

Evaluación del desempeño de alúmina sintetizada a partir de residuos de papel de aluminio como adsorbente para la remoción de tintes de aguas residuales

Julián Ramiro García Rodríguez

Silvia Marcela Lamus Niño

Directora

Diana Paola Duarte Duarte

Doctora en Ingeniería Química

Co-director

Fernando Viejo Abrante

Doctor en Ciencia y Tecnología de los Materiales

Escuela de Ingeniería Química

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Universidad Industrial de Santander

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Dedico este logro a Dios y a mis padres, Ramiro García y Ruyelena Rodríguez, por brindarme la oportunidad de convertirme en Ingeniero Químico y por hacer de este camino un proceso más sencillo, gracias a su apoyo incondicional y al amor que siempre me han ofrecido.

A mi hermano Cristian, por brindarme su mano en cada momento y darme las fortalezas necesarias para ser alguien grande.

A mi pareja, Sofía, por la confianza que siempre ha depositado en mí, por su gran amor y por su compañía constante a lo largo de mi carrera.

A todas las bonitas amistades que he tenido durante la carrera, las cuales permitieron que esto fuese una experiencia inolvidable.

A todos, muchas gracias y siempre estarán en mi corazón.

-Julián

A Dios, por concederme sabiduría y permitirme culminar con éxito esta etapa.

A mis padres, Jaime y Nora, quienes son mi razón de ser. Gracias por su amor infinito, su apoyo incondicional, sus sacrificios y entrega, que hoy me permiten cumplir mis sueños. Los amo.

A Marco, por su amor, complicidad y cuidados. Por ser paz y por alegrar mis días, incluso cuando las cosas se complicaban.

A mi Lacy, mi compañera de desvelos, risas y lágrimas, por caminar a mi lado cada día y darme felicidad.

A mi hermana Angie, por ser mi mayor ejemplo de valentía, y a toda mi familia, por creer en mí y motivarme a mejorar cada día.

A Sara, Melissa y a todos mis amigos, por su amistad sincera y por convertir mis días universitarios en lindos recuerdos.

Y a todas las personas que, sin importar el tiempo que compartimos, me brindaron ánimo para continuar.

-Silvia

Agradecimientos

De manera general, expresamos nuestro profundo agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la oportunidad de ampliar nuestros conocimientos y vivir experiencias que contribuyeron significativamente a nuestro crecimiento personal y profesional.

A nuestra directora, Diana Paola Duarte Duarte, por acompañarnos durante el desarrollo de este trabajo de investigación y estar siempre dispuesta a resolver nuestras inquietudes.

Al profesor Fernando Viejo, quien, a través de su conocimiento y orientación, hizo posible el acercamiento al apasionante campo de la investigación. Agradecemos la confianza depositada y el apoyo brindado en cada momento, el cual nos permitió ver a cada persona algo especial.

A nuestra compañera Daniela Vega, por ser esa mano derecha que siempre estuvo presente, no sólo para brindarnos una valiosa amistad y compartir consejos oportunos, sino también para guiarnos y acompañarnos en nuestro proceso de aprendizaje. Su apoyo, disposición y compañerismo hicieron de este camino una experiencia más enriquecedora.

A la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander por el apoyo brindado a lo largo de mi proceso de formación académica. De igual manera, agradecemos a los operarios del laboratorio de procesos, Luis Eduardo Carreño Pérez y Wilson Eduardo Carreño Soler, por su permanente disposición para colaborar y facilitar el acceso al material necesario para el desarrollo experimental. Asimismo, al ingeniero del laboratorio de procesos, Guillermo Acero Medina, por su valiosa ayuda y su servicio en el manejo del laboratorio que hicieron posible la ejecución de este trabajo de investigación.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Marco teórico y estado del arte	13
2. Objetivos	17
2.1 Objetivo general	17
2.2 Objetivos específicos	17
3. Metodología	18
3.1 Evaluación del efecto del pH y la temperatura de calcinación	18
3.1.1 Síntesis de alúmina a partir de residuos de papel aluminio	18
3.1.2 Caracterización del sólido precipitado	21
3.2 Evaluación del efecto de la temperatura de calcinación	22
3.2.1 Caracterización del material calcinado	22
3.3 Estudio del efecto del hierro sobre la capacidad de adsorción de la alúmina sintetizada.....	23
4. Resultados y Discusión	25
4.1 Influencia del pH sobre el rendimiento de producción de $\text{Al}(\text{OH})_3$	25
4.2 Influencia del número de lavados sobre la composición y pureza del $\text{Al}(\text{OH})_3$	29
4.3 Influencia de la temperatura de calcinación sobre las características fisicoquímicas y morfológicas de la alúmina sintetizada.....	30

4.4. Evaluación de la capacidad de adsorción de la alúmina sintetizada con tinte azul de metileno en solución acuosa	39
5. Conclusiones.....	42
6. Recomendaciones	43
Referencias.....	44

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Composición de la alúmina sintetizada en función del pH empleado en la etapa de precipitación (% peso y % at.).....	27
Tabla 2. Análisis SEM-EDX del precipitado obtenido a pH 10 con diferente número de lavados	29
Tabla 3. Composiciones de masa atómica y porcentajes en peso para diferentes temperaturas de calcinación del material precipitado	32
Tabla 4. Análisis BET de la alúmina sintetizada y comercial a diferentes temperaturas de calcinación	33
Tabla 5. Porcentaje cuantitativo elemental de alúmina sintetizada y calcinada a 450°C	37
Tabla 6. Concentraciones del tinte azul de metileno y porcentajes de adsorción en el transcurso de 24 horas para alúmina sintetizada y comercial	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Etapas metodológicas del proyecto	18
Figura 2. Preparación de alúmina a partir de papel aluminio	19
Figura 3. Efecto del pH en el rendimiento de producción de $\text{Al}(\text{OH})_3$	25
Figura 4. Análisis mediante SEM-EDX de la alúmina obtenida en función del pH empleado en la etapa de precipitación	26
Figura 5. Análisis térmico del precipitado de hidróxido de aluminio obtenido a partir de aluminio reciclado: a) Análisis TGA; b) Análisis DSC	30
Figura 6. Análisis térmico de alúmina comercial: a) Análisis TGA; b) Análisis DSC	31
Figura 7. (a) Distribución de tamaño de poro de la alúmina sintetizada a diferentes temperaturas de calcinación y (b) isothermas de adsorción–desorción de N_2	34
Figura 8. (a) Distribución de tamaño de poro de la alúmina comercial a diferentes temperaturas de calcinación y (b) isothermas de adsorción–desorción de N_2	34
Figura 9. Distribución del tamaño de partículas (a) y análisis del potencial zeta (b).....	37
Figura 10. Patrones DRX de alúmina sintetizada: a) sin calcinar y calcinada a temperaturas de: b) 350°C y c) 450°C durante 4 horas	38
Figura 11. Capacidad de adsorción de azul de metileno sobre las muestras de alúmina sintetizada y comercial.....	40

Resumen

Título: Evaluación del desempeño de alúmina sintetizada a partir de residuos de papel de aluminio como adsorbente para la remoción de tintes de aguas residuales*

Autor: Julián Ramiro García Rodríguez y Silvia Marcela Lamus Niño**

Palabras claves: Industria textil, papel aluminio reciclado, alúmina, azul de metileno, adsorción.

Descripción: La contaminación generada por la industria textil, asociado al uso de tintes con efectos tóxicos, cancerígenos y mutagénicos, constituyen un problema ambiental que afecta la fauna, la flora y representan un riesgo a la salud humana a través del consumo de agua contaminada o mediante la cadena alimentaria. Por tal razón, se evaluó la capacidad de remoción del colorante azul de metileno empleando alúmina sintetizada a partir de papel aluminio reciclado como alternativa sostenible para el tratamiento de aguas residuales textiles. La alúmina se obtuvo empleando digestión ácida del papel aluminio, precipitación en medio básico y tratamiento térmico. El material se caracterizó mediante SEM-EDX, TGA, DSC, BET, DLS, DRX y FRX. Se determinaron condiciones óptimas de síntesis a pH 10 y temperatura de calcinación de 450 °C. Los resultados evidenciaron la transición estructural de boehmita a γ -alúmina con el incremento de la temperatura de calcinación, obteniéndose características favorables para procesos de adsorción, como una distribución homogénea de mesoporos, un área superficial de 221,7 m²/g y un volumen de poro de 0,42 cm³/g, superiores a los de la alúmina comercial. Las pruebas de adsorción confirmaron que la alúmina sintetizada presenta mayor eficiencia en la remoción de azul de metileno respecto a la comercial, atribuida a sus características estructurales y a la presencia de hierro como dopante natural. Estos resultados demuestran el potencial del aluminio reciclado como materia prima para la obtención de materiales funcionales, contribuyendo a la valorización de residuos sólidos y a la mitigación del impacto ambiental de los efluentes textiles.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Diana Paola Duarte Duarte. Doctora en Ingeniería Química. Codirector: Fernando Viejo Abrante. Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales.

Abstract

Title: Evaluation of the Performance of Alumina Synthesized from Aluminum Foil Waste as an Adsorbent for Dye Removal from Wastewater*

Author(s): Julián Ramiro García Rodríguez y Silvia Marcela Lamus Niño**

Key words: Textile industry, recycled aluminum foil, alumina, methylene blue, adsorption.

Description: The pollution generated by the textile industry, associated with the use of dyes with toxic, carcinogenic, and mutagenic effects, constitutes an environmental problem that affects fauna and flora and represents a risk to human health through the consumption of contaminated water or through the food chain. For this reason, the removal capacity of the dye methylene blue was evaluated using alumina synthesized from recycled aluminum foil as a sustainable alternative for the treatment of textile wastewater. Alumina was obtained through acid digestion of aluminum foil, precipitation in a basic medium, and thermal treatment. The material was characterized by SEM-EDX, TGA, DSC, BET, DLS, XRD, and XRF. Optimal synthesis conditions were determined at pH 10 and a calcination temperature of 450 °C. The results revealed the structural transition from boehmite to γ -alumina with increasing calcination temperature, obtaining characteristics favorable for adsorption processes, such as a homogeneous mesopore distribution, a surface area of 221.7 m²/g, and a pore volume of 0.42 cm³/g, higher than those of commercial alumina. Adsorption tests confirmed that the synthesized alumina presents higher efficiency in the removal of methylene blue compared with commercial alumina, attributed to its structural characteristics and the presence of iron as a natural dopant. These results demonstrate the potential of recycled aluminum as a raw material for obtaining functional materials, contributing to the valorization of solid waste and the mitigation of the environmental impact of textile effluents.

* Degree Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Diana Paola Duarte Duarte. PhD in Chemical Engineering. Co-director: Fernando Viejo Abrante. PhD in Materials Science and Technology.

Introducción

A lo largo del tiempo, la industria textil ha incrementado su capacidad productiva, alcanzando en 2023 una fabricación de 115,9 millones de toneladas métricas de tejidos a nivel mundial (DNFI, 2024). Este dinamismo también se refleja en Colombia, donde el sector textil ha adquirido una importancia económica considerable, representando el 9,4% del Producto Interno Bruto (PIB) de la industria manufacturera y generando empleo para cerca de 600 mil personas en ese mismo año (Procolombia, 2023). Sin embargo, a pesar de su crecimiento y aporte económico, la industria textil enfrenta serios desafíos ambientales. Según un estudio realizado por la Comisión Europea, este sector ocupa el cuarto lugar entre los que generan mayor impacto ambiental, superado sólo por la industria de alimentación, el transporte individual y la construcción (Tukker et al., 2006).

