

Desarrollo de un proceso de obtención de alúmina a partir de papel de aluminio reciclado
posconsumo para su aprovechamiento en distintas aplicaciones industriales

Jenny Paola Muñoz Gamboa

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director

Fernando Viejo Abrante

Dr. Ciencia y Tecnología de los Materiales

Codirectora

Ana Emilse Coy Echeverría

Dra. Ciencia y Tecnología de los Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

Quiero expresar mis más profundos y sinceros agradecimientos a quienes, con su guía y apoyo, han sido pilares fundamentales en la culminación de este proyecto.

Al profesor Fernando Viejo, cuya visión y conocimiento hicieron posible mi inmersión en el apasionante campo de la investigación. Gracias por la confianza depositada, por creer en la posibilidad de transformar lo desechado en un recurso valioso, y por demostrar que en lo inexplorado yace el potencial de nuevos horizontes. Su dedicación, ánimo y liderazgo han sido una inspiración constante en este camino.

A la profesora Ana Emilse Coy Echeverría, por sus valiosos aportes y acompañamiento, cuya guía fortaleció cada paso hacia su culminación.

A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander, por su apoyo financiero a través de los proyectos 3964 y 3778, que hicieron posible la realización de este trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander, mi alma máter, por ser más que una institución educativa: un hogar de saberes, ideas y sueños. Gracias por sus espacios que inspiran reflexión y creatividad, por los verdes senderos que se convirtieron en un refugio durante los momentos de desafío, y por brindar el entorno para forjar amistades que trascienden lo académico.

A la Escuela de Ingeniería Química, por ser la cuna de mi formación profesional. A sus docentes, quienes con paciencia y generosidad compartieron su experiencia y conocimiento, moldeando no sólo mi trayectoria académica, sino también mi carácter. Mi gratitud se extiende también a la planta física, por su siempre eficiente colaboración, facilitando cada detalle necesario para el desarrollo de este proyecto.

Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Marco teórico	13
2. Objetivos	16
2.1. Objetivo general	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. Descripción metodológica	17
3.1. Fase I: Revisión de las etapas del método de síntesis	17
3.2. Fase II: Selección de la ruta de síntesis de alúmina a partir de papel de aluminio	17
3.3. Fase III: Estudios preliminares del proceso de obtención de alúmina a partir de residuos de aluminio.....	18
4. Resultados y Discusión	19
4.1. Revisión de las etapas del método de síntesis.....	19
4.1.1. Digestión	19
4.1.2. Precipitación	20
4.1.3. Calcinación	21
4.2. Selección de la ruta de síntesis de alúmina a partir de papel de aluminio	23
4.3. Estudios preliminares del proceso de obtención de alúmina a partir de residuos de papel de aluminio.....	27
5. Conclusiones	32

6. Recomendaciones	33
Referencias Bibliográficas	34
Apéndices.....	39

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Compuestos formados durante la etapa de digestión.....	20
Tabla 2 Producto precipitado mediante diferentes agentes precipitantes alcalinos.....	21
Tabla 3 Ventajas y desventajas de las rutas de síntesis investigadas.....	24
Tabla 4 Composición química del papel de aluminio.....	27

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Diagrama de estabilidad de fases de los hidróxidos y óxidos de aluminio.	15
Figura 2 Diagrama protocolo de obtención de alúmina a partir de residuos de papel de aluminio.	26
Figura 3 Patrones DRX de hidróxido de aluminio precipitado a valores de pH 4 y pH 9.	28
Figura 4 Curva TGA de la muestra calcinada en atmósfera de oxígeno hasta 850°C.	29
Figura 5 Espectros FTIR de las muestras de secada a 105°C y calcinada a 800 °C por 4 horas.	30
Figura 6 Informe detallado de la composición química elemental del residuo de papel de aluminio mediante Espectrometría de Absorción Atómica	39

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Informe completo Espectrometría de Absorción Atómica	399

Resumen

Título: Desarrollo de un proceso de obtención de alúmina a partir de papel de aluminio reciclado posconsumo para su aprovechamiento en distintas aplicaciones industriales*

Autor: Jenny Paola Muñoz Gamboa**

Palabras clave: Papel aluminio posconsumo, gestión de residuos de papel de aluminio, alúmina, precipitación.

Descripción:

Este estudio aborda la valorización de residuos de papel de aluminio posconsumo mediante un proceso sostenible basado en el método de precipitación, logrando la producción de alúmina con potencial para aplicaciones industriales. Los residuos de papel de aluminio posconsumo recolectados se sometieron a digestión y precipitación utilizando HCl y NaOH, reactivos seleccionados tras una revisión bibliográfica por su bajo impacto económico y ambiental. La materia prima fue caracterizada mediante espectroscopía de absorción atómica, mientras que los productos obtenidos se analizaron mediante difracción de rayos X (XRD), análisis termogravimétrico (TGA) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para determinar su estructura cristalina, comportamiento térmico y transformaciones químicas. Los análisis demostraron que, al trabajar dentro de un rango de pH de 4 a 9, se evitó la formación de compuestos contaminantes, asegurando la pureza del material. Durante la calcinación a 800 °C, se identificaron fases metaestables de óxidos de aluminio (γ -Al₂O₃). Los resultados mostraron que las condiciones del proceso permiten la producción de alúmina con propiedades adecuadas para aplicaciones avanzadas, resaltando su sostenibilidad y contribución a la economía circular. Este trabajo representa un avance significativo en la gestión de residuos de aluminio, sentando las bases para optimizar la síntesis, ampliar sus aplicaciones funcionales y explorar su escalabilidad industrial.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Fernando Viejo Abrante. Dr. Ciencia y Tecnología de los Materiales. Codirectora: Ana Emilse Coy Echeverría. Dr. Ciencia y Tecnología de los Materiales

Abstract

Title: Development of a process for obtaining alumina from post-consumer recycled aluminum foil for its utilization in various industrial applications*

Author: Jenny Paola Muñoz Gamboa**

Keywords: Post-consumer aluminum foil, aluminum foil waste management, alumina, precipitation.

Description:

This study addresses the valorization of post-consumer aluminum foil waste through a sustainable process based on the precipitation method, achieving the production of alumina with potential for industrial applications. The collected post-consumer aluminum foil waste was subjected to digestion and precipitation using HCl and NaOH, reagents selected based on a literature review for their low economic and environmental impact. The raw material was characterized by atomic absorption spectroscopy, while the obtained products were analyzed by X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA), and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) to determine their crystalline structure, thermal behavior, and chemical transformations. The analysis demonstrated that by working within a pH range of 4 to 9, the formation of contaminant compounds was avoided, ensuring the purity of the material. During calcination at 800°C, metastable phases of aluminum oxides ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) were identified. The results showed that the process conditions allow for the production of alumina with suitable properties for advanced applications, highlighting its sustainability and contribution to the circular economy. This work represents a significant advancement in aluminum waste management, laying the foundation for optimizing synthesis, expanding its functional applications, and exploring its industrial scalability.

*Degree work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Fernando Viejo Abrante. Ph.D. Materials Science and Technology. Codirector: Ana Emilse Coy Echeverria. Ph.D. Materials Science and Technology.

Introducción

Dentro del marco o concepto de desarrollo sostenible, la valorización de residuos y la reutilización de materiales representan una oportunidad para revitalizar la economía colombiana, que se ha caracterizado principalmente por ser extractiva y tener una fuerte dependencia de la exportación de hidrocarburos, minerales y café (The Observatory of Economic Complexity, 2021). Con este enfoque se busca que los materiales desechados por un usuario sean transformados en materias primas que puedan ser utilizadas por terceros (Park et al., 2018), contribuyendo así a mejorar la eficiencia en el uso de estos valiosos recursos.

La Directiva Europea sobre los residuos 2018/851 (Directive (EU), 2018) establece los criterios que definen la condición para que un residuo deje de considerarse residuo ("End-of-waste"). Para ello, debe cumplir con los siguientes requisitos: (a) ser utilizado para fines específicos; (b) tener un mercado claro; (c) satisfacer los requisitos técnicos para las finalidades específicas, y cumplir la legislación y las normas existentes aplicables a los productos; y (d) su uso no debe generar impactos adversos globales para el medio ambiente o la salud. Todos estos criterios son fundamentales con el fin de dar prioridad a las líneas de residuos con mayor volumen.

