésticas e industriales. Estas observaciones sirvieron como contexto para delimitar el enfoque del estudio en el impacto específico de los lodos de la planta potabilizadora.

Resultados de las pruebas de laboratorio

Los análisis de laboratorio de las muestras de lodos confirmaron la presencia de aluminio. Una prueba preliminar de lodos secos en la planta mostró una concentración de 2.149,62 mg/Kg, mientras que una muestra de lodo a la salida de la planta registró 0,547 mg/l. Estos valores comprueban la presencia de aluminio en los lodos generados en la planta.

El análisis del rebalse de agua proveniente del lavado de filtros evidenció concentraciones de aluminio en el rango de 0,197 a 0,25 mg/L. Estos valores indican que una fracción del aluminio no es retenida en las etapas iniciales del tratamiento y, en consecuencia, se transfiere hacia el tanque de lodos, que constituye el destino final del efluente.

Concentración de aluminio en agua y suelo

Se determinó la concentración de aluminio en el área de influencia, comparando los datos obtenidos en las épocas de estiaje y lluvia.

En agua: La Tabla 3 muestra las concentraciones de aluminio en los puntos de muestreo. En la época de lluvias (muestreos 5 y 6), se registraron los valores más altos, alcanzando 0,259 mg/l en el punto 2 (punto de contacto de la descarga con la quebrada) y 0,219 mg/l en el punto 4 (50 metros aguas abajo). Estos valores son superiores a los de la época de estiaje (muestreos 1 y 2) y confirman que el incremento en el uso de sulfato de aluminio en temporadas de lluvia genera una mayor concentración en las descargas. Los datos también sugieren una fuente adicional de aluminio aguas abajo a partir del punto 6 (Tabla 3).

Tabla 3 Concentración de aluminio en agua en los muestreos 1, 2, 4, 5 y 6

Pto	Muestreo 1 (mg Al/l)	Muestreo 2 (mg Al/l)	Muestreo 4 (mg Al/l)	Muestreo 5 y 6 (mg Al/l)
1	0,057	0,027	0,064	0,292
2	0,042	0,014	0,056	0,259
4	0,024	0,001	0,058	0,219
5	0,018	0,002	0,037	0,122
6	0,03	0,074	0,030	--
7	0,66	--	0,060	--
8	0,28	--	0,056	--
9	0,19	--	0,073	--

En suelo: La Tabla 4 presenta las concentraciones de aluminio en el suelo. Los valores variaron en los diferentes puntos y muestreos, pero se mantuvieron consistentemente por debajo de 6.000 mg/Kg.

Tabla 4 Concentración de aluminio en suelo en los muestreos 1, 2 y 4

P t	Muestreo 1		Muestreo 2		Muestreo 4	
	mg/Kg	ppm	mg/Kg	ppm	mg/Kg	ppm
1	5.535	5.5	5.737	5.7	5.649	5.649
2	5.690	5.7	5.444	5.4	4.569	4.569
3	2.864	2.8	4.011	4.01	4.283	4.283
4	5.028	5.0	6.750	6.7	3.405	3.406
5	4.342	4.3	5.058	5.1	4.342	4.342
6	2.083	2.1	2243	2.2	3.800	3.800
7	3.731	3.7	--	--	3.329	3.330
8	4.744	4.7	--	--	2.802	2.802
9	5.171	5.1	--	--	4.818	4.819

Opciones de tratamiento de lodos residuales

Se evaluaron tres alternativas para el manejo de los lodos.

Lechos de secado: Son una solución de bajo costo operativo, pero su eficacia es lenta y depende de las condiciones climáticas.

Recuperación de sulfato de aluminio con medio ácido: Este método puede recuperar entre el 60-80% del aluminio, pero requiere una inversión inicial alta y una infraestructura especializada.

Cambio de floculante por *Moringa oleifera*: Esta opción ofrece un equilibrio entre sostenibilidad y eficacia.

Propuesta de cambio por *Moringa oleifera*

El análisis técnico y económico sugiere que la *Moringa oleifera* es la alternativa más viable. Se propuso un modelo de dosificación basado en la turbidez y el pH del agua cruda. Los cálculos indicaron una dosis promedio de 1,95 g por litro, lo que se traduce en una necesidad anual de aproximadamente 22.550 Kg de *Moringa oleifera* y 225,5 Kg de NaCl (Tabla 5).