Este impacto se relaciona directamente con los procesos de producción textil, los cuales requieren el uso intensivo de productos químicos, que incluyen colorantes, y grandes volúmenes de agua (Tinoco Gómez et al., 2011). Se estima que el consumo anual de agua en esta industria asciende a aproximadamente 79.000 millones de metros cúbicos. Esta elevada demanda de agua conlleva una problemática adicional: la industria textil es responsable de cerca del 20% de las aguas residuales industriales a nivel mundial (Zhu et al., 2022) que, en la mayoría de los casos, se vierten sin un tratamiento adecuado, contribuyendo significativamente a la contaminación de los cuerpos hídricos, una de las problemáticas ambientales más críticas en la actualidad.

En general, la mayor dificultad radica en la contaminación debida al proceso de coloración textil. En este proceso, se emplean colorantes sintéticos con estructuras moleculares aromáticas complejas, muy estables y difíciles de biodegradar, cuya producción mundial supera las 10.000 toneladas anuales [(Cardoso et al., 2016) (Al-Tohamy et al., 2022)]. Estos colorantes, al ser

utilizados en dilución durante el proceso de tintura, no se fijan completamente al textil, lo que provoca un desperdicio del 15% al 50% del colorante. Como resultado, las concentraciones de colorantes en las aguas residuales pueden alcanzar valores entre 100 y 500 mg/L (Zaruma et al., 2018).

En el contexto nacional, el Distrito de Bogotá y el Departamento de Antioquia, representan en conjunto más del 80% de la industria textil colombiana (Castro Pérez, 2018). En Bogotá, el sector de acabados textiles es responsable de la descarga de aproximadamente 1,5 millones de metros cúbicos de aguas residuales al año. Por su parte, en el Departamento de Antioquia, las fases de tejeduría y acabados generan vertimientos de 2,7 y 1,6 millones de metros cúbicos anuales, respectivamente (Ramírez, 2023).

Desafortunadamente, la mayoría de estos vertimientos generados durante el proceso de coloración no son tratados de manera adecuada antes de ser descargados al medio ambiente (Acuatécnica, 2017). Como consecuencia, los efluentes generados terminan causando peligros para los ecosistemas acuáticos, ya que los colorantes presentes pueden afectar gravemente la fauna y la flora (Dutta et al., 2024).

Por otro lado, la presencia de tintes sintéticos en los cuerpos de agua puede ocasionar efectos tóxicos para la salud humana a través del consumo directo o mediante la bioacumulación en la cadena alimentaria. Algunos de estos compuestos han sido asociados con propiedades cancerígenas y mutagénicas, lo que incrementa la preocupación por su liberación sin control en los recursos hídricos (Dutta et al., 2024). Un ejemplo, es el tinte sintético azul de metileno, utilizado en gran medida en la industria textil como colorante de lana, seda y algodón. Se trata de un tinte catiónico y orgánico (Oladoye et al., 2022), que ha sido objeto de numerosas investigaciones como molécula modelo para su eliminación en soluciones acuosas.

Las características fisicoquímicas de los tintes empleados, principalmente su elevada estabilidad y solubilidad, generan un gran desafío en la limpieza de cuerpos de agua contaminados, pues más allá de las grandes cantidades de aguas residuales, las tecnologías de tratamiento convencionales tales como la coagulación, floculación, tecnologías membranarias y métodos biológicos, suelen ser poco viables desde el punto de vista operativo, técnico y económico (Al-Tohamy et al., 2022).

Dentro de las tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con tintes textiles, la adsorción se presenta como un método alternativo, eficiente, de simple diseño, bajo costo y facilidad de operación. Además, es amigable con el medio ambiente, debido a que no se forman sustancias peligrosas durante el proceso (Aljeboree et al., 2017).

1. Marco teórico y estado del arte

La adsorción es un método que se basa en la transferencia de contaminantes de una solución hacia una fase sólida (Aljeboree et al., 2017), donde quedan atrapados o retenidos en la superficie del material. La sustancia que se adsorbe se llama adsorbato y el material que se emplea para su adsorción es el adsorbente. Dependiendo de las fuerzas de interacción entre el adsorbato y el adsorbente la adsorción puede ocurrir por medio de procesos de fisisorción y quimisorción. La adsorción física se produce por fuerzas de atracción electrostáticas o de tipo van der Waals entre el adsorbente y adsorbato, mientras que la quimisorción se produce por la formación de enlaces (iónico o covalente) (Valladares Cisneros et al., 2017).

La eficiencia del proceso de adsorción está influenciada por las condiciones del medio, como el pH y la temperatura, las características moleculares de los colorantes (grupos funcionales constitutivos), el tiempo de contacto, la naturaleza y concentración del adsorbente, el adsorbato y el disolvente, entre otros factores [(Valladares Cisneros et al., 2017) (Barrios Ziolo et al., 2015)].

Para el caso de la elección del adsorbente, se debe tener presente que el material cuente con elevada porosidad y área superficial que permitan alcanzar grandes capacidades de adsorción (Duany Timosthe et al., 2022). Los materiales ampliamente utilizados en la adsorción se caracterizan por tener grandes áreas superficiales que van desde 100 hasta 2000 m²/g (Geankoplis, 1998).

Entre estos, la alúmina se destaca como adsorbente por ser un óxido anfótero, que participa de reacciones ácido-base según el pH del medio (Sangor & Al-Ghouti, 2023). Esta característica le confiere una notable versatilidad, ya que le permite interactuar eficazmente con una amplia gama de contaminantes, tanto aniónicos como catiónicos. Además, no es tóxica, es químicamente estable y con una gran resistencia a la degradación química.

Es importante resaltar la existencia de distintas fases cristalinas de la alúmina dependiendo de su tratamiento térmico. En particular, la fase $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ se caracteriza por su porosidad y una elevada área superficial específica entre 300 y 1000 g/m^2 [(Sangor & Al-Ghouti, 2023) (Naik & Ghosh, 2009)], siendo adecuada para procesos de adsorción (Piña Perez, 2012).

Generalmente, la alúmina se obtiene a través del proceso Bayer, utilizando como precursor la bauxita, una roca rica en óxidos de aluminio (Cobo Quesada, 2005). Este proceso industrial requiere de altas temperaturas, lo que implica un alto consumo energético. Además, genera subproductos contaminantes, entre ellos los denominados “lodos rojos”, residuos altamente alcalinos que representan un desafío ambiental significativo (Rodríguez Comas, 2016).

Una alternativa de economía circular para la obtención de alúmina consiste en el aprovechamiento de aluminio reciclado como materia prima, empleando para ello el método de precipitación. Este método consiste en un tratamiento en cuatro etapas: lavado del papel aluminio, digestión en medio ácido, precipitación del hidróxido de aluminio y calcinación [(Ghulam et al., 2019) (Muñoz, 2025)]. Es particularmente atractivo para la valorización de residuos de papel aluminio provenientes de envases, envolturas y tapas de productos alimenticios ya que, actualmente, este tipo de residuos no presenta una ruta de reciclaje establecida, por lo que son llevados a rellenos sanitarios sin ningún tipo de tratamiento (Ghulam et al., 2019), lo que representa una pérdida significativa de recursos y la oportunidad desaprovechada de otorgarles un valor agregado.

En este sentido, se estima que en Bogotá más de 3.2 toneladas de aluminio se entierran anualmente (The Food Tech, 2016), gran parte de las cuales corresponde a residuos de papel aluminio. Esto deja en evidencia la oportunidad de utilizar papel aluminio reciclado como materia

prima en la producción de alúmina, lo que contribuiría a generar circularidad de los materiales y sería una ventaja de ahorro de recursos para el país.

En cuanto a la obtención de alúmina por el proceso de precipitación, se ha encontrado que existen dos factores importantes: el pH en la etapa de precipitación y la temperatura de calcinación. Diferentes estudios han encontrado que en valores de pH entre 7 y 9 se favorece el rendimiento de producción de alúmina, mientras que por encima de dichos valores se afecta negativamente el rendimiento [(Ghulam et al., 2019) (Sadoon Ahmedzeki et al., 2017)]. Por otra parte, la temperatura de calcinación es un factor crítico que afecta la porosidad del material. Se han identificado estudios en los que el tratamiento térmico consistió únicamente en un proceso de secado, obteniéndose una muestra de alúmina con un área superficial aproximada de 150 m²/g (Sangor & Al-Ghouti, 2023). Sin embargo, a temperaturas entre 400°C y 550°C se obtiene una alúmina con mayor área superficial, entre 240 y 280 m²/g, asociada a la formación de la fase γ -Al₂O₃, caracterizada por su estructura más porosa. No obstante, temperaturas superiores a este rango generan una disminución significativa del área superficial, debido al colapso de poros en la estructura del material [(Ghulam et al., 2019) (Sadoon Ahmedzeki et al., 2017) (Yi et al., 2009)].

Respecto a la aplicación de la alúmina en adsorción de tintes, múltiples estudios han reportado su alta eficiencia como adsorbente en una amplia variedad de tintes, entre los que se incluyen el azul de metileno, cristal violeta, fucsina básica, entre otros. En particular, para la eliminación del azul de metileno en dilución se han obtenido capacidades de adsorción dentro del rango de 57,81 a 175,43 mg/g [(Sangor & Al-Ghouti, 2023) (Porto Fernandes et al., 2021)].

Finalmente, es importante mencionar que el papel de aluminio suele contener impurezas principalmente de hierro en valores entre 0.5 y 1.0% en peso, lo que de alguna manera podría afectar en la capacidad de adsorción de tintes sobre la alúmina producida, ya que el hierro es

comúnmente utilizado como agente dopante para mejorar las propiedades de adsorción (Keshta et al., 2024) (Muñoz, 2025). Por consiguiente, es importante evaluar cómo la presencia de hierro en los adsorbentes basados en alúmina puede afectar el desempeño del material en la remoción del tinte de los cuerpos de agua.

Con base en lo anterior, este proyecto propone la adsorción como método para la remoción de un tinte textil, el azul de metileno, mediante el empleo de alúmina sintetizada a partir de aluminio reciclado. De este modo, no solo se plantea una solución al problema ambiental generado dentro de la industria textil, sino que también se presenta una alternativa de aprovechamiento de residuos para alcanzar dicho propósito, en concordancia con el concepto de economía circular.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño de alúmina sintetizada a partir de residuos de papel de aluminio como adsorbente para la remoción de tintes de aguas residuales.

2.2 Objetivos específicos

Determinar el efecto del pH y de la temperatura de calcinación en las características fisicoquímicas y morfológicas de la alúmina producida.

Estudiar el efecto de diferentes variables del proceso de síntesis en el desempeño de la alúmina sintetizada como adsorbente para remover el tinte azul de metileno en solución acuosa.

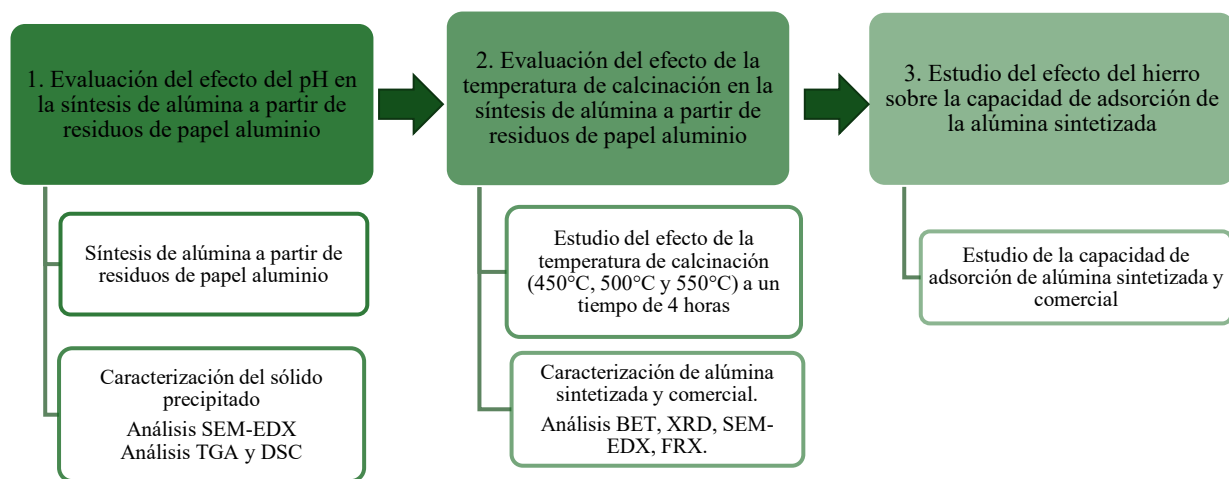
Analizar el efecto de la presencia de hierro como impureza en la alúmina sobre su capacidad de adsorción del tinte azul de metileno, mediante la comparación con el desempeño de una alúmina comercial.