Entre las líneas de acción que se vislumbran actualmente se encuentra el sector de la industria alimentaria, destacándose el papel de aluminio, utilizado en envases, envolturas y tapas de yogurt. Este material representó un mercado global valorado en 26.3 millones de millones de dólares estadounidenses (USD) en 2022, con una proyección de crecimiento anual del 5.0% hasta 2032, alcanzando 42.3 millones de millones de USD (Market.us, 2023). Sin embargo, el aumento en la comercialización de papel de aluminio ha incrementado la generación de residuos, ya que este material tiende a contaminarse con los alimentos almacenados en él, lo que dificulta su reciclaje. A nivel nacional, la Resolución 1342 de 2020 emitida por el Ministerio de Ambiente y

Desarrollo Sostenible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020), no incluye al papel de aluminio en las regulaciones para la gestión ambiental de residuos de envases y empaques, entre los que sí aparecen el papel, cartón, plástico, vidrio y latas de metal. Esta omisión ha llevado a que las empresas de recolección de residuos municipales y los recicladores de oficio clasifiquen este material como no reciclable.

La disposición indiscriminada del papel de aluminio en vertederos de residuos sólidos municipales plantea diferentes problemas ambientales. Las reacciones asociadas con el aluminio generan un aumento de la temperatura, lixiviado líquido y emisión de gases perjudiciales, como H_2 , NH_3 y CO_2 (Vincent & D, 2010). Un estudio reciente en el cual se simuló las condiciones estándar de un relleno sanitario destacó que la elevada temperatura provocada por la reactividad del aluminio desempeña un papel primario en el envejecimiento de los plásticos, aumentando el riesgo de generación de microplásticos (Huang et al., 2023). Por otro lado, la lixiviación del aluminio en suelos ácidos puede provocar toxicidad en las plantas, afectando negativamente el crecimiento de las raíces y los rendimientos de los cultivos (Kochian et al., 2015).

El impacto económico de esta inadecuada gestión de residuos también es evidente. En 2022, se estima que se descartaron en forma de residuos 12,500 toneladas de papel de aluminio en Colombia, equivalente a la cantidad total importada, ya que no se implementaron medidas efectivas para su reciclaje. Esto se tradujo en un costo para el país de 63.9 millones de USD (alrededor de 261 mil millones de COP). Sin embargo, las exportaciones de este tipo de material representaron sólo 990,000 USD (alrededor de 4 mil millones de COP) (Trade Map, 2022), lo que resulta insuficiente para compensar los gastos asociados. Lo anterior subraya la falta de valor agregado que la economía colombiana aporta a este sector. Por tanto, es imperativo abordar tanto

el reciclaje de los residuos de papel de aluminio como la exploración de alternativas y tecnologías más eficientes, para incrementar su valorización y promover la producción sostenible en el país.

Un área con particular interés radica en la transformación del papel de aluminio reciclado posconsumo en óxido de aluminio (alúmina). Este material ofrece un gran potencial en el campo de la ingeniería para diversas aplicaciones que van desde la producción de materiales adsorbentes para tratamiento de contaminantes, hasta electrónica, catálisis o metalurgia (Ahmed I. Osman et al., 2017; Mercy Njeri Nduni et al., 2021; Mohammad A. Al-Ghouti et al., 2022).

1. Marco teórico

La alúmina destaca entre las cerámicas debido a sus propiedades térmicas, químicas y físicas, convirtiéndola en un material atractivo para diversas aplicaciones ingenieriles. Ha sido ampliamente empleada en materiales refractarios, abrasivos, paquetes de circuitos integrados, así como en materiales adsorbentes y catalizadores industriales (Dabbagh et al., 2010; Shirai et al., 2009). Se encuentra en abundancia en la naturaleza, principalmente como hidróxidos de aluminio en minerales de bauxita, los cuales son mezclas impuras de gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), bohemita ($\gamma\text{-AlOOH}$) y diásporo, todos ellos polimorfos de $\text{AlO}(\text{OH})$ (Lee & Rainforth, 1994).

Tras su extracción, los minerales de bauxita crudos requieren refinamiento mediante el proceso Bayer. En este proceso, la bauxita triturada se disuelve con hidróxido de sodio (NaOH) a temperaturas entre 140 y 280°C, bajo presión. La solución cáustica reacciona con el hidróxido de aluminio, permitiendo que las impurezas se separen por sedimentación y filtración, resultando en una solución clara. Posteriormente, tras la precipitación del hidróxido, se pueden obtener polvos de alúmina mediante tratamiento térmico a temperaturas de calcinación de hasta 1600°C (Shirai et al., 2009). Este proceso elimina las impurezas y produce alúmina con una pureza nominal del 99.5% (Ghanizadeh, 2013). La mayor parte de este producto se destina a la producción de aluminio metálico producido a través del proceso Hall-Heraoult, mientras que el restante se emplea como material cerámico en diferentes aplicaciones químicas.

Además del proceso Bayer, se han desarrollado varios métodos de fabricación para producir polvos de alúmina con la calidad necesaria para su uso como material cerámico. Las rutas de síntesis propuestas en las más recientes investigaciones, que tienen como objetivo la

sostenibilidad mediante el uso de materia prima reciclada, siguen un proceso inverso al Hall Heraoult, es decir, utilizan aluminio metálico posconsumo para obtener alúmina. Particularmente, los residuos posconsumo de papel de aluminio son una valiosa fuente potencial de materia prima para fabricar materiales cerámicos de alúmina en Colombia, especialmente para aplicaciones de catálisis y adsorción de contaminantes.

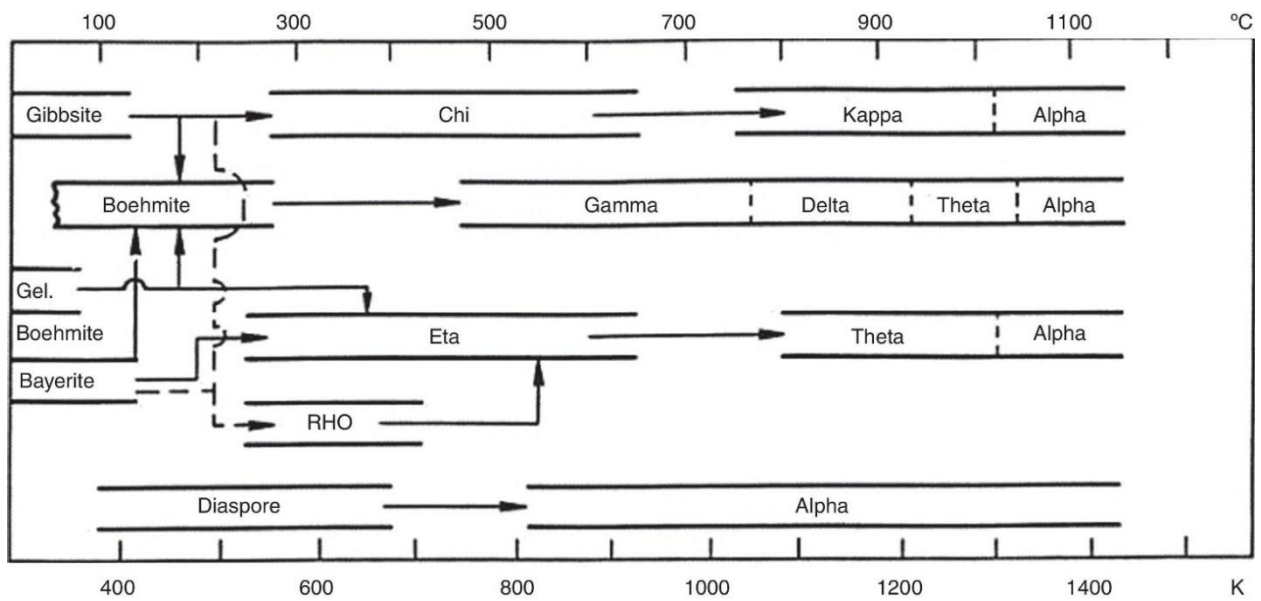
En este contexto, el método de precipitación surge como una ruta de síntesis para convertir estos residuos en alúmina (Ahmed I. Osman et al., 2017). Este método, aún no explorado en Colombia, implica tres etapas clave: i) la digestión ácida de los residuos de papel de aluminio, que permite formar una solución precursora que contiene los iones de aluminio necesarios; ii) la precipitación del hidróxido de aluminio mediante la adición de un agente precipitante, que puede ser orgánico o inorgánico; y, finalmente, iii) el tratamiento térmico para transformar el hidróxido de aluminio en alúmina. Cada una de las etapas involucra diferentes variables como concentración, tiempo, temperatura, entre otras, que pueden afectar de manera crítica a la pureza, composición, morfología, tamaño de partícula, fase cristalina y porosidad de la alúmina obtenida.