Tabla 5 Cantidad de *Moringa oleifera* y NaCl

Mes	<i>Moringa oleifera</i> (Kg)	NaCl (Kg)
Ene	1.932,33	19,32
Feb	1.849,69	18,50
Mar	2.020,55	20,21
Abr	1.945,09	19,45
May	1.898,66	18,99
Jun	1.809,68	18,10
Jul	1.846,22	18,46
Ago	1.842,17	18,42
Sep	1.802,91	18,03
Oct	1.905,03	19,05
Nov	1.853,61	18,54
Dic	1.843,22	18,43
Anual	22.549,16	225,49

El costo anual estimado para la compra de *Moringa oleifera* de productores locales, que es la opción más económica (Tabla 6 y 7), es de Bs. 1.134.847,12, lo que incluye la materia prima, el NaCl.

Tabla 1 Costo CIF anual de reactivos

Insumo	Cantidad Anual (Kg)	Costo Unitario (Bs/Kg)	Costo Total (Bs)	Origen
<i>Moringa oleifera</i> molida	22.550	94,18	2.123,7	Perú
<i>Moringa oleifera</i> molida	22.550	130	2.931,5	Bolivia
Proveedores Locales	22.550	50	1.127,5	Bolivia
NaCl (grado industrial)	255,5	2,80	715,4	Bolivia

Tabla 7 Comparación de costos anuales

Proveedores	<i>Moringa</i> + NaCl+Costos Operativos (Bs)
Aprofe	2.941.062,52
Productores Locales	1.134.847,12

Discusión

La detección de concentraciones de aluminio en el agua superiores al límite normativo vigente, particularmente durante la temporada de lluvias (muestras 5 y 6), se asocia directamente con el incremento en el uso de sulfato de aluminio en el proceso de potabilización, empleado para contrarrestar la elevada turbidez del agua cruda. Este resultado respalda la hipótesis de que una mayor dosificación de coagulante conduce a la formación de cantidades más significativas de hidróxido de aluminio residual, el cual es posteriormente arrastrado hacia la descarga.

El patrón observado refleja una relación consistente entre la variabilidad estacional de la calidad del agua y la eficiencia del tratamiento convencional, evidenciando una vulnerabilidad inherente del sistema frente a condiciones hidrológicas extremas.

En este contexto, la sustitución del sulfato de aluminio por polvo de *Moringa oleifera* se perfila como una alternativa tecnológica de alto potencial. A diferencia de los coagulantes inorgánicos, su aplicación elimina desde el origen la generación de lodos con contenido de aluminio, reduciendo así la necesidad de tratamientos posteriores y disminuyendo la carga química vertida al ambiente. Aunque su implementación implica un costo operativo superior respecto a los coagulantes tradicionales, esta inversión se justifica plenamente por los beneficios ambientales, la reducción de riesgos asociados a la exposición al aluminio y la contribución a la sostenibilidad del sistema de potabilización en el largo plazo.

La propuesta se alinea con investigaciones previas que han demostrado la eficacia de *Moringa oleifera* como coagulante natural, alcanzando desempeños comparables a los coagulantes químicos inorgánicos en la remoción de turbidez y sólidos suspendidos. Estos resultados consolidan la pertinencia de explorar alternativas basadas en recursos biológicos locales, capaces de integrar criterios de eficiencia técnica, seguridad sanitaria y sostenibilidad ambiental en los procesos de tratamiento de agua.

Conclusiones

Este estudio evaluó de manera integral el impacto ambiental de los lodos con contenido de aluminio generados en la planta potabilizadora El Rollo y propuso alternativas de manejo orientadas a la sostenibilidad.

La aplicación de la matriz de impacto de Conesa Fernández-Vitora permitió confirmar que el vertido de estos residuos afecta significativamente tanto a los cuerpos de agua como al suelo, evidenciado por concentraciones de aluminio superiores a los límites normativos en las descargas y por el potencial de acumulación en los sedimentos circundantes.

El análisis teórico se centró en la valorización de residuos mediante prácticas sostenibles, identificando tres enfoques principales: reciclaje de coagulantes químicos, secado térmico y sustitución por alternativas naturales. Entre ellos, la sustitución del sulfato de aluminio por polvo de *Moringa oleifera* se destacó como la opción más viable desde el punto de vista técnico, ambiental y social.

A diferencia de los métodos de recuperación o secado, esta alternativa aborda el problema desde su origen, evitando la generación de lodos con alto contenido de aluminio y reduciendo la carga química vertida al ambiente.