3. Metodología

La Figura 1 presenta de forma general la metodología empleada para la realización este proyecto, incluyendo las etapas definidas con sus respectivas actividades, orientadas a alcanzar los objetivos propuestos.

Figura 1

Etapas metodológicas del proyecto.



Nota: Figura de elaboración propia.

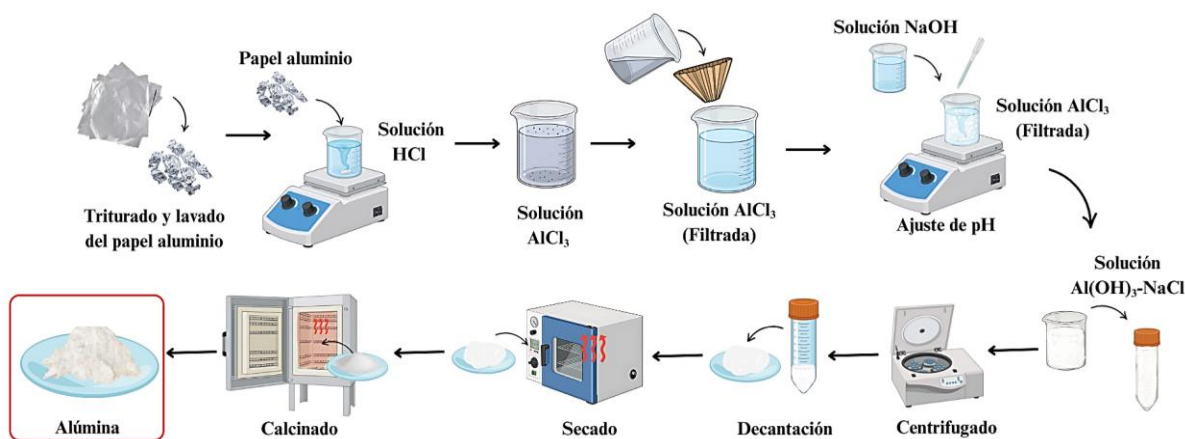
3.1 Evaluación del efecto del pH y la temperatura de calcinación

3.1.1 Síntesis de alúmina a partir de residuos de papel aluminio

Para la preparación de la alúmina a partir de residuos de papel aluminio, se llevó a cabo el procedimiento descrito por (Muñoz, 2025), realizado en el Laboratorio de Materiales de la Escuela de Ingeniería Química. El procedimiento consistió en cuatro etapas, ilustrado en la Figura 2.

Figura 2

Preparación de alúmina a partir de papel aluminio.



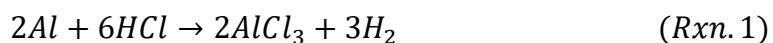
Nota: Figura de elaboración propia.

3.1.1.1 Trituración y lavado del papel aluminio

El papel aluminio se trituró en trozos pequeños cuadrados de aproximadamente 1 cm² y se lavó en solución jabonosa con agitación continua para remover cualquier resto de aceite o grasa. Posteriormente, se realizaron enjuagues con agua destilada para retirar el jabón y finalmente, el material se secó a temperatura de 105°C durante 4 horas, para garantizar la completa eliminación del agua en su superficie. Una vez seco, el papel aluminio se pesó utilizando una balanza analítica marca A&D, serie Orion, modelo HR-200, con resolución de 0.0001 g, con el fin de registrar su masa para el cálculo posterior del rendimiento de producción de alúmina.

3.1.1.2 Digestión del papel aluminio en medio ácido (HCl)

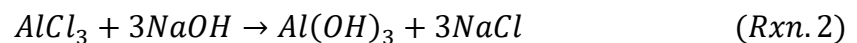
Los trozos de aluminio fueron sumergidos en una solución de HCl 3M, utilizando una razón molar HCl/Al de 6 para lograr la conversión completa del aluminio. Se mantuvo una agitación continua durante la reacción del aluminio y HCl. En esta etapa, el ácido clorhídrico (HCl) disuelve el papel aluminio para formar cloruro de aluminio (AlCl₃) e hidrógeno (H₂) (Rxn.1).



Posteriormente, la solución obtenida se filtró para eliminar cualquier impureza sólida presente.

3.1.1.3 Precipitación en medio básico: Influencia del pH sobre el rendimiento de producción de $Al(OH)_3$

Dentro del proceso de precipitación se llevó a cabo un estudio para evaluar el efecto del pH en la formación de hidróxido de aluminio ($Al(OH)_3$), trabajando a valores de pH entre 4 y 10. Para ello se preparó una solución con concentración 2,5M de hidróxido de sodio (NaOH). A la solución filtrada en el paso anterior se fue agregando solución de NaOH de forma continua hasta llegar al valor de pH deseado, empleando un medidor portátil de pH Starter 300, marca OHAUS, con una precisión de 0,01 unidades de pH. La adición de hidróxido de sodio (NaOH) produce la formación de hidróxido de aluminio ($Al(OH)_3$) como precipitado (Rxn.2) y cloruro sódico como subproducto de la reacción.



Una vez obtenido el precipitado para cada valor de pH trabajado, se procedió a separar las fases de cada muestra, mediante un equipo de centrifugación Heraeus Megafuge 16 (Thermo Scientific), a 5.000 RPM y un tiempo entre 5 y 15 minutos. A continuación, se procedió a decantar el sobrenadante. Con el fin de obtener una alúmina con alta pureza, se realizaron cuatro ciclos de lavado con agua destilada y centrifugado: en cada lavado, el sedimento se mezcló con agua destilada y se volvió a centrifugar bajo las mismas condiciones. Este proceso se repitió hasta lograr que el sobrenadante alcanzara un valor de cercano al pH del agua destilada, lo que explicaría que se ha eliminado gran parte de la sal presente (NaCl) en la solución inicial, así como del reactivo hidróxido de sodio (NaOH) en exceso.

Después de la etapa de lavado y decantación anterior, el hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) fue llevado a un proceso de secado en una estufa UNE 200, marca Memmert, a una temperatura de $105\text{ }^\circ\text{C}$ durante 4 horas, con el fin de eliminar cualquier resto de humedad en el material. Una vez seco, se realizó el pesaje del $\text{Al}(\text{OH})_3$ obtenido para determinar el rendimiento de la reacción.

Para el cálculo del rendimiento se utilizó la ecuación Ec.1 que expresa el rendimiento ($\varphi_{\text{Al}(\text{OH})_3}$) como una relación entre la masa de $\text{Al}(\text{OH})_3$ obtenida experimentalmente y la masa estequiométrica determinada a partir de las reacciones *Rxn.1* y *Rxn.2*.

$$\varphi_{\text{Al}(\text{OH})_3} = \frac{m_{\text{Al}(\text{OH})_3}^{\text{real}}}{m_{\text{Al}(\text{OH})_3}^{\text{estequiométrico}}} \times 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

donde, $m_{\text{Al}(\text{OH})_3}^{\text{real}}$ es la masa de $\text{Al}(\text{OH})_3$ seco obtenido experimentalmente de cada valor de pH y $m_{\text{Al}(\text{OH})_3}^{\text{estequiométrico}}$ es la masa estequiométrica.

3.1.2 Caracterización del sólido precipitado

A partir de las diferencias de tonalidades observadas en las muestras luego de realizado el proceso de secado, se decidió realizar un análisis mediante Microscopía Electrónica de Barrido acoplada a Espectroscopía de Rayos X por Dispersión de Energía (SEM-EDX), con el fin de cuantificar porcentualmente los elementos presentes y así estimar la pureza del material precipitado bajo cada condición de pH estudiada. En este análisis, la alúmina precipitada fue caracterizada empleando un microscopio QUANTA FEG 650 a condiciones de alto vacío y voltaje de aceleración de 30 keV , incluyendo la posibilidad de realizar análisis EDX semicuantitativo (Energy-Dispersive Spectroscopy) de composición elemental con ayuda de un detector EDAX APOLO X con resolución de 126.1 eV (en $\text{Mn K}\alpha$) empleando el software EDX Genesis.

Por otra parte, se realizó análisis termogravimétrico (TGA) de acuerdo con la norma ASTM E1131, utilizando un equipo marca TA-INSTRUMENT, modelo Discovery 5500. El procedimiento comenzó con una temperatura inicial de 25°C, aplicando una rampa de calentamiento de 10°C/min hasta alcanzar 900°C en una atmósfera de aire con un flujo de 50 mL/min. Posteriormente, se equilibró a 30°C hasta el final del ciclo de la prueba.

De forma complementaria, se efectuó un análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) utilizando un equipo TA – INSTRUMENT, modelo Discovery Series. El método empleado se realizó bajo la norma ASTM D3418-21; la muestra se desplazó con un flujo de aire de 50 mL/min. El calentamiento se realizó desde 25 °C hasta 400 °C con una rampa de 10 °C/min. Los análisis TGA y DSC permiten evaluar los cambios de peso del material y el flujo de calor asociados a las transformaciones del material en función de la temperatura, respectivamente, información clave para identificar los rangos de temperatura donde ocurren las transformaciones físicas o químicas y determinar la temperatura óptima de calcinación.

3.2 Evaluación del efecto de la temperatura de calcinación

En la segunda etapa metodológica se llevó a cabo el proceso de calcinación a tres temperaturas diferentes (450 °C, 500 °C y 550 °C) durante un período de 4 horas. Este procedimiento se realizó en una mufla multipropósito marca Industrias Terrígeno modelo D8.

3.2.1 Caracterización del material calcinado

La caracterización de la alúmina calcinada se realizó a partir de las isothermas de adsorción y desorción de nitrógeno, determinando el área superficial, el volumen y el tamaño de poro. El área superficial se obtuvo mediante el método Brunauer-Emmett-Teller (BET), mientras que el

volumen de poro se calculó empleando el método Barrett-Joyner-Halenda (BJH), mediante el equipo Micromeritics 3 Flex por fisisorción de nitrógeno (N₂) a -196.7 °C.

De forma adicional, se determinó el tamaño de partícula y el potencial zeta de las muestras utilizando dispersión dinámica de luz (DLS) en el equipo Litesizer DLS 700 (Anton Paar), obteniéndose información sobre el diámetro hidrodinámico y la carga eléctrica superficial de las partículas, respectivamente.

Posteriormente, con el objetivo de las fases presentes y la composición del material, se realizó análisis de difracción de rayos X (DRX) en un difractómetro de polvo BRUKER D8 ADVANCE con geometría DaVinci, operando a 40 kV y 40 mA, en un rango de 2θ entre 3° y 70°, utilizando radiación CuK α 1 y un detector lineal LynxEye. Asimismo, el análisis elemental cuantitativo se llevó a cabo mediante fluorescencia de rayos X (FRX) en un espectrómetro BRUKER S6 JAGUAR, operando entre 30 y 50 kV y 8 a 17 mA, con atmósfera de helio reducido, radiación Rh, detectores HighSenseXE y Flow counter, aplicando el método de análisis SMART-QUANT WD.

