

Recovery of aluminum sulfate and utilization of sludge generated in the Cañete Water Treatment Plant

Olenka Franccesca, Aedo Mejía ¹ ; Luciana Andrea, Burga Beteta ² ; Marianella Isabell, Herbozo Perez ³ ; Daniela Alicia, Huamán Olarte ⁴ ; Renato Antonio, Barba Encarnación ⁵ 

Universidad Privada del Norte, Perú, n00318377@upn.pe, n00322996@upn.pe, n00341304@upn.pe, n00389264@upn.pe, renato.barba@upn.pe

Abstract—

The present study evaluated the recovery of aluminum sulfate ($Al_2(SO_4)_3$) from sludge generated at the Cañete Water Treatment Plant (PTAP) and the reuse of the treated residue in the production of handmade bricks. The research was conducted using a quasi-experimental and mixed approach, combining quantitative analyses—through atomic absorption spectrophotometry to measure the concentration of recovered aluminum and jar tests to determine turbidity removal efficiency—and qualitative analyses, observing color, floc formation, and sedimentation behavior. For coagulant recovery, the dried sludge was acidified with sulfuric acid (H_2SO_4 at 95%), reducing the pH from slightly alkaline values (7.32–7.48) to an acidic range of 2.13–3.27, which allowed the dissolution of aluminum species and the production of an effective coagulant. Acid digestion results showed an average recovered aluminum concentration of 0.0125 mg/L, with a recovery efficiency of up to 91.4% under conditions of pH $\approx$ 2.1 and 6.5 mL of H_2SO_4 , demonstrating the effectiveness of the process. The remaining sediment was dried, pulverized, and mixed with cement, sand, and water to produce handmade bricks through molding, setting, and curing. The recovered aluminum sulfate achieved a turbidity removal efficiency of 94.08%, higher than that of commercial coagulant (90.03%), confirming its technical viability. The bricks produced with recovered sludge exhibited an apparent density of 1.82 g/cm³, indicating good compaction and consistency. This study demonstrates the potential for sustainable sludge reuse, promoting circular economy practices, waste reduction, and the production of construction materials with acceptable physical properties.

Keywords ---- Activated sludge, aluminum sulfate, acidification, jar test, coagulant recovery, artisanal bricks

Recuperación de sulfato de aluminio y aprovechamiento de lodos generados en PTAP de Cañete

Olenka Francescesca, Aedo Mejía ¹; Luciana Andrea, Burga Beteta ²; Marianella Isabell, Herbozo Perez ³; Daniela Alicia, Huamán Olarte ⁴; Renato Antonio, Barba Encarnación ⁵

Universidad Privada del Norte, Perú, n00318377@upn.pe, n00322996@upn.pe, n00341304@upn.pe, n00389264@upn.pe, renato.barba@upn.pe

Resumen—

El presente estudio evaluó la recuperación de sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) a partir de lodos generados en la PTAP de Cañete y el aprovechamiento del residuo tratado en la fabricación de ladrillos artesanales. La investigación se desarrolló con un enfoque cuasi-experimental y mixto, combinando análisis cuantitativos, mediante espectrofotometría de absorción atómica para medir la concentración de aluminio recuperado y pruebas de jarras para determinar la eficiencia en la remoción de turbidez, y análisis cualitativos, observando color, formación de flóculos y sedimentación. Para la recuperación del coagulante, los lodos secos fueron sometidos a acidificación con ácido sulfúrico (H_2SO_4 al 95%), logrando reducir el pH de valores ligeramente alcalinos (7,32–7,48) a un rango ácido de 2,13–3,27, lo que permitió disolver las especies de aluminio presentes y obtener un coagulante eficaz. Los resultados de la digestión ácida evidenciaron una concentración promedio de aluminio recuperado de 0,0125 mg/L, con una eficiencia de recuperación de hasta 91,4 % bajo condiciones de pH $\approx$ 2,1 y 6,5 mL de H_2SO_4 , demostrando la efectividad del proceso. El sedimento restante se secó, pulverizó y mezcló con cemento, arena y agua, elaborando ladrillos artesanales mediante molde, fraguado y curado. Los resultados mostraron que el sulfato de aluminio recuperado presentó una eficiencia de remoción de turbidez del 94,08 %, superior al coagulante comercial (90,03 %), confirmando su viabilidad técnica. Los ladrillos fabricados con lodo recuperado presentaron una densidad aparente de 1,82 g/cm³, demostrando buena compactación y consistencia. Este estudio evidencia la posibilidad de reutilización sostenible de lodos, promoviendo economía circular, reducción de residuos y producción de materiales de construcción con propiedades físicas aceptables.

Palabras clave ---- Lodos activados, sulfato de aluminio, acidificación, prueba de jarras, recuperación de coagulante, ladrillos artesanales.

I. INTRODUCCIÓN

El agua potable es un recurso fundamental para el bienestar humano y el desarrollo sostenible de las sociedades. En el marco de la gestión de los recursos hídricos, las plantas de potabilización desempeñan un papel esencial, ya que a través

de una serie de operaciones físico-químicas y biológicas garantizan que el agua cruda obtenida de fuentes superficiales o subterráneas cumpla con los estándares de calidad establecidos por la normativa vigente para su consumo seguro [1]. En este proceso intervienen etapas como la captación, coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección, en las cuales se utilizan coagulantes químicos, siendo el sulfato de aluminio uno de los más empleados por su eficacia en la remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica [2]. Como consecuencia de estas operaciones, se generan lodos residuales aluminosos, que contienen altos niveles de sólidos, materia orgánica, restos de coagulante y, en algunos casos, trazas de metales. Estos lodos representan una problemática ambiental de gran relevancia, ya que su disposición inadecuada puede ocasionar impactos negativos acumulativos sobre los cuerpos de agua receptores, el suelo y los ecosistemas circundantes [3]. En muchos países, estos residuos se han clasificado como potencialmente peligrosos debido a sus características fisicoquímicas, entre las que destacan la corrosividad, toxicidad, inflamabilidad y reactividad, lo cual exige su manejo responsable bajo un enfoque de sostenibilidad [4].

En el caso particular de la planta de potabilización de agua en Cañete, la generación de lodos constituye un reto operativo y ambiental. Tradicionalmente, estos subproductos han sido considerados como desechos cuyo destino principal es la disposición final en canales, acequias o quebradas. Sin embargo, las tendencias actuales en gestión ambiental promueven la aplicación de principios de economía circular, en donde los residuos son concebidos como recursos con potencial de valorización [5]. En este sentido, los lodos residuales no deben percibirse únicamente como un pasivo ambiental, sino como una oportunidad para recuperar y reutilizar materiales de valor agregado como parte del proceso de potabilización [6]. En ese contexto, diversas investigaciones han demostrado que, a través de procesos de acidificación con ácido sulfúrico (H_2SO_4), es posible recuperar sulfato de aluminio de los lodos generados en plantas potabilizadoras [7]. Este compuesto, una vez clarificado y estabilizado, puede reincorporarse al ciclo de tratamiento del agua, reduciendo significativamente los costos operativos al disminuir la dependencia de la compra de coagulantes externos [8]. De igual forma, la recuperación del sulfato de aluminio contribuye a minimizar los volúmenes de