Las categorías comerciales de alúmina generalmente se dividen en: fundición (producción de aluminio), calcinada (molido o sin moler), baja en sosa, reactiva, tabular, activada, catalítica y de alta pureza (Shirai et al., 2009). La alúmina, como un óxido polimórfico, presenta una serie de fases de transición antes de estabilizarse en la fase α - Al_2O_3 (Ghanizadeh, 2013), denominadas γ , η , χ , δ , θ , κ , ι , ϵ , cada una con características particulares que pueden ser de interés en ingeniería. Por ejemplo, las alúminas de transición con área superficial media y alta, como γ -, δ - o η - Al_2O_3 , encuentran amplias aplicaciones como catalizadores o soportes de catalizadores en procesos de oxidación total, además de ser utilizadas como membranas y adsorbentes (Busca, 2014).

Por otro lado, fases con menor área superficial y mayor estabilidad, como θ - Al_2O_3 y α - Al_2O_3 , son utilizadas en la fabricación de diversos tipos de nanocerámicas funcionales y estructurales. Los polimorfos de alúmina transicionales más comunes se obtienen mediante la calcinación de bohemita (γ - AlOOH) o de bayerita (α - $\text{Al}(\text{OH})_3$) (figura 1).

Figura 1

Diagrama de estabilidad de fases de los hidróxidos y óxidos de aluminio (Lamouri et al., 2017).



2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Desarrollar un proceso de obtención de alúmina a partir de papel de aluminio reciclado posconsumo para distintas aplicaciones industriales.

2.2. Objetivos específicos

Revisar las diferentes etapas del proceso de obtención para la obtención de alúmina empleando residuos de papel de aluminio como materia prima.

Proponer una ruta de síntesis que permita obtener alúmina a partir de residuos de papel de aluminio a escala de laboratorio.

Realizar un estudio preliminar de diferentes variables de síntesis del proceso de obtención de alúmina a partir de papel de aluminio.

3. Descripción metodológica

3.1. Fase I: Revisión de las etapas del método de síntesis

Se llevó a cabo una revisión de la literatura con el propósito de seleccionar el método de síntesis más adecuado para la obtención de alúmina a partir de residuos de papel de aluminio posconsumo. Se emplearon diversas bases de datos como Scopus, Springer, Taylor & Francis y Web of Science (WOS), utilizando operadores booleanos. Esta revisión sirvió como base fundamental para comprender el estado actual del campo y orientar el desarrollo de la investigación.

3.2. Fase II: Selección de la ruta de síntesis de alúmina a partir de papel de aluminio

Con base en la información recopilada en la revisión bibliográfica, se realizó un análisis comparativo de las distintas rutas de síntesis enfocadas en el método de precipitación para la producción de alúmina. Se evaluaron factores claves como el uso de reactivos, subproductos generados, la pureza del producto final, la morfología del material obtenido, la eficiencia del proceso y su aplicabilidad industrial.

Posteriormente, se determinó la ruta de síntesis más apropiada y se propuso un proceso de obtención de alúmina donde se presentan las variables más importantes que deben ser controladas con relación a la pureza, rendimiento, morfología y cristalinidad del producto obtenido.

3.3. Fase III: Estudios preliminares del proceso de obtención de alúmina a partir de residuos de aluminio

En esta fase, se realizaron diferentes estudios de carácter preliminar que permitieron acotar algunas de las variables del proceso propuesto. Inicialmente, una muestra de residuo de papel de aluminio fue caracterizada mediante espectrometría de absorción atómica, previa digestión ácida para su disolución completa. Los elementos [Fe, Ni] se analizaron con llama directa aire-acetileno (SM 3111 B), y [Al, Si] con llama directa óxido nitroso-acetileno (SM 3111 D), utilizando un espectrómetro marca Agilent. Este análisis permitió determinar la composición química elemental e identificar elementos que pudieran reducir la pureza de la alúmina obtenida.

Posteriormente, con el fin de obtener información sobre el grado de pureza y cristalinidad del hidróxido de aluminio precipitado, se llevaron a cabo estudios preliminares de difracción de rayos X (DRX) bajo diferentes condiciones experimentales de síntesis. Los análisis se realizaron utilizando un difractómetro de polvo BRUKER D8 ADVANCE con geometría DaVinci a un voltaje de 40 kV y una intensidad de corriente de 40 mA, con un rango de registro de 2θ entre 2 y 70°, empleando radiación $\text{CuK}\alpha 1$ y un detector lineal LynxEye.

De forma complementaria, para determinar el intervalo de temperatura del proceso de calcinación e identificar las temperaturas asociadas a las transformaciones de fase y formación de hidróxidos, oxihidróxidos y óxidos de aluminio en función de la temperatura, se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) utilizando un analizador térmico TA-INSTRUMENT, modelo Discovery 5500. Las mediciones se llevaron a cabo en un rango de temperaturas de 30 a 850 °C en atmósfera de oxígeno, con una tasa de calentamiento de 10 °C/min. Finalmente, se llevó a cabo un análisis FTIR para identificar la composición química del producto antes y después del proceso de calcinación.

4. Resultados y Discusión

4.1. Revisión de las etapas del método de síntesis

El reciclaje efectivo y la posterior valorización de los residuos que contienen materiales valiosos son esenciales para transformar estos desechos en recursos útiles, los cuales pueden emplearse como materias primas. Un ejemplo destacado se encuentra en los residuos de papel de aluminio, cuya valorización está ganando interés a nivel global. La relevancia de este tema radica en la urgencia de abordar los problemas asociados con la disposición inadecuada de estos residuos. Además, la valorización del papel de aluminio ofrece la oportunidad de superar las limitaciones de los métodos tradicionales de síntesis de alúmina.

Estos métodos convencionales a menudo requieren la adición de dopantes, modificadores de superficie y semillas de alúmina, lo que no sólo aumenta los riesgos de toxicidad e inflamabilidad, sino que también implica costos adicionales en términos de materia prima y energía (El-Amir et al., 2016). En este sentido, en investigaciones recientes, se ha explorado el uso del papel de aluminio como una fuente alternativa para obtener alúmina a través del método de precipitación, conocido por su rentabilidad y simplicidad. Este proceso implica tres etapas fundamentales, en las cuales se deben evaluar las variables respuesta correspondientes.

4.1.1. Digestión

Durante esta etapa, los residuos de papel de aluminio se disuelven en una solución acuosa compuesta por un ácido fuerte, comúnmente HCl con una concentración en el rango de 5 a 6 M, o agua regia (1 parte de HNO₃ por 3 partes de HCl). Esto da como resultado una solución precursora que contiene las sales de aluminio correspondientes, AlCl₃ o Al(NO₃)₃, según el tipo de ácido seleccionado. Dado que la preparación con agua regia de Al(NO₃)₃ conlleva la liberación de gases

NO_x y cloro (Tabla 1), se prefiere una ruta que no genere subproductos contaminantes. En este sentido, el empleo de HCl genera la sal precursora AlCl₃ y H₂ como subproducto, lo que podría incluso ser una fuente potencial de combustible (Zou et al., 2013).

Tabla 1

Compuestos formados durante la etapa de digestión.