3.3 Estudio del efecto del hierro sobre la capacidad de adsorción de la alúmina sintetizada

En esta fase se evaluó la capacidad de adsorción de tinte azul de metileno por parte de la alúmina sintetizada, comparándola con una alúmina comercial. Para iniciar este estudio, fue necesario elaborar previamente la curva de calibración del azul de metileno utilizando un espectrofotómetro UV-Vis, en un rango de concentraciones entre 0 y 15 mg/L. Mediante la construcción de la curva de calibración se estableció la relación entre la absorbancia y la concentración del colorante, lo cual permitió cuantificar la cantidad de tinte adsorbido en las pruebas posteriores.

Continuando con el estudio, se prepararon 35 mL de una solución de azul de metileno con una concentración de 12,5 mg/L, a la cual se adicionó alúmina en una concentración de 50 g/L. Luego, en intervalos de tiempo durante un periodo de 24 horas, se tomaron muestras de cada prueba para medir su absorbancia mediante espectroscopía UV-Vis y determinar la cantidad de tinte adsorbido por la alúmina a lo largo del tiempo. Este procedimiento se aplicó tanto a la alúmina sintetizada como a la comercial, en condiciones de temperatura ambiente bajo agitación.

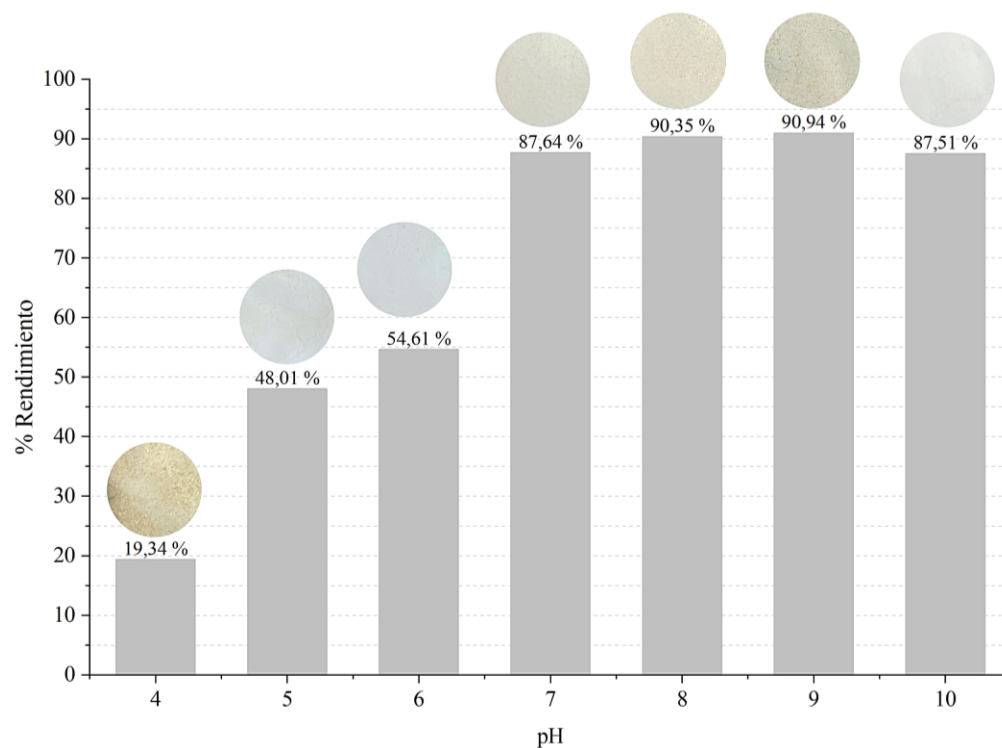
4. Resultados y Discusión

4.1 Influencia del pH sobre el rendimiento de producción de $\text{Al}(\text{OH})_3$

La Figura 3 muestra el efecto del cambio de pH durante la etapa de precipitación en el proceso de obtención de alúmina a partir de papel aluminio reciclado. Para ello, se calculó el rendimiento másico de $\text{Al}(\text{OH})_3$ obtenido tras el proceso de secado, utilizando la Ecuación 1 presentada en la sección de metodología. Se puede observar que el rendimiento de producción de $\text{Al}(\text{OH})_3$ aumenta con el incremento del pH alcanzando su valor máximo a pH 9 (90,94% peso). Posteriormente, se registra un ligero descenso en el rendimiento a pH de 10. Resultados similares fueron reportados por Ghulam et al. (2019), donde se describe un aumento en la formación de alúmina hasta pH 9, seguido de una reducción significativa a valores de pH superiores.

Figura 3

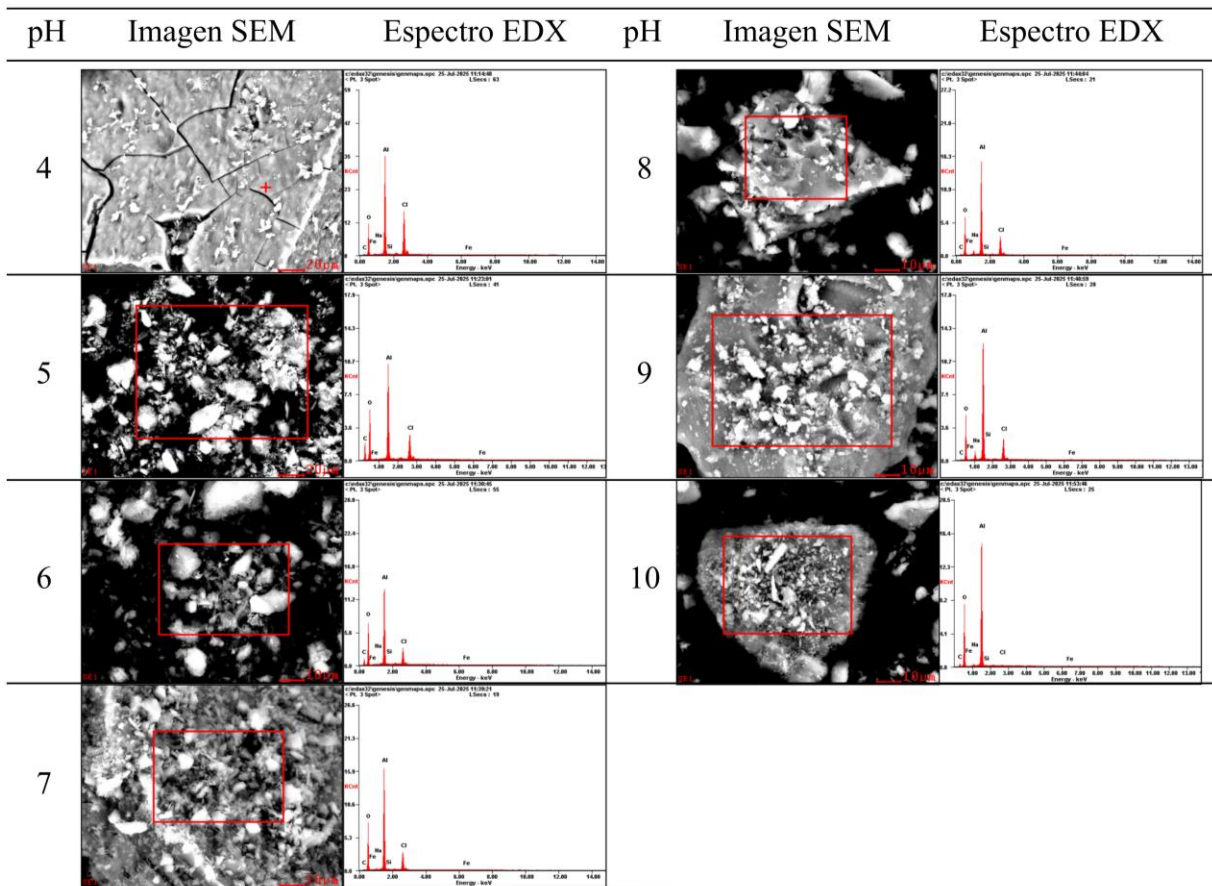
Efecto del pH en el rendimiento de producción de $\text{Al}(\text{OH})_3$.



Diferentes estudios han demostrado que a medida que incrementa el pH se genera una mayor disponibilidad de grupos hidroxilo (OH^-) que se asocian a los iones Al^{3+} en solución: a pH bajos se forman especies como $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ y $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, que son especies solubles; sin embargo, a medida que aumenta la disponibilidad de OH^- , el sistema llega a un punto en el que se forma la especie $\text{Al}(\text{OH})_3$, que no es soluble y precipita. Si el pH continúa aumentando, este precipitado puede redisolverse al formar la especie $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, siendo un complejo aniónico soluble (Hem y Roberson, 1967).

Figura 4

Análisis mediante SEM-EDX de la alúmina obtenida en función del pH empleado en la etapa de precipitación.



Además, es importante destacar las diferencias observadas en la coloración del material precipitado una vez secado (Figura 3, imágenes en círculos), lo que sugiere una posible variación en la pureza del hidróxido de aluminio obtenido. Por esta razón, las distintas muestras fueron analizadas mediante SEM-EDX, cuyos resultados se presentan en la Figura 4.

Tal como se evidencia en la figura anterior, las muestras revelaron aglomerados y partículas de tamaño irregular, como resultado del proceso de precipitación en medio acuoso durante la síntesis. El análisis EDX, por su parte, corroboró la presencia mayoritaria de aluminio en las muestras analizadas. En la Tabla 1 se presentan las composiciones atómicas y los porcentajes en peso de las muestras obtenidas a cada valor de pH, excluyendo los elementos carbono y oxígeno, con el fin de facilitar la comparación entre componentes metálicos e impurezas.

Tabla 1

Composición de la alúmina sintetizada en función del pH empleado en la etapa de precipitación (% peso y % at.).

pH	Na		Al		Si		Cl		Fe	
	%peso	%at	%peso	%at	%peso	%at	%peso	%at	%peso	%at
4	0,25	0,33	64,56	70,48	0,61	0,65	34,04	28,28	0,54	0,28
5	0,00	0,00	78,56	82,97	0,00	0,00	20,84	16,70	0,61	0,33
6	0,24	0,30	81,52	85,27	0,61	0,60	16,98	13,54	0,64	0,30
7	1,54	1,87	80,33	83,71	0,70	0,72	16,96	13,46	0,47	0,23
8	6,07	7,34	76,06	78,58	0,88	0,87	16,55	13,00	0,44	0,21
9	7,91	9,53	75,27	77,33	0,75	0,74	15,47	12,09	0,60	0,31
10	2,09	2,44	95,56	95,82	0,73	0,71	0,78	0,61	0,85	0,41

Como se observa, el pH tiene un impacto en la composición del material precipitado. A medida que el pH aumenta, la concentración de aluminio (Al) aumenta significativamente (de 65,56% a 95,56% peso), indicando una mayor pureza de la alúmina precipitada en medios básicos. Por otro lado, elementos como silicio (Si) y hierro (Fe) se encuentran en bajas proporciones,

representando en promedio 0,7% y 0,6% del peso respectivamente, provenientes de impurezas del papel aluminio reciclado.

Respecto al sodio (Na), su concentración aumenta desde pH 4 a 9 (de 0,25% a 7,91% peso), relacionado a la adición de NaOH, necesario para el ajuste de pH en la etapa de precipitación. A medida que se requieren valores de pH más altos, es necesario añadir mayores cantidades de NaOH, lo que incrementa la presencia de iones Na^+ en la solución, donde parte de estos quedan retenidos en el material precipitado. Posteriormente, se da una disminución de concentración de Na a pH 10 (2,09%), asociado al inicio de la transformación del hidróxido de aluminio en una especie soluble $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, que atrae iones Na^+ , reduciendo la cantidad retenida en el material precipitado. Paralelamente, los iones Na^+ en el medio se combinan con los iones Cl^- provenientes de la etapa de digestión, dando lugar a la formación de cloruro de sodio (NaCl), lo que reduce la presencia de cloro en la estructura del material adsorbente de 34,04% a 0,78% peso al aumentar el pH.