lodo a disponer, mitigando los impactos ambientales y generando beneficios económicos y sociales para las comunidades abastecidas [9]. Además del aprovechamiento químico, los lodos residuales tratados presentan un alto contenido de materiales arcillosos y silíceos, lo que los convierte en un insumo alternativo para la fabricación de ladrillos artesanales. Estudios recientes demuestran que, tras un adecuado proceso de secado, molienda y mezclado con arcilla, los lodos pueden incorporarse en proporciones variables para elaborar piezas de mampostería no estructural con propiedades físicas y mecánicas aceptables [10]. Este uso no solo reduce la cantidad de residuos enviados a disposición final, sino que también fomenta la producción de materiales de construcción sostenibles, alineados con los objetivos de desarrollo sostenible y la gestión integral de residuos sólidos [11]. El interés en la recuperación de coagulantes no es reciente. Ya en 1903, Jewell patentó un proceso para el tratamiento de agua y recuperación del coagulante a partir de la reacción del hidróxido de aluminio con ácido sulfúrico. Posteriormente, en 1987, Conwel reportó uno de los primeros ensayos en plantas de potabilización orientados a recuperar sulfato de aluminio, y hacia finales del siglo XX, estudios desarrollados en Brasil por Franci, Teixeira y Da Silva demostraron la viabilidad económica y técnica de la recuperación de este insumo en poblaciones de entre 20.000 y 50.000 habitantes [6]. En años más recientes, investigaciones en Colombia, Ecuador y Perú han reforzado la importancia de esta alternativa como una solución sostenible para la gestión de residuos en plantas de tratamiento [7][8][9].

De acuerdo con la normativa peruana, el Decreto Supremo N.º 015-2017-VIVIENDA establece lineamientos específicos para el reaprovechamiento de biosólidos y lodos, exigiendo parámetros de toxicidad química, higienización y estabilización para autorizar su uso seguro [4]. En este marco regulatorio, la recuperación de sulfato de aluminio y la fabricación de ladrillos artesanales a partir de lodos se alinean con las políticas ambientales y sanitarias del país, promoviendo una gestión integral del agua potable que no solo garantice la calidad del recurso, sino también la sostenibilidad de los procesos asociados [5]. La generación de lodos residuales en las plantas potabilizadoras constituye un desafío ambiental y operativo que ha cobrado cada vez mayor relevancia. En la planta de potabilización de agua en Cañete, este problema se evidencia en los lodos producidos durante las etapas de coagulación, floculación, sedimentación y filtración, los cuales contienen aluminio, materia orgánica y compuestos que, si no son gestionados adecuadamente, pueden ocasionar contaminación en fuentes hídricas, afectación de ecosistemas acuáticos y sobre costos en la operación, debido a la dependencia de sulfato de aluminio comercial. En ese contexto, surge la pregunta de investigación: ¿Es posible recuperar sulfato de aluminio a partir de los lodos generados en una PTAP de Cañete y aprovechar el residuo sólido remanente en la fabricación de ladrillos artesanales, garantizando su calidad y contribuyendo a la sostenibilidad del proceso de potabilización? Para dar respuesta a este cuestionamiento, el objetivo general de la investigación

es evaluar un proceso para la recuperación de sulfato de aluminio a partir de los lodos generados en una PTAP de Cañete y el aprovechamiento del residuo tratado en la elaboración de ladrillos artesanales, de manera que ambos productos puedan contribuir a la eficiencia operativa, la reducción de impactos ambientales y la promoción de una gestión circular del recurso hídrico.

II. METODOLOGÍA

1. Tipo de investigación

La investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo), con un diseño cuasi- experimental y alcance descriptivo. La fase cuasi- experimental consiste en la aplicación de variables controladas, como la dosificación de ácido sulfúrico para la recuperación de sulfato de aluminio a escala de laboratorio, sin alterar el funcionamiento de la planta. El alcance descriptivo permite caracterizar los lodos y definir las condiciones óptimas de recuperación. Cuantitativamente, se evalúan la concentración de iones solubles (Al^{3+}), la eficiencia de coagulación y las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión y densidad aparente) de los ladrillos artesanales fabricados con el lodo residual. Cualitativamente, se analizan los cambios físicos del proceso, tales como la coloración, formación de flóculos y velocidad de sedimentación.

2. Área de estudio

El muestreo de lodos se llevó a cabo en las instalaciones de la planta de tratamiento de agua potable (PTAP) de Cañete, ubicada en la provincia de Cañete, departamento de Lima, Perú ($13^{\circ}03'15.9''$ S, $76^{\circ}19'25.4''$ O).

3. Recolección y almacenamiento de muestras

La recolección se realizó el 14 de octubre de 2025 a las 14:40 h en el pozo de decantación de la PTAP, zona de concentración de los lodos residuales generados durante la sedimentación. Las muestras fueron extraídas a una profundidad de 10 m, transferidas a envases plásticos estériles previamente rotulados, y trasladadas de manera inmediata al laboratorio para evitar alteraciones fisicoquímicas. En total se recolectaron 4 L de lodo; de este volumen, 1 L se reservó para la caracterización fisicoquímica inicial y 3 L se destinaron a los ensayos experimentales de determinación cuantitativa del aluminio recuperado y su eficiencia en la remoción de turbidez.

4. Caracterización de los lodos

Antes de realizar los tratamientos experimentales, se llevó a cabo la caracterización fisicoquímica de los lodos con el propósito de conocer su composición inicial y establecer las condiciones de partida del material. Este procedimiento permitió identificar las principales propiedades del lodo y evaluar su potencial de transformación y comportamiento durante los ensayos posteriores. Las muestras fueron previamente homogeneizadas para garantizar su uniformidad y representatividad. Para ello, se agitaron las botellas plásticas que contenían el material mediante movimientos circulares controlados, con el fin de dispersar los sólidos sedimentados y obtener una mezcla más homogénea. Posteriormente, se

determinaron los principales parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto (OD), densidad, humedad, sulfatos. Estos análisis se realizaron en condiciones controladas, utilizando equipos previamente calibrados y aplicando procedimientos normalizados, con el fin de asegurar la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados obtenidos.

4.1. Determinación del pH y conductividad

Para la determinación del pH y la conductividad eléctrica en las muestras de lodos, se realizó una disolución en proporción 1:100 con agua destilada, con el objetivo de facilitar la medición y reducir las posibles interferencias ocasionadas por la elevada concentración de sólidos presentes en la muestra. Posteriormente, se procedió a preparar y calibrar el equipo multiparámetro. Una vez calibrado el equipo, se introdujeron los sensores correspondientes de pH y conductividad en la muestra disuelta, registrándose los valores obtenidos una vez que las mediciones se estabilizaron completamente. Cada parámetro fue medido por triplicado, con el fin de obtener un promedio representativo y minimizar errores experimentales. Este mismo procedimiento se aplicó de manera uniforme para la determinación de los demás parámetros fisicoquímicos analizados en el estudio.

4.2. Determinación de sólidos disueltos totales (SDT)

Para la determinación de los sólidos disueltos totales (SDT), se realizó previamente el enjuague de la sonda de conductividad con agua destilada y secada cuidadosamente con un paño limpio. Posteriormente, en el equipo multiparámetro se accedió al menú de configuración, cambiando el parámetro predeterminado de conductividad eléctrica al modo de sólidos disueltos totales (SDT). La muestra de lodo también fue disuelta en una proporción 1:100 con agua destilada, con el fin de optimizar la lectura y evitar interferencias por la alta carga de sólidos en suspensión. Finalmente, se procedió a sumergir la sonda en la muestra disuelta, registrándose el valor de SDT una vez que la lectura se estabilizó completamente.