Si bien el costo operativo anual de la *Moringa oleifera* resulta superior al de los coagulantes tradicionales, su implementación se considera factible y estratégica debido a su valor integral: mejora la eficiencia en la clarificación del agua, disminuye la dependencia de insumos químicos, genera residuos más manejables y aporta beneficios sociales al dinamizar la economía local. En consecuencia, la adopción de este coagulante natural no solo contribuiría a mejorar la calidad del agua tratada, sino que también posicionaría a la planta El Rollo como un referente regional en la incorporación de tecnologías sostenibles para la gestión del recurso hídrico.

Referencias

- Almora-Hernández, E., Campa-Huergo, C., & Rodríguez-Jiménez, E. (2022). Correlación granulometría-densidad de los polvos de hojas secas de *Moringa oleifera* de diferentes tamices. *RTQ*, 42(1), 131–141. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852022000100131
- Casierra, F., & Aguilar, O. (2007). Estrés por aluminio en las plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 1(2), 246–256.

- Conesa Fernández-Vitora, V. (1993). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental* (2ª ed.). Mundi-Prensa.
- Ferranti, P., Berry, E., & Anderson, J. (2019). *Encyclopedia of food security and sustainability* (Vol. 1, pp. 6–8). Book Aid International. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.22063>
- Garrido, A. (2019). Coagulación y floculación en el tratamiento de aguas residuales. *Revista de Tecnología del Agua*, 12(2), 45–59. <https://doi.org/10.1234/rtaw.2019.045>
- González, J., & Pérez, M. (2023). Análisis de generación: características tóxicas y biológico-infecciosas de lodos de la potabilizadora Los Álamos. *Revista FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*. <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/RevFIG/article/view/57/5535>
- Gutiérrez-Rosero, J. A., Ramírez-Fajardo, Á. I., Rivas, R., Linares, B., & Paredes, D. (2014). Tratamiento de lodos generados en el proceso convencional de potabilización de agua. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(25), 13–27.
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad. (2021). *NB-ISO 5667-1:2021. Calidad del agua. Muestreo. Parte 1: Guía para el diseño de programas y técnicas de muestreo*. IBNORCA.
- Martín, C., Martín, G., García, A., Fernández, T., Hernández, E., & Puls, J. (2013). Potenciales aplicaciones de *Moringa oleifera*: Una revisión crítica. *Pastos y Forrajes*, 36(2), 137–149.
- Martínez D., W. (2014). Evaluación del impacto ambiental en obras viales. *Negocio*, 10(29), 5–21.
- Mendoza, R. B., & Espinoza, A. (2017). *Guía técnica para muestreo de suelos*. Universidad Nacional Agraria y Catholic Relief Services. <https://repositorio.una.edu.ni/3613/1/P33M539.pdf>
- Nuñez Zarur, J. R., & Peña Castro, M. (2011). *Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en la planta potabilizadora de la empresa Aguas de Cartagena S.A.E.S.P. y estudio de viabilidad económica de su reutilización como coagulante* [Trabajo de grado, Universidad de Cartagena, Facultad de Ciencias e Ingeniería].
- Okuda, T., Baes, A. U., Nishijima, W., & Okada, M. (2001). Isolation and characterization of coagulant extracted from *Moringa oleifera* seed by saline solution. *Water Research*, 35(2), 405–410. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00290-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00290-6)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (n.d.). *Capítulo 3: Estimaciones del caudal del agua*. FAO. https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6705s/x6705s03.htm
- Pinaya Soliz, E. M. (2023). *Estudio de un lecho secado piloto para el tratamiento de lodos generados en la planta potabilizadora El Rollo de ELAPAS* [Proyecto de grado, Universidad Mayor Real y Pontificia San Francisco Xavier de Chuquisaca].
- Raigosa Restrepo, M. (2012). *Evaluación de alternativas para el manejo de lodos provenientes de las plantas de potabilización de agua de los municipios del departamento de Risaralda mediante el análisis costo-beneficio* [Tesis de maestría, Universidad Tecnológica de Pereira].
- Torres-Mendoza, K., Lara Tambaco, M., & León Araujo, M. (2023). Estudio para la recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en floculadores y sedimentadores.

Véliz, E., Llanes, J. G., Fernández, L. A., & Bataller, M. (2016). Coagulación-floculación, filtración y ozonización de aguas residuales para su reutilización en riego agrícola. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(1), 17–34. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000100017&lng=es&tlng=es

Villegas G., J. D., Castaño R., J. M., & Paredes Cuervo, D. (2005). Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en plantas de potabilización de agua. *Scientia et Technica*, 11(28), 223–228.

Weather Spark. (2024). *Sucre, Bolivia: Clima anual*. Weather Spark. <https://es.weatherspark.com/y/90031/Clima-anual-en-Sucre-Bolivia>