Ambos elementos (Na y Cl) son importantes tenerlos en cuenta dentro de los estudios posteriores ya que podrían modificar la estructura del material y, por tanto, su actividad superficial y la capacidad de adsorción al competir por los sitios activos frente a las moléculas del adsorbato [(Hu et al., 2017) (Khumalo et al., 2024) (Zhang et al., 2023)].

Además, el cloro es un elemento altamente reactivo en los procesos de conversión de energía, y su liberación provoca corrosión en los equipos, así como la formación de depósitos en las superficies de calentamiento (Mazurek et al., 2021). Esta característica resulta especialmente perjudicial, dado que en la posterior etapa de calcinación serán requeridas elevadas temperaturas para el tratamiento del material. Adicionalmente, diversas investigaciones han demostrado que el cloro desestabiliza el balance atmosférico de hidrocarburos, nitrógeno, ozono y gases de efecto

invernadero afectando la calidad del aire y el clima (Di et al., 2024). Por todo lo anterior, se estableció un pH de 10 para el procedimiento de síntesis de la alúmina.

4.2 Influencia del número de lavados sobre la composición y pureza del $\text{Al}(\text{OH})_3$

A partir del valor de pH elegido, se decidió realizar un estudio para evaluar cómo el número de lavados posteriores a la precipitación afecta la concentración de impurezas en el material obtenido. La Tabla 2 presenta las concentraciones atómicas y en peso de los elementos como Al, Cl, Fe, Na, y Si, determinadas mediante EDX, para las muestras precipitadas a un pH de 10 con distinto número de lavados. Se evidencia una clara disminución en las concentraciones superficiales de Na y Cl a medida que aumenta el número de lavados. Paralelamente, se observa que aumenta el porcentaje de Al, llegando a un valor de 95,5% peso tras el cuarto lavado, como resultado de un precipitado con mayor pureza. Este comportamiento evidencia la importancia de la cantidad de lavados del precipitado que se realiza antes de proceder al tratamiento térmico de calcinación.

Tabla 2

Análisis SEM-EDX del precipitado obtenido a pH 10 con diferente número de lavados.

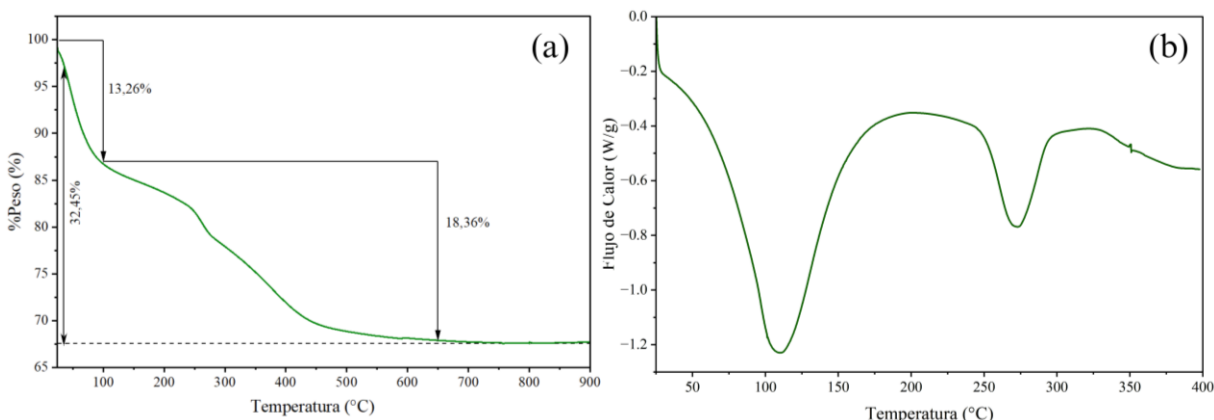
Número de lavados	Na		Al		Si		Cl		Fe	
	%peso	%at	%peso	%at	%peso	%at	%peso	%at	%peso	%at
0	37,13	44,91	23,55	24,29	0,22	0,21	38,80	30,44	0,30	0,14
1	24,13	28,91	50,76	51,74	0,17	0,14	24,39	18,92	0,54	0,29
2	8,64	10,23	82,31	82,93	0,70	0,69	7,64	5,84	0,70	0,31
3	3,48	4,06	91,26	91,94	0,87	0,81	3,48	2,71	0,91	0,47
4	1,73	2,05	95,51	95,90	0,62	0,59	1,47	1,14	0,67	0,32

4.3 Influencia de la temperatura de calcinación sobre las características fisicoquímicas y morfológicas de la alúmina sintetizada

En la Figura 5 se presentan los perfiles de análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) del hidróxido de aluminio precipitado. En el análisis TGA, hasta la temperatura de 100°C, el material pierde aproximadamente un 13,26% de su peso inicial (Figura 5 (a)). Esto concuerda con el primer pico endotérmico registrado en el análisis DSC en 110°C (Figura 5 (b)) y que ha sido atribuido a la eliminación de humedad residual presente en la muestra (Mostafa et al., 2019).

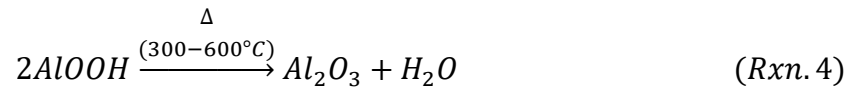
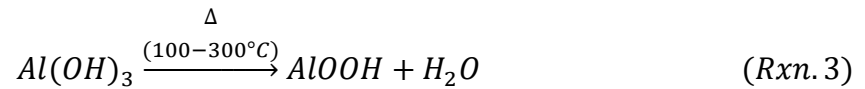
Figura 5

Análisis térmico del precipitado de hidróxido de aluminio obtenido a partir de aluminio reciclado: a) Análisis TGA; b) Análisis DSC.



Posterior a 100°C, el peso del material disminuye 18,36 %, marcando una pérdida progresiva de masa cerca de 250°C. En el análisis DSC se registra un segundo pico endotérmico en 272°C, asociado a la descomposición del $\text{Al}(\text{OH})_3$, mediante el proceso de deshidroxilación (Mostafa et al., 2019). Este proceso consiste en la pérdida progresiva de los grupos hidroxilo ($-\text{OH}$) que forman parte de la estructura del $\text{Al}(\text{OH})_3$, lo que conlleva la liberación de agua. Durante esta etapa, el hidróxido de aluminio se transforma primero en boehmita (AlOOH) (Rxn.3)

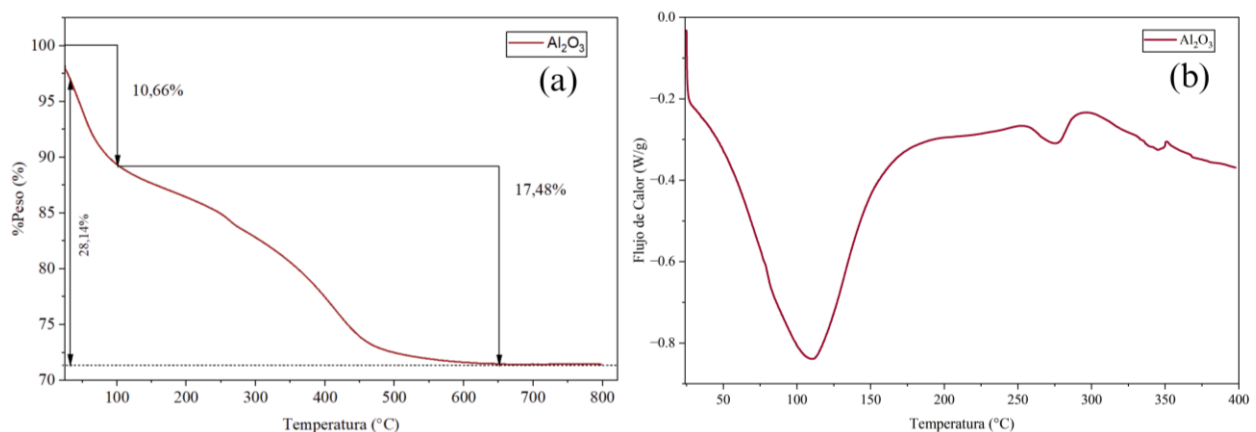
y, posteriormente, en γ -alúmina (γ - Al_2O_3) (Rxn.4) (Benítez Guerrero et al., 2013). Finalmente, el material presenta una pérdida total del 32,45% de su masa inicial, valor cercano al reportado en otro estudio (Sarker et al., 2015).



Con fines comparativos, se aplicaron los mismos análisis TGA y DSC a la alúmina comercial, cuyos resultados se muestran en la Figura 6, donde la alúmina comercial presenta una menor pérdida de peso (28,14%) con picos endotérmicos menos pronunciados dentro del rango asociado al proceso de deshidroxilación (250 °C-300 °C). Sin embargo, ambas muestras presentan comportamientos térmicos similares relacionados con la eliminación de humedad (100 °C-125 °C).

Figura 6

Análisis térmico de alúmina comercial: a) Análisis TGA; b) Análisis DSC.



Continuando con el análisis térmico y teniendo en cuenta que la transformación de hidróxido de aluminio en alúmina ocurre a temperaturas superiores de 300°C, en el diseño experimental se consideraron tres temperaturas de calcinación del material precipitado: 450, 500 y 550°C durante 4 horas. Las muestras resultantes se analizaron por EDX para evaluar el efecto de la temperatura de calcinación en la composición del material, como se presenta en la Tabla 3. Los resultados indican que, en el rango de temperaturas evaluado, no se observan cambios significativos en la composición de los principales metales respecto al Al(OH)₃ sin calcinar. Esto evidencia que la pureza del material depende principalmente del número de lavados y del pH empleado en la precipitación del Al(OH)₃, mientras que el tratamiento térmico no tiene un impacto relevante en la composición.

Tabla 3

Composiciones de masa atómica y porcentajes en peso para diferentes temperaturas de calcinación del material precipitado.

Material precipitado	Na		Al		Si		Cl		Fe	
	%peso	%at	%peso	%at	%peso	%at	%peso	%at	%peso	%at
Sin calcinar	2,42	2,85	95,78	95,89	0,43	0,42	0,79	0,58	0,59	0,26
A 450°C	2,46	2,90	95,90	95,92	0,44	0,44	0,58	0,44	0,62	0,30
A 500°C	2,77	3,26	95,14	95,19	0,49	0,48	1,04	0,80	0,55	0,27
A 550°C	2,31	2,72	95,46	95,64	0,56	0,56	0,99	0,75	0,67	0,33

En cuanto a la caracterización textural de las alúminas sintetizadas y la comercial, la Tabla 4 presenta el área superficial determinada mediante el método Brunauer-Emmett-Teller (BET), así como el volumen y el tamaño de poro obtenidos mediante el método Barrett-Joyner-Halenda (BJH) para las muestras calcinadas a las diferentes temperaturas.

Tabla 4

Análisis BET de la alúmina sintetizada y comercial a diferentes temperaturas de calcinación.