4.3. Determinación del oxígeno disuelto (OD)

Para la determinación del oxígeno disuelto (OD) en las muestras de lodos activados, se inició con la calibración del sensor de OD del equipo multiparámetro. Para ello, se utilizó una botella de 300 mL, la cual fue llenada con agua destilada hasta aproximadamente tres cuartas partes de su volumen. Luego, el contenido fue agitado durante 20 segundos para favorecer la aireación del agua. Posteriormente, se introdujo el sensor de OD en la botella y se activó el equipo, dejándolo operar hasta que se indicara la finalización del proceso de calibración. Una vez calibrado el sensor, se procedió a preparar una muestra en proporción 1:100 con agua destilada, con el objetivo de obtener el volumen necesario para el análisis y reducir las interferencias. La mezcla fue agitada durante 20 segundos para asegurar una adecuada homogeneización y aireación. Finalmente, se sumergió el sensor de OD calibrado en la muestra disuelta, registrándose los valores obtenidos una vez que la lectura se estabilizó completamente.

4.4. Determinación de la densidad

Para la determinación de la densidad de la muestra de lodos activados, no fue necesario realizar ningún tipo de disolución, ya que el análisis se efectuó directamente sobre la muestra original. En primer lugar, se limpió y secó un vaso precipitado, verificando que no contuviera residuos ni humedad. Posteriormente, se registró la masa del vaso precipitado vacío utilizando una balanza analítica, obteniéndose un valor de 102.92 g. Luego, se añadieron 250 mL de la muestra de lodo activado al mismo recipiente y se volvió a registrar la masa total, que fue de 394.48 g. La masa de la muestra se obtuvo por diferencia entre el peso del vaso con la muestra y el peso del vaso vacío. Este procedimiento se realizó por triplicado ($n = 3$), utilizando muestras independientes del mismo lodo, con el fin de evaluar la reproducibilidad y precisión de las mediciones experimentales.

4.5. Determinación de la humedad

En primer lugar, para la determinación del contenido de humedad en las muestras de lodos activados, se registró la masa de un crisol limpio y seco (m_1) utilizando una balanza analítica previamente calibrada. Luego, se colocó una porción representativa de la muestra de lodo sin disolver en el crisol, registrándose nuevamente el peso total (m_2). Posteriormente, el crisol con la muestra fue introducido en la mufla de secado a una temperatura de 60 °C, manteniéndose durante 24 horas hasta alcanzar un peso constante. El inicio del secado se registró a las 20:04 horas, controlando la temperatura y el tiempo de exposición para garantizar la eliminación del agua libre sin alterar la materia orgánica del lodo. Una vez que la muestra se secó completamente, se procedió a pesar el material seco (m_3), registrando cuidadosamente los valores obtenidos. Este procedimiento se realizó por triplicado ($n = 3$), utilizando muestras independientes del mismo lodo, con el fin de garantizar la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados experimentales.

4.6. Determinación de sulfatos

Para la determinación de sulfatos, se tomaron 10 mL de la muestra y se mezclaron con 100 mL de agua destilada, agitando con una varilla de vidrio para asegurar una homogeneización uniforme. La mezcla se filtró al vacío con el fin de obtener un extracto claro y libre de sólidos en suspensión. Del filtrado, se tomaron 10 mL y se colocaron en una cubeta limpia, añadiendo el reactivo para sulfatos, utilizado para la formación del complejo coloreado que permite la lectura colorimétrica de sulfatos. La solución se agitó suavemente para favorecer la reacción y, tras un tiempo de espera aproximado de 5 minutos, la muestra se introdujo en el fotómetro para determinar la concentración de sulfatos (SO_4^{2-}) en mg/L.

5. Digestión del lodo activado

Con el propósito de asegurar la representatividad y uniformidad de la muestra, se aplicó la técnica del cuarteo en cuatro repeticiones consecutivas. Posteriormente, se pesó 1 g del lodo seco y se transfirió a un vaso precipitado. El vaso fue colocado dentro de la campana extractora, donde se adicionaron

10 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado al 95 %. A continuación, la muestra se sometió a calentamiento en una plancha a una temperatura inicial de 115 °C, la cual se redujo gradualmente a 90 °C, manteniéndose durante un periodo de 2 horas. Durante este tiempo se evitó la ebullición, observándose finalmente un cambio de color en la muestra, lo que indicó la finalización del proceso de digestión. Todo el procedimiento se llevó a cabo bajo condiciones controladas en la campana extractora. Una vez finalizado el proceso de digestión, la muestra fue filtrada y el filtrado obtenido se transfirió a un tubo plástico debidamente rotulado para su posterior análisis mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS). Este procedimiento tuvo como finalidad determinar la concentración inicial de aluminio presente en los lodos activados, sirviendo como punto de referencia para la evaluación de la eficiencia del proceso de recuperación.

6. Ensayos de tratabilidad

Para evaluar la recuperación del sulfato de aluminio, se realizaron ensayos de jarras en el laboratorio. Con el propósito de obtener una muestra representativa y minimizar posibles errores, se aplicó dos veces la técnica del cuarteo. Posteriormente, se colocaron 40 g de lodo seco en tres vasos precipitados de 600 mL, añadiendo 400 mL de agua destilada a cada uno, manteniendo una proporción de 1:10 (masa/volumen). Esta proporción se seleccionó siguiendo recomendaciones de estudios previos que emplean relaciones sólido-líquido controladas para optimizar la disolución de Al^{3+} , tales como Hassan Basri et al. (2019), quienes optimizaron la disolución de especies de aluminio en lodos de plantas de potabilización utilizando proporciones sólidas-líquidas controladas para maximizar la eficiencia de recuperación sin dilución excesiva, usando 300 g de lodo seco por 1000 mL de agua (300 g/L), demostrando que una dosificación definida de lodo y líquido facilita la homogeneización de la muestra y eficiencia del proceso de recuperación.

Las muestras fueron sometidas a agitación mecánica, primero a 40 rpm durante 30 minutos y luego a 100 rpm por 60 minutos, con el fin de favorecer la disolución de los compuestos de aluminio y la formación de sulfato de aluminio. Durante este proceso, se añadió progresivamente ácido sulfúrico (H_2SO_4 al 95 %) hasta alcanzar un pH entre 2 y 3, el cual fue verificado mediante un pH-metro digital al término del ensayo de jarras. Concluida la agitación, las muestras se dejaron en reposo durante una hora para permitir la sedimentación de los sólidos. Una vez separadas las fases, el sobrenadante fue sometido a un proceso de filtración doble: primero mediante embudo con papel filtro, y posteriormente mediante filtración al vacío utilizando una membrana, con el fin de obtener un filtrado libre de partículas finas. El filtrado final se transfirió a tubos plásticos debidamente rotulados para su análisis químico mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS), determinando así la concentración de aluminio recuperado. Por su parte, el sedimento remanente en las jarras fue secado para su posterior aprovechamiento en la elaboración de ladrillos, contribuyendo al uso sostenible de los residuos generados.

7. Análisis de aluminio recuperado

El líquido sobrenadante obtenido de cada jarra fue analizado mediante espectrofotometría de absorción atómica (AAS), con el propósito de determinar la concentración de iones de aluminio (Al^{3+}), expresada en mg/L. Este análisis permitió cuantificar la cantidad de aluminio remanente en la fase líquida tras el proceso de coagulación-floculación y, de este modo, evaluar la eficiencia del tratamiento aplicado.