Reactivo	Compuesto	Subproductos	Referencias
HCl	AlCl ₃	H ₂	(Ahmed I. Osman et al., 2017), (Ghulam et al., 2020), (Noor Abdulateef Ghulam et al., 2019), (Sangor & Al-Ghouti, 2023)
Agua Regia	Al(NO ₃) ₃	NOCl Cl ₂	(El-Amir et al., 2016)

En función del uso específico, las impurezas en la sal se eliminan mediante un proceso de cristalización-recristalización seguida de una etapa de filtración para obtener, finalmente, el sólido purificado. Este procedimiento se repite varias veces para garantizar la obtención de un compuesto de alta pureza, como se evidenció en la investigación sobre catálisis heterogénea realizada por A.I. Osman, et al. (Ahmed I. Osman et al., 2017). En este estudio, se lograron monocristales ultrapuros de AlCl₃·6H₂O con un bajo porcentaje de cloro (2.90%), lo que previno el envenenamiento o desactivación del catalizador durante su uso. Esta alta pureza facilitó la preparación de soportes nano-mesoporosos de alúmina altamente activos y bien estructurados, los cuales han demostrado un alto rendimiento en reacciones ácidas, como la deshidratación de metanol para producir éter dimetílico.

4.1.2. *Precipitación*

El objetivo principal es alcanzar la precipitación homogénea de hidróxido de aluminio en medio alcalino mediante la adición de una base orgánica o inorgánica. Se han realizado estudios

con solución de NH_4OH al 35% (p/p) (pH=10) como agente precipitante, que ha demostrado favorecer la formación completa de $\gamma\text{-AlOOH}$, como se describe en la *Tabla 2*. La obtención normalmente finaliza con un posterior proceso de centrifugado, filtrado y lavado para eliminar impurezas y residuos.

Tabla 2

Producto precipitado mediante diferentes agentes precipitantes alcalinos.

Agente Precipitante	Precipitado	Subproductos	Referencia
NH_4OH	$\gamma\text{-AlOOH}$	NH_4Cl	(Ahmed I. Osman et al., 2017), (Sangor & Al-Ghouti, 2023)
NaOH	$\text{Al}(\text{OH})_3$	NaCl	(Noor Abdulateef Ghulam et al., 2019), (Saravanan et al., 2023)
Na_2CO_3	$\text{Al}(\text{OH})_3$	CO_2 NaCl	(Mercy Njeri Nduni et al., 2021)

Por otro lado, se han explorado otros agentes precipitantes como soluciones de NaOH a 5M (pH=9) o de Na_2CO_3 1M que favorecieron la formación de $\text{Al}(\text{OH})_3$. El precipitado debe dejarse sedimentar por tiempos de alrededor de una hora y, posteriormente, ser sometido a un proceso de múltiples etapas de decantación y lavado para reducir la presencia de NaCl antes de ser filtrado (Mercy Njeri Nduni et al., 2021; Noor Abdulateef Ghulam et al., 2019).

4.1.3. *Calcinación*

El tratamiento térmico aplicado al hidróxido de aluminio precipitado varía según la aplicación prevista para las nanopartículas de alúmina y las propiedades específicas deseadas. Una vez filtrada la solución para obtener el precipitado, éste se seca a temperaturas entre 105°C y 120°C durante 3 ó 4 horas para eliminar el agua. Luego, se procede a la calcinación a una temperatura

adecuada para obtener la cristalinidad específica del material requerida para su aplicación posterior.

Se han llevado a cabo varios estudios para explorar los efectos de diferentes temperaturas de calcinación en las propiedades finales de la alúmina. Algunas investigaciones han utilizado procesos de calcinación en el rango de 500-900°C durante 4 horas para producir γ -alúmina, conocida por su estructura porosa y área superficial elevada, lo que la hace adecuada para aplicaciones como catalizadores y adsorbentes. En estas condiciones, se han obtenido nanopartículas de γ -alúmina con un área superficial que varía entre 150 y 400 m²/g y un volumen de poro de 0.25 a 0.35 cm³/g, características idóneas para su utilización en reacciones ácidas, como la deshidratación de metanol, donde han mostrado una alta eficacia catalítica (Ahmed I. Osman et al., 2017), y en la adsorción de diversos colorantes azoicos en medios acuosos, con eficiencias de eliminación de hasta 99.8% y una capacidad máxima de adsorción entre 133.3 y 175.4 mg/g (Ghulam et al., 2020), (Sangor & Al-Ghouti, 2023), (Saravanan et al., 2023).

Por otro lado, se ha demostrado que al mantener temperaturas entre 1050 y 1100°C durante 2 horas, es posible la conversión a la fase α -alúmina. Por encima de dicha temperatura se produce un aumento en el tamaño de partícula y una disminución en el área superficial, lo que mejora las propiedades mecánicas del material y lo hace adecuado para una variedad de aplicaciones, incluyendo la fabricación de materiales refractarios, abrasivos, embalajes electrónicos y cerámicas resistentes a medios agresivos. En este sentido, se ha observado que un aumento de la temperatura de 1100 a 1500 °C genera un incremento del tamaño de partícula α -alúmina de 40 a 200 nm (El-Amir et al., 2016). Por otro lado, se alcanza una densidad relativa con una densidad relativa del 98.82% (porosidad aparente de 1.18%) y una resistencia a la compresión de 708 MPa.

4.2. Selección de la ruta de síntesis de alúmina a partir de papel de aluminio

En la tabla 3 se presenta de manera resumida el análisis de las ventajas e inconvenientes de cada una de las rutas estudiadas en función de la manipulación de los reactivos utilizados, así como en la diferencia de costos entre ellas. También se tuvo en cuenta los impactos ambientales que generan los subproductos a partir del uso de cada ruta de síntesis, ya que pueden aumentar los costos de instalación industrial al requerir sistemas de captura. Además, se destacó la generación de H_2 como subproducto debido a su potencial interés como fuente alternativa de combustible (Incer-Valverde et al., 2023). Finalmente, la temperatura es un factor clave ya que incrementa de forma directa a los costos energéticos.

Durante la etapa de digestión, el uso de HCl destaca por su ventaja económica y por ofrecer un protocolo de manipulación y disposición de residuos más sencillo en comparación con el ácido nítrico, utilizado en el agua regia, y que resulta más costoso. Además, la aplicación de agua regia genera subproductos como NOCl y Cl_2 , lo que añade complejidad en su gestión. Por otro lado, dentro de la etapa de precipitación, el empleo de NaOH ofrece la ventaja de generar principalmente NaCl como subproducto, lo cual simplifica su disposición. En contraste, aunque el Na_2CO_3 es más económico, produce CO_2 , lo que requeriría un sistema adicional de tratamiento de gases debido a sus emisiones de gases de efecto invernadero, representando un desafío a nivel industrial.

Finalmente, la temperatura de calcinación para obtener la fase de alúmina se establece según la aplicación específica que se desea, ya que la fase γ -alúmina se emplea principalmente en la fabricación de estructuras de porosidad controlada en aplicaciones de catálisis y adsorción, mientras que la fase α -alúmina, es empleada por su dureza y resistencia a la compresión en la fabricación de materiales abrasivos, barreras térmicas, etc.