Temperatura de calcinación	Alúmina sintetizada			Alúmina comercial		
	450°C	500°	550°C	450°C	500°	550°C
Área superficial [m ² /g]	221,7	218,7	209,9	210,5	205,1	194,2
Volumen poro [cm ³ /g]	0,42	0,41	0,41	0,38	0,58	0,58
Tamaño poro [nm]	5,7	6,0	6,2	6,4	9,5	10,1

A partir de los resultados de la tabla anterior se observa que la temperatura de calcinación influye principalmente sobre el área superficial y el tamaño de poro. En este sentido, a medida que se eleva la temperatura, el área superficial disminuye, registrándose una disminución de 5,3% para la alúmina sintetizada y el 7,7% para la alúmina comercial. Por otro lado, el tamaño de poro muestra un incremento, evidenciando una mayor diferencia entre los materiales, con un aumento del 8,8 % en la alúmina sintetizada y del 57,8 % en la alúmina comercial. Este comportamiento se debe a la destrucción de microporos y la reconstrucción de macroporos, a medida que aumenta la temperatura, es decir, los microporos colapsan parcialmente y se generan poros más grandes (Takht Ravanchi et al., 2014).

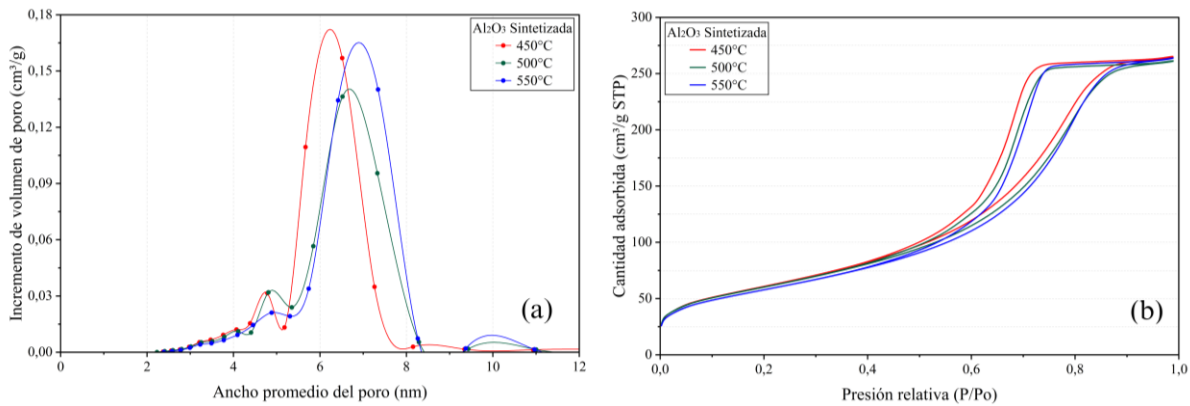
Este resultado anterior, permite evidenciar que la alúmina sintetizada presenta una estructura térmicamente más estable comparada con la comercial, ya que los cambios en su área superficial y tamaño de poro son menores al aumentar la temperatura de calcinación, lo que indica una menor alteración de su estructura porosa bajo estas condiciones térmicas.

Con el fin de analizar el tipo de porosidad de la alúmina sintetizada y la comercial, las Figuras 7 y 8 muestran la distribución de tamaños de poro (a) y las isothermas de adsorción-

desorción de N_2 (b) obtenidas para ambas muestras a las diferentes temperaturas de calcinación. La Figura 7 corresponde a la alúmina sintetizada y la Figura 8 a la alúmina comercial.

Figura 7

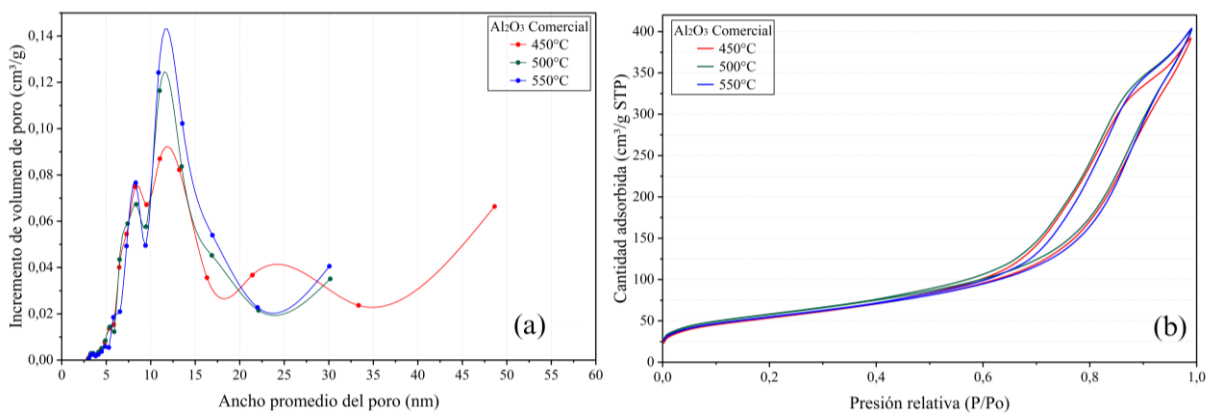
(a) Distribución de tamaño de poro de la alúmina sintetizada a diferentes temperaturas de calcinación y (b) isoterma de adsorción-desorción de N_2 .



Según los criterios establecidos por la IUPAC para la clasificación de materiales porosos, tanto la alúmina sintetizada como la comercial se consideran mesoporosas, ya que presentan tamaños de poro en el rango de 2 a 50 nm (Figura 7(a) y Figura 8(a)).

Figura 8

(a) Distribución de tamaño de poro de la alúmina comercial a diferentes temperaturas de calcinación y (b) isoterma de adsorción-desorción de N_2 .



La distribución de tamaños de poro (Figura 7(a)) de las alúminas sintetizadas es altamente homogénea pues se muestran bandas predominantes solo en el rango entre 5 y 8 nm (Tabla 4), con un ligero incremento a medida que la temperatura de calcinación aumenta. En cuanto a la alúmina comercial, la Figura 8(a) presenta una distribución de poros más diversa, situada en el rango de 5 a 50 nm. En conclusión, los resultados del tratamiento térmico evidencian que la alúmina sintetizada posee una estructura mesoporosa más uniforme y controlada que la alúmina comercial que presenta una distribución de poros más heterogénea.

La clasificación de los poros mesoporosos se confirma con las isothermas obtenidas, pues este tipo de materiales se caracterizan por isothermas de tipo IV y V (Alothman, 2012). En este caso, la alúmina sintetizada se ajusta a una isoterma de tipo IV (Figura 7(b)), característica de procesos de adsorción en monocapa y multicapa. Por otra parte, la alúmina comercial corresponde al tipo V (Figura 8(b)), asociado a interacciones débiles entre el adsorbato y la superficie del adsorbente (Sing et al., 1985).

Adicionalmente, la alúmina sintetizada presenta un ciclo de histéresis tipo H2, asociada con materiales de estructuras desordenadas, donde la distribución del tamaño y la forma de los poros no está completamente definida. Este tipo de histéresis es indicativo de la presencia de constricciones tipo cuello de botella, en las que los poros presentan una entrada estrecha conectada con cavidades internas de mayor tamaño, o también del fenómeno de percolación en el cual existe interconexión dentro de la red de poros (Román, 2021). En consecuencia, el proceso de adsorción puede verse influenciado por la estrechez de las entradas de los poros, ralentizando la adsorción, o bien depender de la conectividad entre los poros, de modo que la geometría y la distribución de la red porosa determinan el orden y velocidad del paso del adsorbato dentro del material adsorbente.

Por otra parte, la alúmina comercial presenta un ciclo de histéresis tipo H3, característico de materiales formados por el empaquetamiento de partículas en forma de láminas o placas de tamaño heterogéneo (Alothman, 2012). Este tipo de estructura da lugar a poros con geometría de rendija, en los cuales el proceso de adsorción no ocurre de manera uniforme debido a que la variabilidad en el tamaño de los poros genera que el material presente una mayor capacidad de adsorción en algunas zonas respecto a otras.

Teniendo en cuenta los parámetros analizados hasta este punto, se establece 450 °C como la temperatura de calcinación para el procedimiento de síntesis de la alúmina. Esta elección se fundamenta en que, a dicha temperatura, el material conserva un área superficial mayor en comparación con las otras temperaturas evaluadas. Además, la selección de la temperatura más baja de calcinación contribuye a reducir el consumo energético del proceso.

En este sentido y de manera complementaria, se caracterizó la composición de la alúmina sintetizada y calcinada a 450 °C mediante fluorescencia de rayos X (FRX) (Tabla 5). A partir de los resultados, se confirma la presencia de elementos previamente identificados mediante los análisis SEM-EDX, tales como Al, Cl, Si y Fe. El análisis por FRX también evidenció la presencia de otros elementos, como antimonio (Sb) y neodimio (Nd). Respecto al parámetro denominado otros, este corresponde a la suma en porcentaje en peso de elementos ligeros que el equipo no logra identificar, entre los cuales se incluyen oxígeno (O), carbono (C), hidrógeno (H), entre otros. Dado que este parámetro presentó un valor de 73,15 %peso, se asocia principalmente con la presencia de oxígeno en el material, elemento principal en la composición de la alúmina. Finalmente, aunque el análisis EDX identificó sodio (Na), el análisis FRX no lo detectó, probablemente debido a que se encuentra en concentraciones inferiores al límite de detección.

Tabla 5

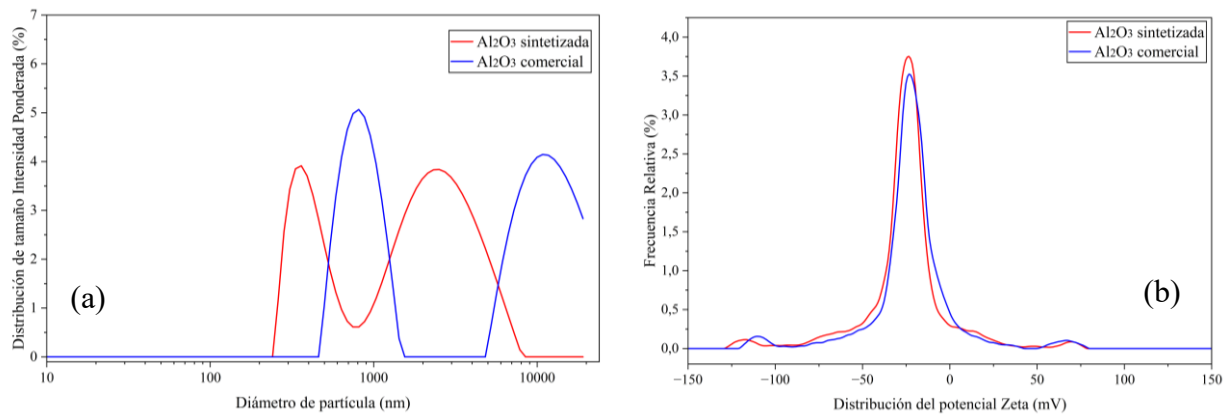
Porcentaje cuantitativo elemental de alúmina sintetizada y calcinada a 450°C

Material sintetizado	Concentración (%peso)						
	Al	Cl	Fe	Sb	Si	Nd	Otros
Calcinación a 450°C	23,83	1,73	0,77	0,22	0,16	0,12	73,15

Para las muestras de alúmina sintetizada y comercial calcinadas a la temperatura establecida, la Figura 9 muestra los resultados del análisis de distribución de tamaño de partículas o agregados en suspensión y del potencial zeta.

Figura 9

Distribución del tamaño de partículas (a) y análisis del potencial zeta (b).



De acuerdo con lo anterior, la alúmina sintetizada presenta dos rangos definidos de tamaño promedio de partículas: una entre 250 nm y 700 nm y otra entre 1.000 nm y 8.000 nm. La distribución obtenida indica que la mayoría de las partículas se encuentran poseen tamaños de 0,3 μm y 1,2 μm , valores en los que se observan los picos máximos de la curva. De manera similar, la alúmina comercial presenta también dos picos en su distribución, aunque asociados a mayores tamaños de partícula, donde la mayor parte de sus partículas tiene un tamaño de 1 μm y 10 μm .