8. Comparación del sulfato de aluminio recuperado con el comercial

Para evaluar la calidad y efectividad del sulfato de aluminio recuperado a partir de los lodos generados en la planta de potabilización de agua de Cañete, se realizó una comparación experimental entre dicho coagulante recuperado y un sulfato de aluminio comercial, empleado comúnmente en los procesos de clarificación del agua. El propósito de esta comparación fue determinar si el producto recuperado presenta características y comportamientos similares al coagulante convencional, y evaluar su potencial de reutilización dentro del proceso de potabilización. El experimento se llevó a cabo mediante la prueba de jarras, utilizando como muestra problema 3 litros de agua del río Surco (turbidez inicial = 21,53 NTU), que sirvió como agua cruda para el ensayo de clarificación. Se prepararon 7 vasos precipitados de 600 mL de capacidad, de los cuales 3 de ellos fueron destinados al tratamiento con sulfato de aluminio comercial, 3 al tratamiento con el coagulante recuperado y 1 como control sin adición de coagulante. En cada vaso se colocaron 400 mL de agua del río. Las dosis se establecieron en función de la eficiencia de remoción de turbidez observada durante los ensayos preliminares, identificándose diferentes volúmenes óptimos para cada coagulante. El sulfato comercial requirió volúmenes mayores (6, 12 y 18 mL) para lograr una remoción eficiente, mientras que el coagulante recuperado alcanzó una remoción superior y más rápida con volúmenes menores (2, 3 y 4 mL), a pesar de su baja concentración de Al^{3+} (0,0125 mg/L medida por AAS). Es por ello que, la comparación se basó en la capacidad real de clarificación más que en una equivalencia volumétrica o en una normalización estricta por concentración de aluminio, reflejando el comportamiento observado en el laboratorio.

Las muestras fueron sometidas a agitación mecánica mediante el equipo de prueba de jarras, iniciando con una agitación rápida de 120 rpm durante 1 minuto para asegurar la dispersión del coagulante y promover la desestabilización de las partículas coloidales. Posteriormente, se aplicó una agitación lenta de 20 rpm durante 20 minutos con el fin de favorecer la formación y el crecimiento de flóculos. Tras finalizar la agitación, las muestras se dejaron reposar durante 30 minutos para permitir la sedimentación de los sólidos formados. Una vez completado el proceso de decantación, se evaluaron parámetros como turbidez y pH con el objetivo de comparar la eficiencia de remoción de partículas suspendidas y la influencia del coagulante en la calidad del agua tratada. Esta comparación permitió determinar el grado de pureza, la similitud en el comportamiento de coagulación y la capacidad de clarificación

del sulfato de aluminio recuperado frente al producto comercial, aportando evidencia sobre su viabilidad para ser reincorporado en los procesos de potabilización.

9. Propuesta de reutilización

Una vez finalizada la prueba de jarras y analizado el sobrenadante que contenía el coagulante sulfato de aluminio, el sedimento remanente fue transferido a un recipiente metálico y secado en horno a 60 °C durante 24 horas. Tras comprobar que la muestra estaba completamente seca, se pulverizó manualmente con morteros para obtener un material fino y homogéneo. Este lodo seco se reutilizó como materia prima en la fabricación de ladrillos artesanales, combinándolo con cemento y arena. La formulación empleada consistió en 237 g de cemento, 237 g de arena, 120 g de lodo seco y 200 mL de agua, lo que en masa seca correspondió a 39,9 % de cemento, 39,9 % de arena y 20,2 % de lodo, con una relación agua/materiales (A/M) de 0,34, asegurando una mezcla homogénea, manejable y con la consistencia adecuada para el moldeado. Los materiales se mezclaron manualmente hasta obtener una masa uniforme, que fue vertida en moldes limpios y engrasados para su vibrocompactación. Los ladrillos fueron retirados cuidadosamente de los moldes para evitar fracturas y, durante el fraguado, se protegieron del sol y del viento durante 7 días, permitiendo la correcta hidratación del cemento. Posteriormente, se realizó el curado, humedeciendo los ladrillos tres veces al día durante 7 días consecutivos, manteniendo la humedad necesaria para un endurecimiento uniforme. Este procedimiento permitió transformar el lodo seco recuperado en un componente útil para la fabricación de ladrillos con cemento y arena, demostrando una reutilización efectiva y sostenible de residuos de tratamiento de agua.



Fig. 1 Sedimentación de lodos después de prueba de jarras

III. RESULTADOS

TABLA I

RESULTADOS DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DE LOS LODOS ACTIVADOS

Parámetros	Unidad	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Promedio
pH	---	7,35	7,42	7,51	7,43
CE	μS/cm	339	412	421	390,67
SDT	mg/L	206	207	207	206,67
OD	mg/L	7,12	6,92	6,93	6,99
Densidad	g/mL	1,17	1,18	1,16	1,17
Sulfatos	mg/L	126	128	130	128

La tabla presentada muestra los resultados promedios de los principales parámetros fisicoquímicos obtenidos en las muestras de lodos provenientes de la planta de potabilización de agua (PTAP), los cuales permiten evaluar su composición y comportamiento general. Todos los parámetros fueron determinados por triplicado y expresados como promedio, lo que permitió garantizar la reproducibilidad y confiabilidad de

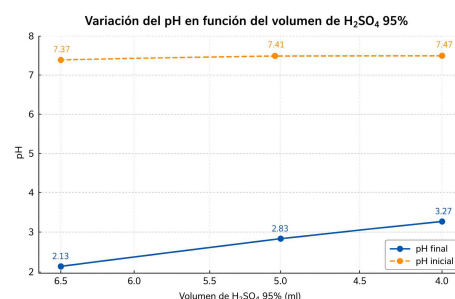
los resultados obtenidos. El pH promedio de 7.43 indica que el lodo tiene una naturaleza ligeramente alcalina, lo cual es característico de los procesos físico-químicos de tratamiento de agua potable, donde la neutralización del coagulante (sulfato de aluminio) mantiene un rango estable y no corrosivo. La conductividad eléctrica promedio de 390.67 μS/cm refleja una presencia moderada de sales disueltas y iones, lo que sugiere una concentración iónica equilibrada y una composición química estable, sin exceso de compuestos solubles que puedan afectar la eficiencia del proceso de clarificación o la posible recuperación del coagulante. En cuanto a los SDT, el valor promedio de 206.67 mg/L es indicativo de una baja a media carga de materia disuelta, común en lodos secundarios o activados en fase de sedimentación, donde la mayor parte de los sólidos se encuentra en suspensión o sedimentados. El oxígeno disuelto (OD) promedio de 6.99 mg/L demuestra una adecuada oxigenación del sistema, fundamental para el metabolismo aeróbico de las bacterias responsables de la degradación de materia orgánica. Este nivel sugiere que el lodo proviene de un sistema biológico con buena aireación y sin signos de anoxia. En conjunto, los resultados reflejan un lodo activado estable y biológicamente activo, con condiciones adecuadas para los procesos de tratamiento. Por otro lado, la densidad de la muestra de lodos activados, determinada a partir de las mediciones experimentales realizadas, presentó un valor promedio de 1.17 g/mL (1170 kg/m³). Este valor es característico de un lodo con contenido moderado de sólidos y confirma la consistencia del material analizado. Respecto a los sulfatos, se obtuvo un valor promedio de 128 mg/L. Esta concentración indica una presencia moderada de iones sulfato (SO₄²⁻) en la muestra, principalmente originados por el uso de sulfato de aluminio como coagulante durante el proceso de potabilización. Estos iones se generan a partir de la hidrólisis del coagulante y pueden permanecer en el lodo sedimentado o disolverse parcialmente en el agua tratada. El valor registrado se encuentra dentro del rango esperado para sistemas de tratamiento que emplean coagulantes a base de sales de aluminio, lo que sugiere que el proceso de coagulación y decantación fue eficiente, manteniendo una concentración estable de sulfatos sin alcanzar niveles críticos.