Tabla 3*Ventajas y desventajas de las rutas de síntesis investigadas.*

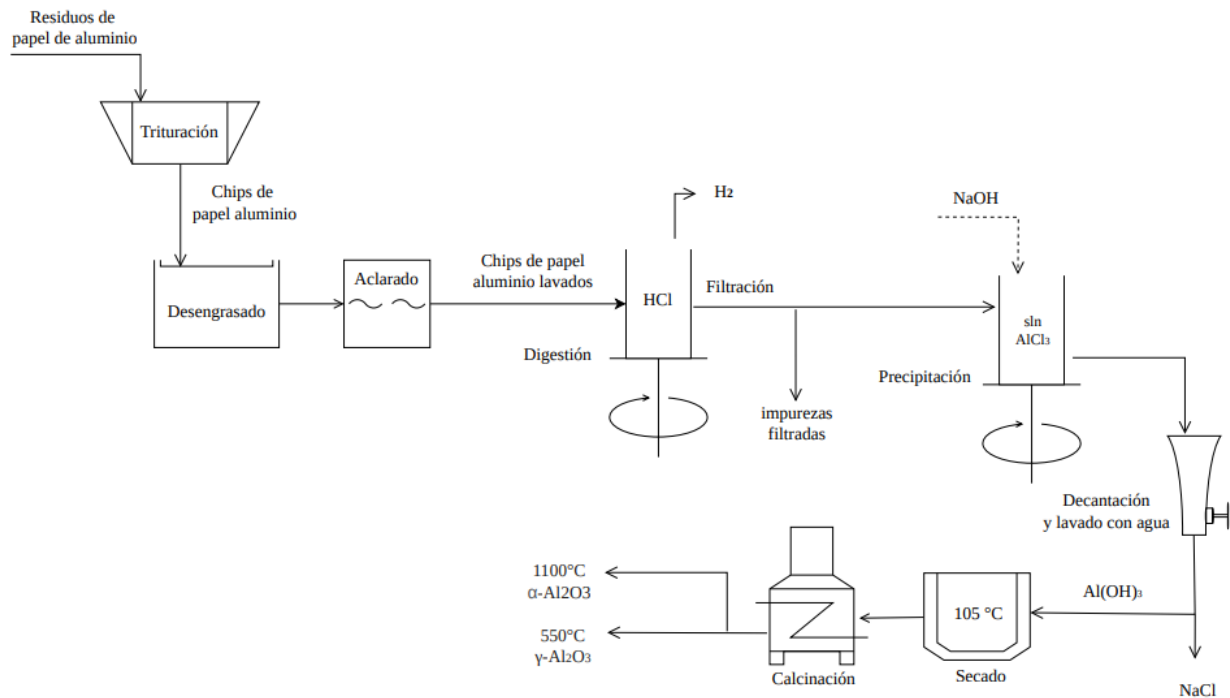
Digestión	Ventajas	Desventajas
HCl (5 a 6 M)	Produce AlCl_3 , que puede ser útil en diversas aplicaciones. Generalmente es considerado de bajo costo, el gasto relativo puede variar según la disponibilidad y demanda del mercado.	La producción de H_2 puede requerir medidas de seguridad adicionales debido a su inflamabilidad.
Agua regia (parte de HNO_3 por 3 partes HCl)	El agua regia es efectiva para solubilizar el aluminio.	El HCl presenta inconvenientes en su manipulación debido a riesgos significativos. La preparación y manipulación de agua regia requieren precauciones especiales debido a su naturaleza altamente corrosiva y tóxica. Además, el ácido nítrico, uno de sus componentes, tiene un costo elevado en comparación con el HCl. El uso de agua regia genera NOCl y Cl_2 como subproductos.
Precipitación	Ventajas	Desventajas
NH_4OH 35% (p/p)	Produce $\gamma\text{-AlOOH}$, con aplicaciones de alta eficiencia superficial. Además, es menos corrosivo que NaOH , lo que facilita su manipulación.	La generación de NH_4Cl requiere manejo y disposición adecuados.
NaOH 5M	NaOH produce $\text{Al}(\text{OH})_3$, precursor común de alúmina. Además de ser una alternativa económica, su estado sólido facilita su manejo.	Se debe tener precaución para emplearse debido a su naturaleza como base fuerte.
Na_2CO_3 1M	Produce $\text{Al}(\text{OH})_3$, similar a NaOH . Es ampliamente empleado a nivel industrial. Destaca por su economía frente a los demás agentes de precipitación.	Implementación de protocolos adecuados para la captura del CO_2 generado.
Calcinación	Ventajas	Desventajas
γ-alúmina	Alta área superficial y volumen de poro adecuados para catálisis heterogénea ácida y adsorción de colorantes azoicos.	Se requiere control de la temperatura y tiempo para garantizar la calidad y uniformidad del producto final.
α-alúmina	La alta densidad y resistencia mecánica permiten la fabricación de cerámicas nanoestructuradas para diversas aplicaciones como materiales refractarios, abrasivos, embalajes electrónicos y cerámicas protectoras.	Se requiere control de la temperatura y tiempo para garantizar la calidad y uniformidad del producto final. El uso de altas temperaturas conlleva a un aumento en los costos y el consumo energético.

En resumen, la ruta de síntesis que implica el uso de HCl como ácido y NaOH como agente precipitante se destaca por sus beneficios en solubilidad, manejo de subproductos y costos. No obstante, es esencial determinar la composición química de la materia prima, ya que puede influir en la pureza del producto obtenido. Por otro lado, la calcinación en el rango de 500 a 1200°C, con ajustes en el tiempo de calcinación, permite la formación de las fases γ -alúmina o α -alúmina con diferentes características morfológicas y cristalinidad en función de la aplicación. Es por ello que tanto la temperatura como el tiempo de calcinación se convierten en aspectos críticos del proceso y requieren de la realización de estudios preliminares que permitan determinar la temperatura con base a la aplicación deseada.

Con base en el anterior análisis, en la figura 2 se propone un protocolo de obtención de alúmina a partir de aluminio posconsumo. Originalmente, los residuos de papel de aluminio deben ser triturados con el fin de reducir su tamaño y facilitar el manejo en etapas posteriores del proceso. A continuación, los residuos triturados son sometidos a un procedimiento de desengrasado en solución jabonosa con el fin de eliminar cualquier resto de aceite o grasa, seguido de un proceso de aclarado con agua destilada para remover los restos de jabón. Una vez lavadas, se procede a realizar la etapa de digestión. Durante dicha etapa, las virutas de aluminio son sumergidas en una solución acuosa de HCl a temperatura ambiente en una concentración que puede oscilar entre 1 y 5 M dependiendo de la velocidad de digestión requerida y del tamaño y cantidad de residuo empleado en el proceso. La solución resultante es filtrada para eliminar cualquier impureza sólida presente.

Figura 2

Diagrama protocolo de obtención de alúmina a partir de residuos de papel de aluminio.



Posteriormente, se continua con el proceso de precipitación donde se adiciona NaOH en concentraciones de alrededor de 5 M. Un aspecto crítico de esta etapa es el pH de la solución, ya que determina el comportamiento del ion Al^{3+} en la formación y estabilidad de los complejos solubles de aluminio (AlOH^{2+} y $\text{Al}(\text{OH})_2^+$) o hidróxido insoluble ($\text{Al}(\text{OH})_3$), afectando críticamente al rendimiento del proceso. De acuerdo con la literatura, a pH bajos, cercanos a 4, predominan especies disueltas como Al^{3+} y AlOH^{2+} . Sin embargo, a medida que el pH aumenta, se forman progresivamente $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$, siendo esta última una especie sólida que precipita cuando la concentración de OH^- es suficiente. Sin embargo, por encima de pH 7, el sólido puede redisolverse, generando el anión $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, característico de soluciones alcalinas (Hem & Roberson, 1967). Es por ello que es importante llevar a cabo estudios preliminares de pH para conocer la estabilidad de las especies formadas y favorecer la producción de hidróxido de aluminio.

Una vez se realiza el proceso de precipitación, la solución es sometida a un proceso de centrifugación-decantación que permite una separación eficiente del precipitado formado. Posteriormente, el precipitado se lava varias veces con agua destilada y se centrifuga para eliminar las sales residuales de NaCl, generadas como subproducto de la reacción. Finalmente, el hidróxido de aluminio obtenido de cada muestra se seca a temperatura de 105°C para eliminar restos de humedad.

4.3. Estudios preliminares del proceso de obtención de alúmina a partir de residuos de papel de aluminio

En la tabla 4 se presenta la composición química elemental del residuo de papel de aluminio empleado en la investigación determinada por Espectrometría de Absorción Atómica (el informe completo se presenta en el Anexo 1). Se observa que el material está compuesto predominantemente por aluminio metálico (Al) con una pureza del 98.71%.