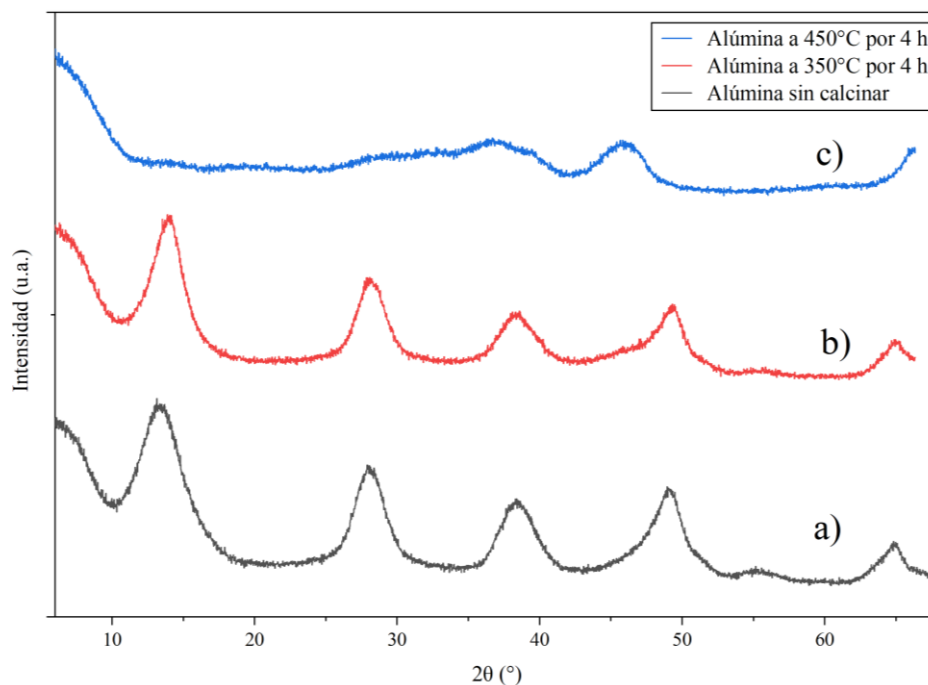
Por lo tanto, ambos materiales exhiben dos tipos de tamaños de partículas, demostrándose que la alúmina comercial posee mayores tamaños respecto a la alúmina sintetizada.

En relación con el potencial zeta (Figura 9(b)), cuyo valor se relaciona con las características de carga de la superficie de la partícula y la composición de la solución, ambos materiales presentan valores similares. La alúmina sintetizada presenta un potencial de -20,6 mV, mientras que la comercial alcanza -23,2 mV. Estos valores sugieren la presencia de repulsión electrostática entre partículas, lo que reduce su tendencia a la agregación en suspensión (Avila et al., 2005) (Sadeghi et al., 2015).

Dado que los valores obtenidos para la alúmina sintetizada y la comercial son muy cercanos, se espera que esta característica no represente un factor determinante en la comparación de la capacidad de adsorción de los materiales frente a la molécula de azul de metileno.

Figura 10

Patrones DRX de alúmina sintetizada: a) sin calcinar y calcinada a temperaturas de: b) 350°C y c) 450°C durante 4 horas.



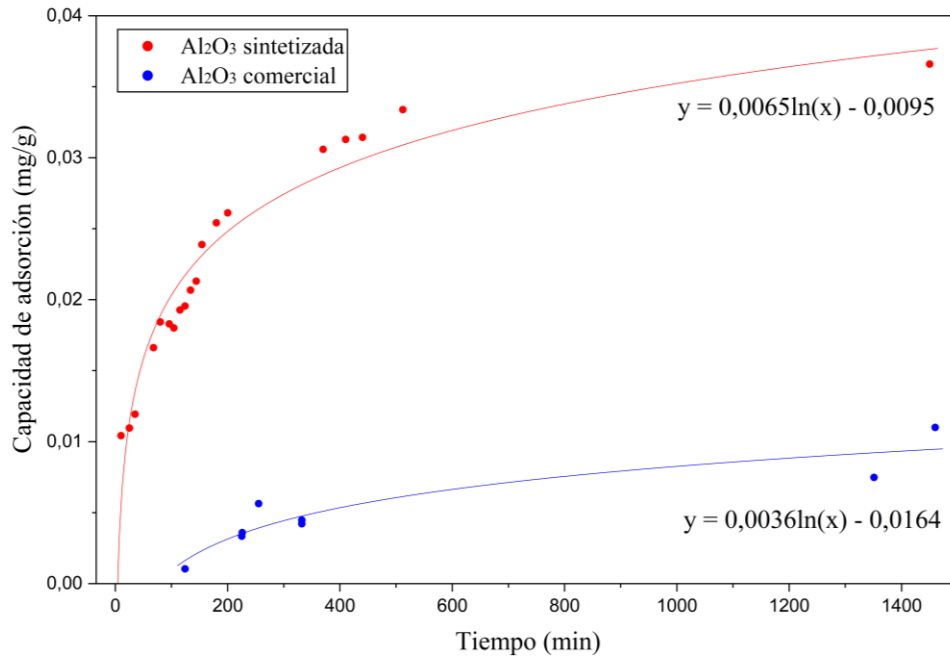
Por otro lado, la Figura 10 muestra los resultados del análisis DRX realizado para identificar las fases presentes en la alúmina sin calcinar y en la alúmina calcinada 450°C durante 4 horas. Se analizó además el material calcinado a 350°C para analizar la transición de fase que experimenta la alúmina en este intervalo de temperatura. Los resultados indican que la alúmina sintetizada sin calcinar (difractograma a) presenta una estructura con tendencia amorfa, exhibiendo picos de difracción en $2\theta = 13.3^\circ, 28^\circ, 38.3^\circ, 49^\circ, 55^\circ$ y 65° . Un comportamiento similar se observa en la muestra calcinada a 350°C (difractograma b), donde los picos son semejantes, pero menos definidos. Ambas muestras corresponden a alúmina boehmita y se clasifican como pseudoboehmita, debido a sus picos pocos definidos (Truong y Kim, 2022) (Adamowska y Da Costa, 2015). De igual modo, la alúmina sintetizada calcinada a 450°C (difractograma c) presenta una estructura fuertemente amorfa, exhibiendo picos de difracción en posiciones $2\theta = 37^\circ, 46^\circ$ y 66° , correspondiente a la fase γ -alúmina (Ghulam et al., 2019). Estos resultados evidencian que, bajo las condiciones de tratamiento térmico empleadas, existe una transición gradual de la fase boehmita hacia γ -alúmina, favorecida principalmente a 450°C.

4.4. Evaluación de la capacidad de adsorción de la alúmina sintetizada con tinte azul de metileno en solución acuosa

Con relación a la evaluación de la capacidad de adsorción del material sintetizado y su comparación respecto a alúmina comercial, en la Figura 11 se muestran los resultados de la cantidad de tinte azul de metileno adsorbido por unidad de masa de adsorbente durante el transcurso de 24 horas. Este estudio se realizó con una concentración inicial de tinte de 12,5 mg/L y una concentración de alúmina de 50 g/L, a temperatura ambiente y bajo agitación.

Figura 11

Capacidad de adsorción de azul de metileno sobre las muestras de alúmina sintetizada y comercial.

**Tabla 6**

Concentraciones del tinte azul de metileno y porcentajes de adsorción en el transcurso de 24 horas para alúmina sintetizada y comercial.

Tiempo [min]	Alúmina sintetizada		Alúmina comercial	
	Concentración de tinte [mg/L]	Porcentaje de remoción [%]	Concentración de tinte [mg/L]	Porcentaje de remoción [%]
0	12,5	0	12,5	0
120	11,64	6,8%	12,19	2,5%
240	11,39	8,9%	12,16	2,7%
360	11,09	11,3%	12,01	3,9%
1440	10,79	13,7%	11,77	5,9%

Los datos muestran que, después de 24 horas, la alúmina sintetizada alcanzó una capacidad de adsorción de 0,0366 mg/g, superando significativamente a la alúmina comercial, cuyo valor fue de 0,011 mg/g. Asimismo, en la Tabla 6 se presentan los porcentajes de remoción de azul de

metileno obtenidos en cada caso tras 120, 240, 360 y 1440 minutos, equivalentes a 2, 4, 6 y 24 horas, respectivamente. Como se observa, en cada intervalo de tiempo la alúmina sintetizada presenta porcentajes de adsorción superiores respecto a la comercial. En este sentido, dos horas después de iniciado el proceso, la alúmina sintetizada logra remover el 6,8 % del tinte azul de metileno presente en solución, mientras que, tras 24 horas, la alúmina comercial apenas alcanza una adsorción del 5,9 %. Finalmente, la alúmina sintetizada alcanzó un porcentaje total de remoción de azul de metileno del 13,7%.

Relacionando lo anterior con los resultados de caracterización realizados, la mayor capacidad de adsorción observada en la alúmina sintetizada se justifica en las diferencias estructurales, ya que cuenta con una distribución más homogénea de poros y una mayor área superficial comparado con la alúmina comercial, lo que favorece la retención de moléculas de azul de metileno dentro de los poros y mejora la interacción entre adsorbato y adsorbente. Además, los resultados obtenidos para la alúmina sintetizada podrían atribuirse a la presencia de impurezas metálicas de hierro, elemento que en diversos estudios se incorpora en forma de nanopartículas de óxido de hierro para mejorar la remoción del tinte azul de metileno (Keshta et al., 2024).

5. Conclusiones

Se demostró la viabilidad de sintetizar alúmina a partir de residuos de papel aluminio reciclado mediante digestión ácida y precipitación controlada, representando una alternativa prometedora para la valorización de residuos de aluminio, enmarcada en un enfoque de economía circular.

En los análisis realizados sobre la alúmina sintetizada en el rango de pH entre 4 y 10 y temperaturas de calcinación entre 450 °C y 550 °C se evidenció que la variación de estos parámetros influye significativamente en las propiedades fisicoquímicas y morfológicas del material, alcanzándose a pH 10 una pureza de 95,6% peso y un rendimiento del 87,5%. Adicionalmente, la calcinación a 450 °C permitió obtener alúmina mesoporosa con la mayor área superficial (221,7 m²/g) dentro del rango de temperatura estudiado.

Bajo las condiciones evaluadas (12,5 mg/L de tinte, 50 g/L de adsorbente), la alúmina sintetizada presentó un mayor desempeño como adsorbente del tinte azul de metileno en comparación con la alúmina comercial. En un período de 24 horas, el material logró adsorber el 13,67 % del tinte presente, respecto al 5,86 % obtenido con la alúmina comercial, demostrando así, su potencial para aplicaciones en adsorción.

La diferencia en la capacidad de adsorción entre ambos materiales se atribuyó principalmente a la distribución homogénea del tamaño, forma y área de los poros presentes en la estructura de la alúmina sintetizada y, de manera indirecta, a la presencia de hierro, el cual podría mejorar las propiedades adsorbentes del material para la remoción del tinte en solución acuosa.

6. Recomendaciones

Investigar la influencia del tiempo de calcinación sobre la transformación de fases de la alúmina, con el propósito de establecer las condiciones adecuadas para su producción.

Estudiar el efecto del pH en el proceso de adsorción, con el fin de identificar las condiciones que favorezcan la mayor capacidad de remoción del colorante.