TABLA II

PORCENTAJE DE HUMEDAD PRESENTE EN LOS LODOS

Parámetro	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
Masa crisol (g)	100.38	100.42	100.35	100.38
Masa húmeda (g)	100.48	101.10	99.85	100.48
Masa seca (g)	22.72	23.05	22.40	22.72
Humedad (%)	77.38	77.20	77.56	77.38 ± 0.18

La tabla presenta los resultados obtenidos en la determinación del contenido de humedad de los lodos activados, realizada por triplicado con el fin de evaluar la reproducibilidad del método. Para cada ensayo se registraron las masas del crisol vacío, del crisol con la muestra húmeda y del crisol con la muestra seca, permitiendo calcular tanto la masa de agua eliminada como la masa de sólidos presentes en la muestra. Los valores de humedad obtenidos fueron 77.38 %, 77.20 % y 77.56 %, con un promedio de 77.38 ± 0.18 %, lo que



Gráfica 1 Variación de pH vs. volumen H₂SO₄ 95%

TABLE III

DOSIFICACIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO EN LAS MUESTRAS DE LODOS

Nº Muestra	pH inicial	Peso de lodos secos (g)	Volumen agua destilada (mL)	H ₂ SO ₄ 95% (mL)	pH final
1	7,32	40	400	6,5	2,13
2	7,45	40	400	5	2,83
3	7,48	40	400	4	3,27

La tabla presenta los resultados obtenidos en la prueba de jarras aplicada a los lodos activados, donde se buscó determinar el efecto de la acidificación sobre el pH de la mezcla para favorecer la recuperación del coagulante sulfato de aluminio. Inicialmente, los lodos presentaron un pH ligeramente alcalino, con valores entre 7.32 y 7.48, característicos de los residuos generados en procesos de coagulación con sales de aluminio. Para reducir el pH, se emplearon volúmenes crecientes de ácido sulfúrico (H_2SO_4 al 95 %) entre 4 y 6.5 mL, manteniendo constante la masa de lodo seco (40 g) y el volumen de agua destilada (400 mL). Se observó que, al aumentar la cantidad de ácido añadido, el pH final disminuyó progresivamente desde 3.27 hasta 2.13. Este comportamiento evidencia una relación directa entre la dosis de ácido y la acidez del sistema, mostrando que una mayor concentración de H_2SO_4 incrementa la disponibilidad de iones H^+ en la solución, lo que provoca la disolución de las especies hidroxiladas de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) presentes en los lodos. A valores de pH menores a 3, el aluminio se encuentra principalmente en su forma soluble (Al^{3+}), condición esencial para su recuperación y reutilización como coagulante en los procesos de potabilización de agua. Además, la acidificación no solo permite la liberación del aluminio, sino que además favorece la conservación del lodo tratado, ya que a pH bajos se inhibe la actividad microbiana y se evita la degradación orgánica o generación de olores indeseables durante el almacenamiento. En consecuencia, los resultados confirman que el rango de pH final alcanzado (2.13–3.27) fue el adecuado para garantizar tanto la estabilidad del material como la efectividad del proceso de recuperación del coagulante, optimizando la gestión y aprovechamiento de los lodos provenientes de la PTAP.



Fig. 2 Muestras de lodos activados durante la prueba de jarras

TABLA IV
EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DEL SULFATO DE ALUMINIO EN LOS
LADOS ACTIVADOS MEDIANTE LA PRUEBA DE JARRAS

Tratamiento	Nº Muestra	Promedio turbidez inicial (NTU)	Dosis (mL)	Promedio pH	Promedio turbidez final (NTU)	Eficiencia remoción turbidez (%)
Control	---	21,46	---	7,11	21,46	---
Al ₂ (SO ₄) ₃ comercial	A1	21,46	6	7,19	2,14	90,03
	A2		12			
	A3		18			
Al ₂ (SO ₄) ₃ recuperado	B1	21,46	2	6,81	1,27	94,08
	B2		3			
	B3		4			

La tabla muestra la comparación de los resultados obtenidos en la prueba de jarras utilizando agua del río Surco como muestra, bajo tres tratamientos distintos: control (sin coagulante), sulfato de aluminio comercial y sulfato de aluminio recuperado a partir de los lodos activados de la planta de tratamiento de agua potable. En el tratamiento control, sin adición de coagulante, el pH promedio fue de 7,11 y la turbidez final alcanzó 21,46 NTU, valor que corresponde a la turbidez inicial del agua utilizada en los ensayos. Estos resultados evidencian que, sin intervención química, la capacidad natural de sedimentación es limitada y el agua mantiene un nivel considerable de partículas suspendidas. Al aplicar sulfato de aluminio comercial, se observa un ligero aumento del pH promedio a 7,19, lo que indica que el coagulante no alteró significativamente las condiciones del medio. Asimismo, la turbidez disminuyó notablemente hasta 2,14 NTU, alcanzando una eficiencia de remoción del 90,03 % con respecto a la turbidez inicial del agua (21,46 NTU). Este resultado confirma la efectividad del coagulante comercial para la eliminación de partículas coloidales y la mejora de la calidad del agua. Por otro lado, el sulfato de aluminio recuperado presentó un pH promedio de 6,81, ligeramente más ácido que los demás tratamientos, lo cual puede atribuirse a la presencia residual de ácido sulfúrico empleado durante su proceso de recuperación. No obstante, mostró una turbidez final aún menor, de 1,27 NTU, lo que equivale a una eficiencia de remoción del 94,08 %, superior a la obtenida con el coagulante comercial. Estos resultados demuestran que el coagulante recuperado mantiene una alta capacidad de coagulación, comparable e incluso mayor que la del producto comercial. En síntesis, ambos coagulantes demostraron una reducción significativa de la turbidez del agua del río Surco respecto al control, siendo el sulfato de aluminio recuperado el tratamiento más eficiente. Estos resultados evidencian la viabilidad técnica y ambiental de reutilizar el

coagulante extraído de los lodos de la planta potabilizadora, promoviendo un enfoque de economía circular y sostenibilidad en los procesos de tratamiento de agua.



Fig. 3 Muestras de lodos activados después de la prueba de jarras

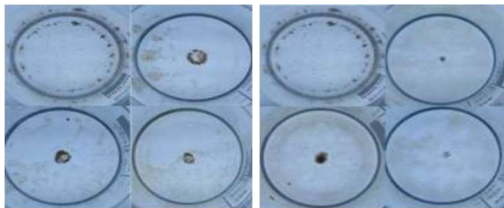


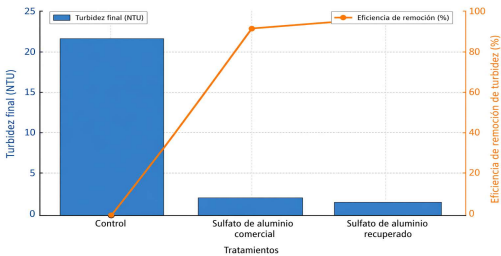
Fig. 4 Resultados del tratamiento con sulfato de aluminio comercial (Izq.) y recuperado (Der.) luego de la prueba de jarras

10. Concentración de Aluminio

Digestión ácida: Tras la lectura en el espectrofotómetro de absorción atómica (modelo novAA 800F), se determinó una concentración de 0.0140 mg/L de aluminio en la solución obtenida a partir de la digestión ácida del lodo seco. Este valor corresponde al aluminio que fue solubilizado y transferido a la fase líquida bajo las condiciones experimentales empleadas, ya que durante el proceso de digestión el ácido sulfúrico favorece la disolución de compuestos minerales y la liberación del aluminio en forma iónica (Al^{3+}).