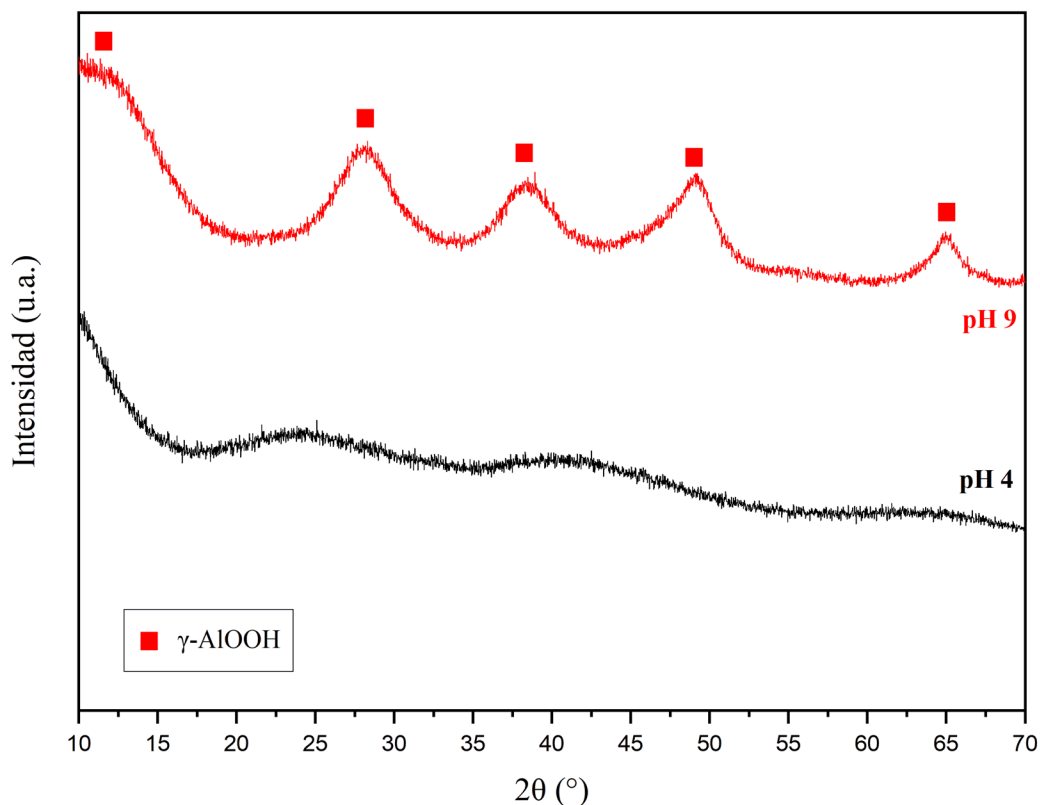
Tabla 4
Composición química del papel de aluminio.

Elemento	%
Al	98.71
Fe	0.728
Si	0.125
Ni	0.003
Otros	0.434

Adicionalmente, se identificaron pequeñas cantidades de impurezas elementales que, en conjunto, representan menos del 1.3% del material analizado. Entre estas impurezas destacan el hierro (Fe) con 0.728%, el silicio (Si) con 0.125% y el níquel (Ni) con 0.003%, junto con otras impurezas en concentraciones menores que suman un 0.434%.

A continuación, se llevó a cabo un análisis por DRX para determinar la composición y cristalinidad de los productos obtenidos por precipitación para diferentes pH (4 y 9) y secada a 105°C, con objeto de establecer un intervalo de pH de síntesis que permita posteriormente obtener un producto de mayor pureza y rendimiento posible (Figura 3).

Figura 3 Patrones DRX de hidróxido de aluminio precipitado a valores de pH 4 y pH 9.



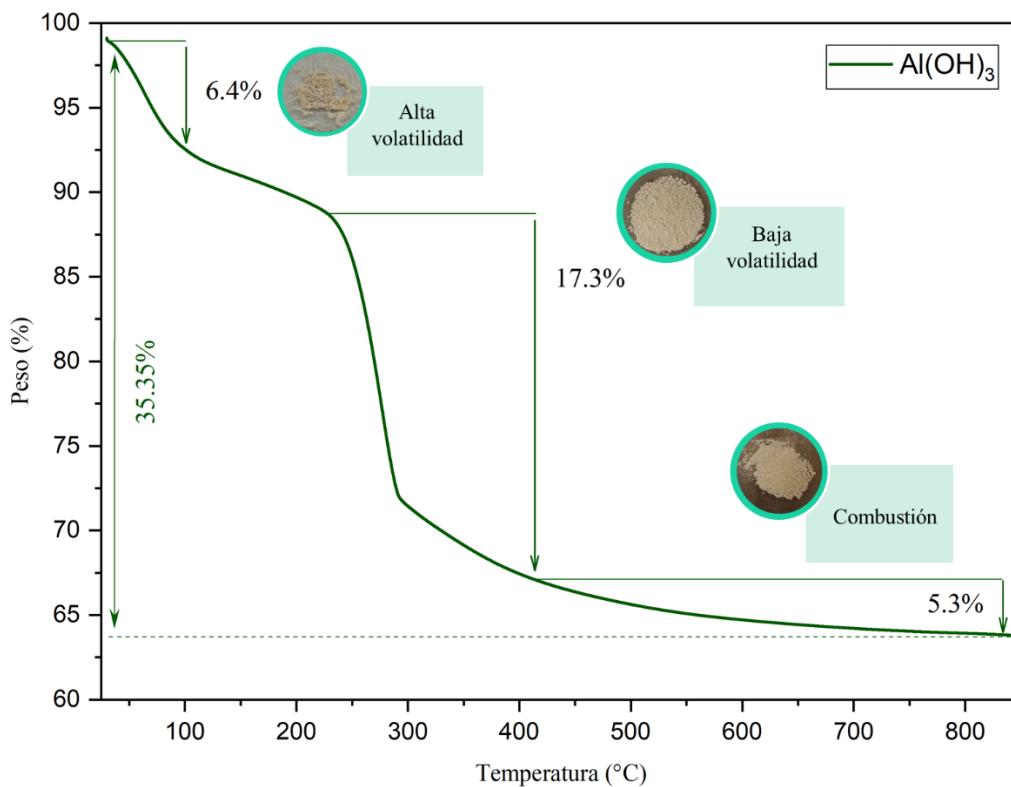
Los resultados muestran que la muestra preparada a pH 4 presentó una estructura amorfa, mientras que la muestra a pH 9, aunque también presenta un carácter fuertemente amorfo, exhibió picos de difracción en posiciones $2\theta = 13.06^\circ$, 28.18° , 38.63° , 49.15° y 65° , correspondientes a la fase γ -AlO(OH) (PDF 01-083-1505) y que son coherentes con los reportados en otro estudio donde se obtuvo γ -AlO(OH) mediante tratamiento hidrotérmico a 60 °C (Van Truong & Kim, 2022). Por otro lado, no se detectaron otro tipo de compuestos, por lo que se concluye que para esos valores

de pH, se evita la precipitación de otros compuestos diferentes al de aluminio, resaltando la pureza del producto obtenido.

De forma complementaria, en la Figura 4 se presentan los resultados del análisis termogravimétrico realizado a la muestra obtenida después del proceso de precipitación.

Figura 4

Curva TGA de la muestra calcinada en atmósfera de oxígeno hasta 850°C.