Referencias

- Acuatécnica. (2017). *¿Cuántas plantas de tratamiento de aguas residuales hay en Colombia?*
<https://acuatecnica.com/cuantas-plantas-tratamiento-aguas-residuales-colombia/>
- Adamowska, M., y Da Costa, P. (2015). Structured Pd/ γ -Al₂O₃ prepared by washcoated deposition on a ceramic honeycomb for compressed natural gas applications. *Journal of Nanoparticles*, 2015, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2015/601941>
- Aljeboree, A. M., Alshirifi, A. N., y Alkaim, A. F. (2017). Kinetics and equilibrium study for the adsorption of textile dyes on coconut shell activated carbon. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(S2), S3381–S3393. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.01.020>
- Allothman, Z. A. (2012). A review: fundamental aspects of silicate mesoporous materials. *Materials*, 5(12), 2874-2902. <https://doi.org/10.3390/ma5122874>
- Al-Tohamy, R., Ali, S., Li, F., Okasha, K. M., Mahmoud, Y., Elsamahy, T., y Sun, J. (2022). A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 231, 113160. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160>
- Avila, P., Montes, M., y Miró, E. (2005). Monolithic reactors for environmental applications. *Chemical Engineering Journal* 109 (2005) 11–36. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2005.02.025>
- Barrios Ziolo, L. F., Gaviria Restrepo, L. F., Agudelo, E. A., y Cardona Gallo, S. A. (2015). Tecnologías para la remoción de colorantes y pigmentos presentes en aguas residuales. Una revisión. *Dyna*, 82(191), 118-126. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n191.42924>

- Benítez Guerrero , M., Pérez Maqueda, L., Pena Castro, P., y Pacual Cosp, J. (2013). Alúminas porosas: El método de bio-réplica para la síntesis de alúminas estables de alta superficie específica. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 52(6), 251–267. <https://doi.org/10.3989/cyv.322013>
- Cardoso, J. C., Bessegato, G. G., y Zaroni, M. V. (2016). Efficiency comparison of ozonation, photolysis, photocatalysis and photoelectrocatalysis methods in real textile wastewater decolorization. *Water research*, 98, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.004>
- Castro Pérez, V. K. (2018). *Manejo de residuos sólidos del sector textil en Colombia*. Repositorio Institucional UMNG: <https://core.ac.uk/download/pdf/286064629.pdf>
- Cobo Quesada, J. (2005). *Estudio de la síntesis de alúmina por el metodo de precipitación controlada (MPC)*. Repositorio Institucional Universidad del Cauca: <http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/7212/Estudio%20de%20la%20síntesis%20de%20alúmina%20por%20el%20método%20de%20precipitación%20controlada%20%28MPC%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Di, C., Qinyi, L., y Zhe, W. (2024). Significant chlorine emissions from biomass burning affect the long-term atmospheric chemistry in Asia. *National Science Review*, 11(9), nwae285. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwae285>
- DNFI. (2024). World Natural Fibre Update February 2024. *Discover Natural Fibres Initiative DNFI*. <https://dnfi.org/dnfi-world-natural-fibre-update-february-2024>
- Duany Timosthe, S., Arias Lafargue, T., Bessy Horrunitiner, T., y Rodríguez Heredia, D. (2022). Bioadsorbentes no convencionales empleados en la remoción de metales pesados. Revisión. *Tecnología Química*, 42(1), 94-113.

https://www.researchgate.net/publication/366369297_Bioadsorbentes_no_convencionales_empleados_en_la_remocion_de_metales_pesados_Revision

Dutta, S., Adhikary, S., Bhattacharya, S., Roy, D., Chatterjee, S., Chakraborty, A., y Rajak, P. (2024). Contamination of textile dyes in aquatic environment: Adverse impacts on aquatic ecosystem and human health, and its management using bioremediation. *Journal of Environmental Management*, 353, 120103. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120103>

Geankoplis, C. J. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias. Tercera edición. México, 1998, p. 774.* COMPAÑÍA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. DE C.V. <https://fenomenosdetransporte.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/05/geankopolis.pdf>

Ghulam, N., Abbas, M., y Sachit, D. (2019). Preparing of Alumina from Aluminum Waste. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 4(3), 326-331. https://www.researchgate.net/publication/336825418_Preparing_of_Alumina_from_Aluminum_Waste

Hem, J. D., y Roberson, C. E. (1967). Form and Stability of Aluminum Hydroxide Complexes in Dilute Solution. U.S. Government Printing Office. <https://pubs.usgs.gov/wsp/1827a/report.pdf>

Hu, B., Huang, Q., Bourtsalas, A., Ali, M., Chi, Y., y Yan, J. (2017). Effect of chlorine on the structure and reactivity of char derived from solid waste. *Energy & Fuels (ACS)*, 31(7), 7606-7616. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01042>

Keshta, B. E., Gemeay, A., Sinha, D. K., Elsharkawy, S., Hassan, F., Rai, N., y Arora, C. (2024). State of the art on the magnetic iron oxide Nanoparticles: Synthesis, Functionalization, and

- applications in wastewater treatment. *Results in Chemistry*, 7, 101388. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101388>
- Khumalo, S. M., Bakare, B. F., y Rathilal, S. (2024). The Effect of Competing Ions on the Sorption of Amoxicillin, Ciprofloxacin, and Sulfamethoxazole on Chitosan-Carbon Nanotube Hydrogel Beads. *Proceedings of the 9th World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering (CSEE 2024)*. <https://doi.org/10.11159/iceptp24.189>
- Mazurek, I., Skawińska, A., y Sajdak, M. (2021). Analysis of chlorine forms in hard coal and the impact of leaching conditions on chlorine removal. *Journal of the Energy Institute*, 94, 337-351. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.10.002>
- Mostafa, M., Abo El Naga, A., Galhoum, A., Guibal, E., y Morshedy, A. (2019). A new route for the synthesis of self-acidified and granulated mesoporous alumina catalyst with superior Lewis acidity and its application in cumene conversion. *Journal of Materials Science*, 54(7), 5424–5444. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03270-1>
- Muñoz, J. P. (2025). *Desarrollo de un proceso de obtención de alúmina a partir de papel de aluminio posconsumo*. (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.: <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/bd8488eb-a98f-4db0-9e8e-f0c5379bee5b/content>
- Naik, B., & Ghosh, N. (2009). A review on chemical methodologies for preparation of mesoporous silica and alumina based materials. *Recent patents on nanotechnology*, 3(3), 213-224. <https://doi.org/10.2174/187221009789177768>
- Oladoye, O. P., Ajiboye, T. O., Omotola, E. O., y Oyewola, O. J. (2022). Methylene blue dye: Toxicity and potential elimination technology from wastewater. *Results in Engineering*, 16, 100678. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100678>

- Piña Perez, Y. (2012). Al₂O₃ como fotocatalizador en la mineralización de fenol. *Proyecto Terminal. Universidad Autónoma Metropolitana*.
<http://148.206.53.231/tesiuami/207309300.pdf>
- Porto Fernandes, E., Silva, T., Carvalho, C., Selvasembian, R., Chaukura, N., Olivera, L., . . . Meili, L. (2021). Efficient adsorption of dyes by γ -alumina synthesized from aluminum wastes: Kinetics, isotherms, thermodynamics and toxicity assessment. . *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106198>
- Procolombia. (2023). Industria textil colombiana y su crecimiento a través de la innovación y la competitividad. Procolombia:
<https://procolombia.co/colombiatrade/exportador/articulos/industria-textil-colombiana-y-su-crecimiento-traves-de-la-innovacion-y-la-competitividad>
- Ramírez, J. (2023). Tratamiento de aguas residuales y problemáticas ambientales del sector textil en Colombia: una revisión. *Informador técnico*, 87(1), 82-106.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8901951>
- Rodríguez Comas, M. (2016). *Evaluación de un proceso de recuperación de TiO₂ a partir de lodos rojos provenientes del proceso BAYER de CVG BAUXILUM*. (Tesis de licenciatura). Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela:
<http://saber.ucv.ve/bitstream/10872/15091/1/TesismayoMaricarmenRodriguezmayo16.doc.pdf>
- Román, G. E. (2021). *Estudio computacional de la estructura y reactividad de materiales porosos y su interacción con moléculas de interés farmacéutico*. (Tesis de posgrado). Universidad Nacional del Sur. Argentina.: <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/5724>

- Sadeghi, R., Etemad, S. G., Keshavarzi, E., y Haghshenasfard, M. (2015). Investigation of alumina nanofluid stability by UV–vis spectrum. . *Microfluidics and Nanofluidics*, 18(5), 1023-1030. Springer Nature Link: <https://doi.org/10.1007/s10404-014-1491-y>
- Sadoon Ahmedzeki, N., Hussein, S., y Abdulwahid Abdulnabi, W. (2017). Recycling Waste Cans to Nano Gamma Alumina: Effect of the Calcination Temperature and pH. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 7(1), 82-88. <https://inpressco.com/wp-content/uploads/2017/01/Paper1482-88.pdf>
- Sangor, F., & Al-Ghouti, M. (2023). Waste-to-value: Synthesis of nano-aluminum oxide (nano- γ - Al_2O_3) from waste aluminum foils for efficient adsorption of methylene blue dye. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100394.: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100394>
- Sarker, M. S., Alam, M. Z., Qadir, M. R., Gafur, M. A., y Moniruzzaman, M. (2015). Extraction and characterization of alumina nanopowders from aluminum dross by acid dissolution process. *International journal of minerals, metallurgy, and materials*, 22(4), 429-436. <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1090-2>
- Sing, K. S., Everett, D. H., Haul, R. A., Moscou, L., Pierotti, R. A., Rouquerol, J., y Siemieniewska, T. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure Appl. Chem* 57, 603–619. <https://publications.iupac.org/pac-2007/1985/pdf/5704x0603.pdf>
- Takht Ravanchi, M., Rahimi Fard, M., Fadaerayeni, S., y Yaripour, F. (2014). Effect of Calcination Conditions on Crystalline Structure and Pore Size Distribution for a Mesoporous Alumina. *Chemical Engineering Communications*, 202(4), 493–499. <https://doi.org/10.1080/00986445.2013.850577>

- The Food Tech.* (2016). Reciclaje de aluminio, oportunidad en Bogotá.:
<https://thefoodtech.com/historico/reciclaje-de-aluminio-oportunidad-en-bogota/>
- Tinoco Gómez, O. R., Medina Escudero, A. M., y Zapata Gamarra, H. (2011). Tratamiento de efluentes textiles con luz ultravioleta solar. *Industrial Data*, 14(2), 9-15.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81622585002>
- Truong, T. V., y Kim, D.-J. (2022). Synthesis of high quality boehmite and γ -alumina for phosphorus removal from water works sludge by extraction and hydrothermal treatment. *Environmental Research*, 212(C). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113448>
- Tukker, A., Huppel, G., Guinée, J. B., Heijungs, R., Koning, A. D., Oers, L. V., y Nielsen, P. (2006). Environmental Impact of Products (EIPRO) Analysis of the life cycle environmental impacts related to the final consumption of the EU-25, 1-136.
- Valladares Cisneros, M. G., Valerio Cárdenas, C., de la Cruz Burelo, P., y Melgoza Alemán, R. M. (2017). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(31), 55-73.
<https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a3>
- Yi, J.-h., SUN, Y.-y., GAO, J.-f., y XU, C.-y. (2009). Synthesis of crystalline γ -Al₂O₃ with high purity. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 19(5), 1237-1242.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60435-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60435-5)
- Zaruma, P., Proal, J., Hernández, I. C., y Salas, H. I. (2018). Los colorantes textiles industriales y tratamientos óptimos de sus efluentes de agua residual: una breve revisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, (19), 38-47.
<https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/2216>

- Zhang, A., Liu, J., y Yang, Y. (2023). The effect mechanism of HCl on chromium removal by CaO sorbent. *Journal of Cleaner Production*, 397. ScienceDirect: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136559>
- Zhu, L., Chen, B., Liu, J., Chen, S., Zhang, Y., Wang, X., y Wang, L. (2022). Assessing baseline water footprints of natural fiber textile products in China. *Journal of Cleaner Production*, 379(1). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134747>