Prueba de jarras: Con respecto al primer tratamiento de recuperación del coagulante, el cual presentó la mayor concentración de aluminio, en la fase líquida, entre las pruebas de jarras, alcanzando un valor de 0.0128 mg/L. Este resultado indica que las condiciones aplicadas durante el proceso favorecieron una mayor solubilización y liberación del aluminio contenido en los lodos, lo que se traduce en una recuperación más eficiente del coagulante. En el segundo tratamiento de recuperación, la concentración de aluminio obtenida fue de 0.0124 mg/L, ligeramente menor en comparación con el primer ensayo. Este resultado sugiere que, si bien las condiciones del proceso permitieron una recuperación efectiva del coagulante, la eficiencia fue moderadamente inferior, posiblemente debido a variaciones en parámetros como el pH, que pudieron influir en la solubilización del aluminio. Por último, el tercer tratamiento registró una concentración de 0.0122 mg/L, valor muy próximo a los anteriores. Esta similitud sugiere que el método empleado para la recuperación del coagulante es consistente y confiable, alcanzando concentraciones de aluminio que se aproximan casi al valor máximo teórico determinado por la digestión ácida (0.0140 mg/L). En conjunto, los tres tratamientos demuestran una alta eficiencia de recuperación, reflejando que el proceso de regeneración del sulfato de aluminio fue exitoso y replicable en condiciones controladas.

Eficiencia de recuperación: Una vez obtenidos los resultados de las concentraciones de aluminio antes y después de la prueba de jarras, se procedió a realizar los cálculos correspondientes para determinar la eficiencia del proceso de recuperación del sulfato de aluminio a partir de los lodos activados. Este análisis permitió cuantificar qué porcentaje del aluminio total presente en la muestra fue efectivamente recuperado durante el tratamiento.

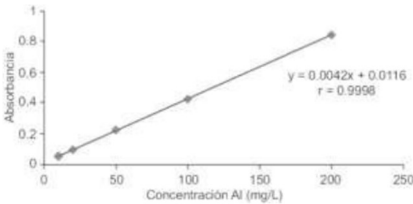


Gráfica 2 Concentración de Al^{3+} recuperado y eficiencia del proceso en función del pH y volumen de H_2SO_4 aplicado

TABLA V
 CONCENTRACIÓN DE Al^{3+} RECUPERADO Y EFICIENCIA DEL PROCESO EN FUNCIÓN DEL pH Y VOLUMEN DE ÁCIDO SULFÚRICO APLICADO

Nº Muestra	pH	Volumen de H_2SO_4 (mL)	Concentración de Al^{3+} recuperado (mg/L)	Eficiencia de recuperación respecto a la digestión ácida (%)
1	2,13	6,5	0,0128	91,4
2	2,83	5	0,0124	88,6
3	3,27	4	0,0122	87,2

Los resultados muestran que la recuperación de sulfato de aluminio a partir de los lodos de la PTAP fue más eficiente a pH bajos y con mayor volumen de ácido sulfúrico. La muestra 1, con un pH de 2,13 y 6,5 mL de H_2SO_4 , alcanzó la mayor eficiencia de recuperación (91,4%), mientras que al aumentar el pH a 3,27 y reducir el volumen de ácido a 4 mL, la eficiencia disminuyó a 87,2%. Esto se debe a que un medio más ácido favorece la solubilización del aluminio contenido en los lodos, permitiendo liberar mayor cantidad de iones Al^{3+} , mientras que a pH más altos el aluminio tiende a permanecer en forma insoluble. En conjunto, los resultados confirman que la digestión ácida con H_2SO_4 es un método eficaz para recuperar sulfato de aluminio, posibilitando su reutilización como coagulante en el tratamiento de agua y contribuyendo al aprovechamiento sostenible de los lodos generados.



Gráfica 3 Curva de calibración para la determinación de aluminio mediante espectrofotometría de absorción atómica

La gráfica muestra la relación lineal entre la absorbancia y la concentración de aluminio (Al^{3+}) obtenida a partir de soluciones patrón. La curva de calibración se construyó empleando cinco soluciones estándar en un rango de concentraciones de aproximadamente 10 a 200 mg/L. La

ecuación de la recta, $y = 0.0042x + 0.0116$, y el coeficiente de correlación $r = 0.9998$, indican una excelente linealidad y precisión en la calibración del equipo. Inicialmente, se intentó trabajar en un rango de 0 a 1 mg/L; sin embargo, se observaron inconsistencias en la señal analítica, incluyendo valores de absorbancia cercanos a cero o negativos, lo que impidió obtener una calibración lineal y reproducible en dicho intervalo. Por esta razón, se optó por emplear un rango de calibración mayor, el cual permitió asegurar una señal analítica estable y una adecuada linealidad del sistema, manteniendo valores de dispersión bajos ($RSD < 1\%$). Por tanto, esta curva fue utilizada como base para determinar la concentración de Al^{3+} recuperado en los ensayos experimentales de digestión ácida, permitiendo evaluar la eficiencia del proceso de recuperación de sulfato de aluminio.

Prueba de resistencia: Se realizó la prueba de compresión simple al ladrillo elaborado con lodo tratado de la PTAP de Cañete, cemento y arena, utilizando una prensa hidráulica Forney de laboratorio. Para ajustarse a la capacidad de los platos de carga del equipo de compresión, el ladrillo original fue seccionado, por lo que se ensayó un único espécimen representativo ($n = 1$).

TABLA VI
 DIMENSIONES DEL ESPÉCIMEN Y ÁREA DE CARGA

Datos del espécimen (cm)		Área de carga (cm²)	
Alto	3,5	$A = \text{largo} \times \text{ancho}$	106,95
Largo	11,5		
Ancho	9,3		

La carga se aplicó de forma progresiva hasta la rotura, registrándose una fuerza máxima de 13 123,8 kgf (128,7 kN), donde se observaron grietas iniciales a los 23 s y falla total a los 63 s, con fractura diagonal y zonas de aplastamiento en las esquinas, seguidamente se realizó el cálculo de resistencia a la compresión.

TABLA VII
 CÁLCULO DE CONVERSIÓN Y RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Datos del ensayo	Conversión de la fuerza P	Resistencia a compresión
Carga máxima	Pasar de kgf a Newtons:	$f_c = P / A$
13 123,8 kgf	$P = 13\,123,8 \times 9,81$	$f_c = 128\,701 / 0,010695$
Área de carga	$P = 128\,701\text{ N}$	$f_c = 12,03\text{ MPa}$
0,010695 m²		

Estructuralmente, el valor de 12.03 MPa supera la resistencia de los ladrillos artesanales tradicionales (3-10 MPa) y se posiciona dentro del rango de ladrillos prensados o de concreto no portante (7-15 MPa). Estos datos preliminares evidencian una excelente cohesión interna de la matriz cemento-arena-lodo, validando la viabilidad técnica del residuo y justificando futuras campañas de ensayo a mayor escala.