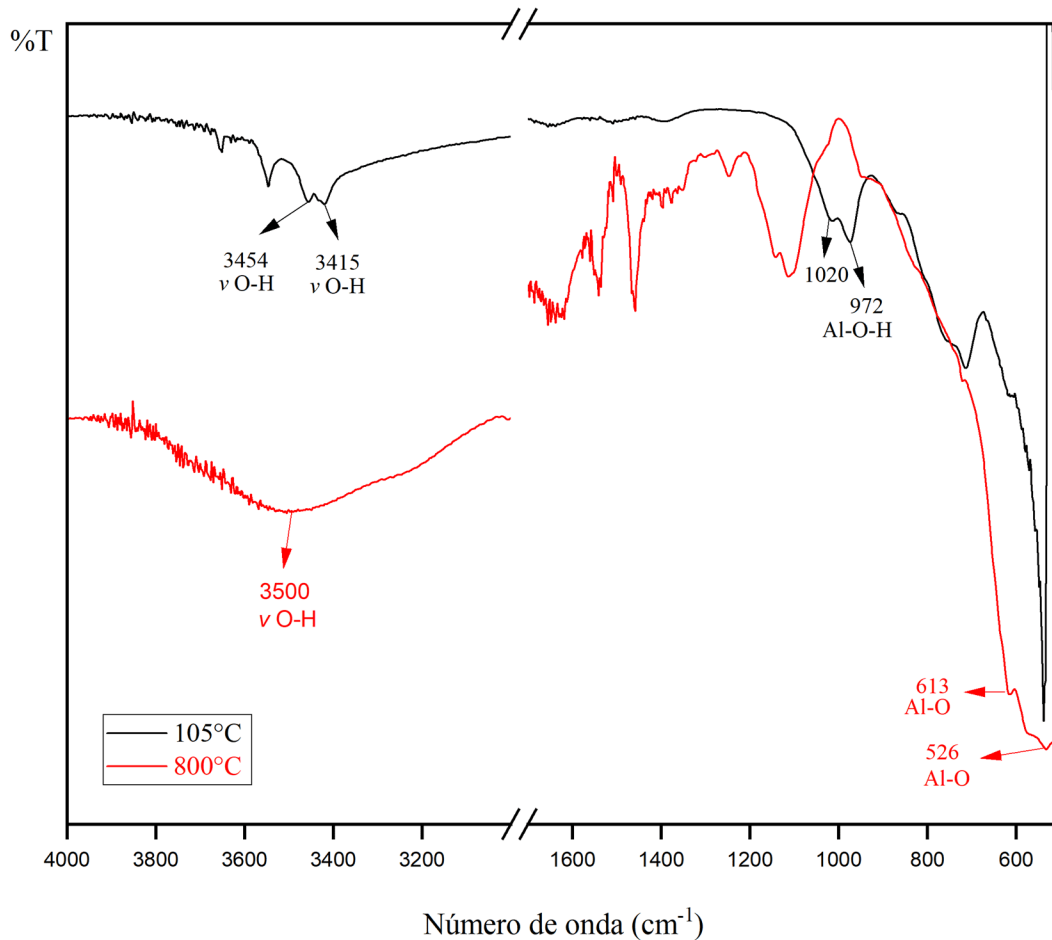
La curva TGA reveló tres etapas principales de pérdida de peso. La primera etapa, que representó el 6.4% de la masa inicial, se produjo hasta alrededor de 100 °C y se asoció a la desorción de agua adsorbida en la superficie del material. Entre 230 y 400°C, se registró una segunda pérdida de peso más significativa (17.3%) que, de acuerdo con el análisis por DRX, se asoció a un proceso de deshidratación de la bohemita $\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ a las fases metaestables de óxidos de aluminio o alúmina ($\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$ y $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$) (Benítez Guerrero et al., 2013). Ya por encima de

400°C, existe una pérdida de masa progresiva asociada al incremento del ordenamiento cristalino y la reducción de porosidad que provoca que exista un aumento de la densidad estructural hasta producir finalmente γ -Al₂O₃. Con base en este resultado, se establece que el rango de estudio de temperatura de calcinación debe ser superior al menos a 500°C.

Complementando el anterior análisis, en la figura 5 se muestra el análisis FTIR de la muestra secada en estufa a 105°C y la misma muestra calcinada posteriormente a 800°C durante 4 horas. Este estudio evidenció las transformaciones químicas y estructurales derivadas

Figura 5

Espectros FTIR de las muestras de secada a 105°C y calcinada a 800 °C por 4 horas.



del tratamiento térmico. En la muestra secada se observan bandas en torno a 3400 cm^{-1} asociadas a las vibraciones de tensión del enlace O-H (νOH) de los grupos hidroxilo procedentes del agua estructural de la bohemita.

En la muestra calcinada a $800\text{ }^\circ\text{C}$, estas bandas se transforman en una banda ancha centrada en 3500 cm^{-1} , atribuida a los grupos hidroxilo libres en la estructura $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ lo que favorece la adsorción de agua ambiental (Shirai et al., 2009), (Hariharan et al., 2014). Por otro lado, en la muestra secada se aprecian bandas a 972 cm^{-1} y su hombro en 1020 cm^{-1} corresponden a los modos $\delta_s\text{ Al-O-H}$ y $\delta_{as}\text{ Al-O-H}$, característicos de los hidróxidos de aluminio (Hou et al., 2005). Dichas bandas desaparecen en la muestra calcinada para la cual aparecen de forma prominente bandas a 526 cm^{-1} y 613 cm^{-1} , asociadas a las vibraciones de estiramiento de los enlaces Al-O (Parida et al., 2009).

5. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un proceso para la obtención de alúmina a partir de residuos de papel de aluminio posconsumo, fundamentado en una revisión bibliográfica detallada de las etapas del método de precipitación. Esta revisión permitió comparar rutas alternativas, identificar sus ventajas e inconvenientes y establecer criterios claros para seleccionar la ruta de síntesis más adecuada. La integración de conocimientos teóricos y experimentales aseguró un enfoque sólido para el diseño del proceso propuesto.

Se realizaron estudios preliminares los cuales se centraron en caracterizar la composición elemental de la materia prima, compuesta predominantemente por aluminio metálico. Esta caracterización fue importante para evaluar su influencia en las etapas posteriores del proceso. Los análisis de DRX confirmaron que, al trabajar en un rango de pH entre 4 y 9, se evitó la formación de hidróxidos contaminantes, contribuyendo a la obtención de un producto con alta pureza.

En la etapa de calcinación, se destacó la relevancia del control de variables críticas, como la temperatura, dada su influencia en los costos energéticos y en la evolución estructural del material. Los análisis de TGA y FTIR indicaron la eliminación de grupos hidroxilo y la reorganización de enlaces Al-O a 800°C, sugiriendo la formación de estructuras características de $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$. Sin embargo, la confirmación definitiva de la fase cristalina requiere análisis complementarios mediante técnicas como DRX. Adicionalmente, la transición hacia fases de mayor estabilidad, como $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, demanda ajustes precisos en las condiciones de calcinación.

Este estudio constituye un avance en el desarrollo de metodologías sostenibles para la valorización de residuos de papel de aluminio posconsumo. Los resultados obtenidos establecen las bases para optimizar las condiciones de síntesis, ampliar las aplicaciones funcionales de las

fases obtenidas y explorar su escalabilidad industrial, abriendo oportunidades para futuras investigaciones en materiales avanzados.

6. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos, se plantean las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones, orientadas a optimizar el rendimiento del proceso, mejorar las propiedades del material sintetizado y explorar aplicaciones industriales:

Caracterizar los residuos de papel de aluminio posconsumo provenientes de diferentes fuentes, considerando variaciones en su composición química que puedan influir en la reproducibilidad y calidad del producto final.

Estudiar las variables de la calcinación, incluyendo temperatura y tiempo, para evaluar su influencia en la evolución estructural, cristalinidad y pureza de las fases de alúmina obtenidas, además de optimizar los costos energéticos asociados.

Evaluar el desempeño de las fases de alúmina sintetizadas en aplicaciones industriales, como la adsorción de contaminantes en agua o el uso como catalizadores en procesos químicos, con el fin de diversificar sus posibles usos y promover un enfoque más sostenible en el desarrollo de materiales avanzados a partir de residuos posconsumo.