Fig. 5 Prueba de resistencia al ladrillo elaborado con lodos activados de la PTAP

Densidad Aparente: Para la determinación de la densidad aparente, se evaluó el único espécimen empleado en los ensayos mecánicos ($n = 1$). La muestra de ensayo presentó dimensiones de 11,5 cm de largo, 9,3 cm de ancho y 3,5 cm de altura, registrando una masa de 631 g antes del ensayo de compresión. A partir de estas dimensiones, se determinó un volumen efectivo de 374,33 cm³.



Fig. 6 Resultados de resistencia en la máquina Forney al espécimen de ladrillo

TABLA VIII

DIMENSIONES DEL ESPÉCIMEN Y CÁLCULO DE LA DENSIDAD

Datos del espécimen	Fórmula aplicada	Resultado
Masa (m): 631 g	$d = m / v$	1,69 g/cm³
Volumen (v): 374,33 cm³	$d = 631 / 374,33$	

La densidad aparente se calculó mediante la relación directa entre la masa y el volumen, resultando en un valor de 1,69 g/cm³. Este resultado indica que el espécimen presenta una densidad adecuada, ubicándose en un rango óptimo que demuestra que la incorporación del lodo residual se integró correctamente en la matriz de cemento y arena, manteniendo la ligereza y consistencia necesarias para la fabricación de ladrillos artesanales, contribuyendo a un enfoque de economía circular y sostenibilidad.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al comparar los resultados de la acidificación de los lodos en este estudio con los obtenidos por Gamarra Román y Romero Lanasque (PTAP Huancayo), se observa que ambos muestran la misma tendencia: a mayor volumen de ácido sulfúrico (H_2SO_4 al 95 %), el pH disminuye de valores ligeramente alcalinos a un rango ácido, permitiendo la disolución del aluminio. Sin embargo, existen diferencias cuantitativas debido a las condiciones experimentales. En el estudio de Huancayo, se lograron pH finales de 2,0–3,0 con volúmenes de ácido entre 0,3 mL y 2,3 mL por 250 mL de lodo, mientras que, en este estudio, para alcanzar pH de 2,13–3,27 se necesitaron volúmenes de ácido mayores, entre 4 y 6,5 mL para 40 g de lodo seco disuelto en 400 mL de agua. Esto indica que los lodos de Cañete presentan una mayor capacidad tampón, requiriendo más ácido para lograr niveles de pH similares. A pesar de estas diferencias, ambos estudios confirman que un pH inferior a 3 es suficiente para solubilizar las especies de aluminio (Al^{3+}) y garantizar la recuperación efectiva del coagulante. Por lo tanto, los resultados de este estudio son consistentes con los hallazgos previos, adaptándose a las características particulares de los lodos de la PTAP de Cañete. En cuanto al caracterización de los lodos, según los resultados reportados por Villegas et al. (2005), el pH promedio de los

lodos activados fue de $6,5 \pm 0,2$, indicando que sus lodos eran ligeramente ácidos a neutros. En cuanto al contenido de humedad, los lodos presentaron valores extremadamente altos, con porcentajes cercanos a $99,2 \% \pm 0,7 \%$, lo que evidencia que casi toda la masa del lodo correspondía a agua y que la fracción de sólidos era muy baja. En comparación, los lodos de la PTAP de Cañete presentaron un pH ligeramente más alcalino, entre 7,32 y 7,48, y un contenido de humedad menor, de 77,38 %, lo que indica una mayor proporción de sólidos secos y una menor retención de agua. Esto significa que los lodos de Cañete son más compactos y con menor densidad líquida, lo que puede influir en la eficiencia del proceso de acidificación y recuperación de sulfato de aluminio. Al comparar los resultados obtenidos en este estudio sobre la concentración de aluminio, con los reportados por Gamarra Román y Romero Lanassque (2019) en su investigación “Evaluación de la recuperación de aluminio en medio ácido de los lodos generados en una planta de tratamiento de agua potable”, se observa una tendencia coincidente respecto al efecto del pH ácido en la solubilización del aluminio. En dicho estudio, al disminuir el pH de 7,3 a valores cercanos a 2, la concentración de Al^{3+} en el sobrenadante se redujo progresivamente desde aproximadamente 215,50 mg/L hasta 0,68 mg/L tras 45 minutos de mezcla, mientras que el volumen de lodo se contrajo de 250 mL a 22 mL, indicando una fuerte disolución de los compuestos sólidos de aluminio. Asimismo, a pH 2,5, la concentración de aluminio soluble alcanzó 12,83 mg/L con un volumen final de lodo de 32 mL, y a pH 3, los valores se mantuvieron entre 32 y 60 mg/L con volúmenes de 32– 39 mL, demostrando que la eficiencia de recuperación disminuye a medida que el pH aumenta.

TABLA IX
VARIACIÓN DEL VOLUMEN DE LODO Y CONCENTRACIÓN DE ALUMINIO
SOLUBLE (Al^{3+}) EN FUNCIÓN DEL pH Y TIEMPO DE MEZCLA

pH lodo	Tiempo de mezcla (min)	Volumen de lodo (mL)	Concentración de Al^{3+} (mg/L)
2	0	250	215,50
2	15	85	16,20
2	30	52	2,20
2	45	22	0,68
2,5	0	250	215,50
2,5	15	110	18,80
2,5	30	106	15,80
2,5	45	12	12,80
3	0	250	215,50
3	15	127	78,10
3	30	109	36,10
3	45	59	37,05

De forma similar, en nuestros resultados experimentales se obtuvo una eficiencia máxima del 91,4 % a un pH de 2,13, disminuyendo ligeramente a 88,6 % y 87,2 % en pH de 2,83 y 3,27, respectivamente. Esta correspondencia confirma que el rango de pH entre 2 y 3 es el más adecuado para promover la liberación de aluminio desde los lodos activados, favoreciendo

la formación de Al^{3+} soluble y permitiendo una recuperación eficiente del sulfato de aluminio. En conjunto, ambos estudios evidencian que la acidificación controlada con H_2SO_4 constituye un método viable y efectivo para la reutilización del coagulante, contribuyendo a la reducción de residuos y al aprovechamiento sostenible de los subproductos del tratamiento de agua. Por último, referente a las pruebas realizadas con el ladrillo elaborado con lodo de PTAP, alcanzó una resistencia a compresión de 12.03 MPa, valor que se ubica dentro del rango de los ladrillos prensados o de concreto (7–15 MPa) y por encima del de los ladrillos artesanales tradicionales (3–10 MPa). Dado su uso previsto en muros no portantes, el material se considera una unidad de albañilería de concreto no estructural, conforme a la NTP 399.601 (INACAL, 2018) y la Norma E.070 Albañilería (MINEM, 2006), que establecen los criterios para unidades de concreto utilizadas en muros de cerramiento o divisiones interiores. El valor obtenido supera el mínimo individual del Tipo 10 (≥ 8 MPa) y se aproxima al promedio del Tipo 14 (14 MPa) según la NTP 331.017, ubicándose entre ambos tipos. En el estudio de Martos (2022) en la UPN Cajamarca, se reportaron resistencias promedio de 7 a 13 MPa para ladrillos de concreto peruanos, mientras que López et al. (2025) obtuvieron entre 7.1 y 14.7 MPa en ladrillos elaborados con lodos residuales de plantas de tratamiento. En comparación, el resultado de 12.03 MPa se encuentra en el rango superior, lo que demuestra que la incorporación de lodo tratado no reduce la capacidad resistente del material y respalda su uso sostenible en muros no portantes dentro del marco de la economía circular.

V. CONCLUSIONES

El proceso de acidificación con ácido sulfúrico (H_2SO_4) permitió recuperar eficazmente sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$) a partir de los lodos residuales de la planta de tratamiento de agua potable de Cañete, alcanzando una eficiencia de remoción de turbidez del 94,08 %, superior a la del coagulante comercial (90.3%). Este resultado confirma que el producto recuperado puede reincorporarse al proceso de potabilización, reduciendo costos operativos y promoviendo el aprovechamiento de residuos industriales dentro del marco de la economía circular. La caracterización fisicoquímica de los lodos activados reveló que estos presentan condiciones óptimas para su tratamiento y valorización. —pH ligeramente alcalino (7,43), humedad del 77,38 % y densidad de 1,17 g/mL— características que facilitaron el proceso de digestión ácida y recuperación del coagulante. Dichos resultados reflejan la importancia de conocer las propiedades iniciales de los lodos para diseñar tratamientos eficientes, así como la posibilidad de establecer protocolos estandarizados de recuperación de metales y compuestos químicos en plantas potabilizadoras similares. El aprovechamiento del sedimento, posterior a la recuperación del coagulante, para elaborar ladrillos artesanales permitió comprobar el potencial de los lodos tratados como material alternativo en la industria de la construcción. Los ladrillos elaborados alcanzaron una densidad aparente de 1,82 g/cm³ y

resistencia a la compresión de 12,03 MPa, valores dentro del rango de los ladrillos prensados o de concreto y por encima de los ladrillos artesanales adicionales, demostrando su idoneidad para usos no estructurales y su contribución a la producción sostenible. En términos generales, el estudio constituye una contribución significativa al desarrollo de prácticas sostenibles en la gestión del recurso hídrico, demostrando que los lodos residuales, frecuentemente considerados como desechos problemáticos, pueden convertirse en fuentes de valor agregado mediante procesos de recuperación y reutilización. La implementación de esta metodología en plantas de tratamiento de agua no solo reduce la cantidad de residuos destinados a disposición final, sino que también fomenta la autosuficiencia operativa, disminuye la dependencia de insumos externos y mitiga los impactos ambientales. De esta manera, la investigación promueve la transición hacia modelos de economía circular, alineados con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y con las políticas nacionales de gestión ambiental del Perú.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Privada del Norte (UPN) por el respaldo institucional y las facilidades otorgadas para esta investigación. Asimismo, expresamos un especial agradecimiento al Prof. Gustavo Adolfo Sánchez Contreras por su valioso apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Mendoza Cañas, D. L., & Fajardo Mendieta, A. J. (2020). Alternativas de aprovechamiento de los lodos provenientes de plantas de tratamiento de agua potable y residual industrial. Universidad Industrial de Santander. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/03524966-2ce8-4ca7-82eb-a7ef73a5b390/content>
- [2] Nguyen, M. D., Thomas, M., Surapaneni, A., Moon, E. M., & Milne, N. A. (2022). Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. *Environmental Technology & Innovation*, 28, 102651. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102651>
- [3] Ruiz Rey, K., Murcia Suárez, J. y Sánchez Cortes, L. (2023). Propuesta para la recuperación del Sulfato de Aluminio a partir de lodos generados en la planta de potabilización Francisco Wiesner-Calera. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10882/12486>
- [4] Apaza Humpiri, B. J. (2024). Recuperación de aluminio (Al) a partir de los lodos generados en la planta potabilizadora de la empresa SEDAJULIACA S.A. por acidificación con ácido sulfúrico (H₂SO₄). Universidad Nacional Del Altiplano. <https://repositorio.unap.edu.pe/items/6d45ed25-40e5-44e7-812c-8a331431adcc>
- [5] Noir, J. O., & Roca Sallefranque, C. (2025). Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos de una planta potabilizadora: utilización y eficiencia en clarificación de aguas residuales. *Ciencia, Docencia Y Tecnología Suplemento*, 15(19). Recuperado a partir de <https://pcient.uner.edu.ar/index.php/Scdyt/article/view/2239>
- [6] Vargas Vélez, C. D., & Sánchez Ortiz, I. A. (2024). Recuperación de coagulante en lodo de PTAP y reúso para el tratamiento primario avanzado de aguas residuales. *Boletín Informativo CEI, Universidad Mariana*. <https://revistas.umariana.edu.co/index.php/BoletinInformativoCEI/article/view/4248>
- [7] Torres Lozada, P., Arango Vallejo, L., & Torres López, W. (2023). Evaluación del aprovechamiento de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la preparación de adobe como material de construcción sostenible. *Revista EIA*, 20(39), Reia3921, 1–18. <https://doi.org/10.24050/reia.v20i39.3921>
- [8] Gamarra Román, L., & Romero Lanasque, J. (2019). Evaluación de la recuperación de aluminio en medio ácido de los lodos generados en una planta de tratamiento de agua potable (Tesis de Ingeniería). Universidad Nacional del Centro del Perú. <https://repositorio.uncp.edu.pe/server/api/core/bitstreams/4b42aa7b-122e-4448-89a6-c742109db8f6/content>
- [9] Díaz Muñoz, D. A. (2017). Aprovechamiento del sulfato de aluminio] extraído a partir de los lodos generados en la planta de potabilización de agua “Casigana” de la EP-EMAPA-A, para la clarificación de agua [Trabajo de titulación, Universidad Técnica de Ambato]. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos. <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/b2b36794-b286-457f-ad88-2f582af05e90/content>
- [10] Paz Otiniano, D. (2025). Efecto del coagulante/floculante a partir de dos variedades de Manihot esculenta (yuca) en aguas contaminadas a escala de laboratorio, 2024 [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. <https://repositorio.unas.edu.pe/server/api/core/bitstreams/c9e4192e-8056-4eac-af05-328ae4404cd1/content>
- [11] Torres-Mendoza, K. E., Lara-Tambaco, R. M., & León-Araujo, M. E. (2023). Estudio para la recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en los floculadores y sedimentadores. *Ibero-American Journal of Engineering & Technology Studies*, 3(1), 278-302. <https://doi.org/10.56183/iberotechs.v3i1.601>
- [12] Nuñez Zarur, J. y Peña Castro, M. (2011). Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en la planta de potabilización del a empresa Aguas de Cartagena S.A. E.S.P. Y estudio de la viabilidad económica de su reutilización como coagulante. Universidad de Cartagena. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11227/125>
- [13] Conco Mejía, J. E. (2023). Remoción de aluminio con ácido sulfúrico en lodos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas San Miguel II, distrito de San Miguel-Lima-2022. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/6950>
- [14] Mora-León, A. G., Castro-Jiménez, C. C., Saldarriaga-Molina, J. C., García, E. F., & Correa-Ochoa, M. A. (2022). Aluminium recovered coagulant from water treatment sludge as an alternative for improving the primary treatment of domestic wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 346, 131229. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131229>
- [15] Hassan Basri, M. H., Mohd Zain, M. F., Ahmad, S. Z., & Ismail, M. (2019). Aluminium recovery from water treatment sludge under different dosage of sulphuric acid. *Journal of Physics: Conference Series*, 1349(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1349/1/012005>
- [16] Fouad MM, Razek TMA, El-Gendy AS. Repeated Aluminum Sulfate Recovery from Waterworks Sludge: A Case Study in El-Sheikh Zaid WTP. *Water Environ Res*. 2018 Dec 1;90(12):2030-2035. doi: 10.2175/106143017X15131012188150. PMID: 30538011.