Referencias Bibliográficas

- Ahmed I. Osman, Jehad K. Abu-Dahrieh, Mathew McLaren, Fathima Laffir, Peter Nockemann, & David Rooney. (2017). A Facile Green Synthetic Route for the Preparation of Highly Active γ -Al₂O₃ from Aluminum Foil Waste. *Scientific Reports*, 7(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-03839-x>
- Benítez Guerrero, M., Pérez-Maqueda, L. A., Castro, P. P., & Pascual 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>
- Busca, G. (2014). The surface of transitional aluminas: A critical review. *Catalysis Today*, 226, 2–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.08.003>
- Dabbagh, H. A., Taban, K., & Zamani, M. (2010). Effects of vacuum and calcination temperature on the structure, texture, reactivity, and selectivity of alumina: Experimental and DFT studies. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 326(1), 55–68.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molcata.2010.04.007>
- Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 Amending Directive 2008/98/EC on Waste, 109 (2018).
<http://data.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj>
- El-Amir, A. A. M., Ewais, E. M. M., Abdel-Aziem, A. R., Ahmed, A., & El-Anadouli, B. E. H. (2016). Nano-alumina powders/ceramics derived from aluminum foil waste at low

temperature for various industrial applications. *Journal of Environmental Management*, 183, 121–125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.072>

Ghanizadeh, S. (2013). Synthesis and processing of nanostructured alumina ceramics. *Ph.D. Thesis, Loughborough University, England*.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:135878604>

Ghulam, N. A., Abbas, M. N., & Sachit, D. E. (2020). Preparation of synthetic alumina from aluminium foil waste and investigation of its performance in the removal of RG-19 dye from its aqueous solution. *Indian Chemical Engineer*, 62(3), 301–313.
<https://doi.org/10.1080/00194506.2019.1677512>

Hariharan, M. S., Varghese, N., Cherian, A. B., Paul, J., & Benny, A. S. (2014). *Effect of Chitosan on the Size Distribution of Alpha Alumina Nano Particles*.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:212553700>

Hem, J. D., & Roberson, C. E. (1967). *Form and stability of aluminium hydroxide complexes in dilute solution*. 1827-A. <https://www.osti.gov/biblio/5607253>

Hou, H., Xie, Y., Yang, Q., Guo, Q., & Tan, C. (2005). Preparation and characterization of γ -AlOOH nanotubes and nanorods. *Nanotechnology*, 16(6), 741. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/6/019>

Huang, Q., Yang, C., Cheng, Z., Wang, H., Mojiri, A., Zhu, N., Qian, X., Shen, Y., Wu, S., & Lou, Z. (2023). Exploring into a light-avoided environment: Mechanical-thermal coupled conditions responsible for the aging behavior of plastic waste in landfills. *Water Research*, 242, 120162. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120162>

- Incer-Valverde, J., Korayem, A., Tsatsaronis, G., & Morosuk, T. (2023). “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. *Energy Conversion and Management*, 291, 117294. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117294>
- Kochian, L. V, Piñeros, M. A., Liu, J., & Magalhaes, J. V. (2015). Plant Adaptation to Acid Soils: The Molecular Basis for Crop Aluminum Resistance. *Annual Review of Plant Biology*, 66(1), 571–598. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114822>
- Lamouri, S., Hamidouche, M., Bouaouadja, N., Belhouchet, H., Garnier, V., Fantozzi, G., & Trellat, J. F. (2017). Control of the γ -alumina to α -alumina phase transformation for an optimized alumina densification. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 56(2), 8. http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:48062953
- Lee, W. E., & Rainforth, W. M. (1994). *Ceramic microstructures: Property control by processing*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/maco.19960470617>
- Market.us. (2023). Aluminum Foil Market to Generate Revenue of US\$ 42.3 Bn by the End of 2032. <https://www.globenewswire.com/en/news-release/2023/04/20/2650739/0/en/Aluminum-Foil-Market-to-Generate-Revenue-of-US-42-3-Bn-by-the-End-of-2032-Market-US-Study.html>
- Mercy Njeri Nduni, Aloys Mosima Osano, & Bakari Chaka. (2021). Synthesis and characterization of aluminium oxide nanoparticles from waste aluminium foil and potential application in aluminium-ion cell. *Cleaner Engineering and Technology*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100108>
- Mohammad A. Al-Ghouti, Mariam Khan, Aakasha Malik, Majeda Khraisheh, Dima Hijazi, Sana Mohamed, Shaikha Alsorour, Razan Eltayeb, Fay Al Mahmoud, & Johaina Alahmad. (2022).

- Development of novel nano- γ -Al₂O₃ adsorbent from waste aluminum foil for the removal of boron and bromide from aqueous solution. *Journal of Water Process Engineering*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103312>
- Noor Abdulateef Ghulam, Mohammed Nsaif Abbas, & Dawood Eisa Sachit. (2019). Preparing of Alumina from Aluminum Waste. *Int. J. Innov. Sci. Res. Technol.*, 4, 326–331.
- Parida, K. M., Pradhan, A. C., Das, J., & Sahu, N. (2009). Synthesis and characterization of nano-sized porous gamma-alumina by control precipitation method. *Materials Chemistry and Physics*, 113(1), 244–248. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2008.07.076>
- Park, J., Díaz-Posada, N., & Mejía-Dugand, S. (2018). Challenges in implementing the extended producer responsibility in an emerging economy: The end-of-life tire management in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 189, 754–762. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.058>
- Resolución 1342 de 2020 [Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. *Por la cual se modifica la Resolución 1407 de 2018 y se toman otras dereminaciones.*
- Sangor, F. I. M. S., & Al-Ghouti, M. A. (2023). Waste-to-value: Synthesis of nano-aluminum oxide (nano- γ -Al₂O₃) from waste aluminum foils for efficient adsorption of methylene blue dye. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 8, 100394. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100394>
- Saravanan, K., Shanthi, B., Ravichandran, C., Venkatachalapathy, B., Sathiyarayanan, K. I., Rajendran, S., Karthikeyan, N. S., & Suresh, R. (2023). Transformation of used aluminium foil food container into AlOOH nanoflakes with high catalytic activity in anionic azo dye

reduction. *Environmental Research*, 218, 114985.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114985>

Shirai, T., Watanabe, H., Fuji, M., & Takahashi, M. (2009). *Structural properties and surface characteristics on aluminum oxide powders.*

<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:55301727>

The Observatory of Economic Complexity (OEC). (2021). *Colombia.*

<https://oec.world/es/profile/country/col>

Trade Map. (2022). *Estadísticas del comercio para el desarrollo internacional de las empresas.*

<https://www.trademap.org/>

Van Truong, T., & 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, 113448.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113448>

Vincent, C. G., & D, S. T. (2010). Aluminum Reactions and Problems in Municipal Solid Waste Landfills. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*,

14(4), 258–265. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.1944-8376.0000045](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.1944-8376.0000045)

Zou, H., Chen, S., Zhao, Z., & Lin, W. (2013). Hydrogen production by hydrolysis of aluminum.

Journal of Alloys and Compounds, 578, 380–384.

<https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2013.06.016>

Apéndices

Apéndice A. Informe completo Espectrometría de Absorción Atómica

Figura 6

Informe detallado de la composición química elemental del residuo de papel de aluminio mediante Espectrometría de Absorción Atómica

	INFORMES TÉCNICOS DE ENSAYO	CÓDIGO	FT-GL-01		
	LABORATORIO DE SERVICIOS QUÍMICOS MINERO METALÚRGICOS Y AMBIENTALES	VERSIÓN	4		
		FECHA	2018	06	18
		PÁGINA	2	DE	2

INF-G-24-503-I	INFORME TÉCNICO DE ENSAYO	FECHA	2024	12	19
			AA	MM	DD

RESULTADOS				
Tabla 1. Resultados de metales por absorción atómica – Muestra #1				
Muestra	Aluminio % Al	Hierro % Fe	Silicio % Si	Niquel % Ni
Muestra #1	98,71	0,728	0,125	0,003

NOTA: Los datos aquí reportados corresponden únicamente a la(s) muestra (s) analizada(s) y no deben ser reproducidos en forma parcial, sin autorización del Director del Grupo GIMBA. El laboratorio no incluye, ni hace análisis, recomendaciones, conclusiones y/o declaración de conformidad de los resultados obtenidos.

FREDDY GARAVITO CORDERO
 Director Técnico del Laboratorio de servicios Químicos,
 Minero – Metalúrgicos y Ambientales - GIMBA
 Universidad Industrial de Santander - UIS
Revisó.

JULIO ANDRÉS PEDRAZA AVELLA
 Director Laboratorio de servicios Químicos,
 Minero – Metalúrgicos y Ambientales - GIMBA
 Universidad Industrial de Santander - UIS
Aprobó.

Elaboró:
 Viviana Rojas
 Coordinadora de Calidad
 UIS-Presente.

FIN DEL INFORME