

# JATRAMI

## SALTA 2023





**JATRAMI**  
SALTA 2023



**LIBRO DE LAS  
XIII JORNADAS  
ARGENTINAS DE  
TRATAMIENTO DE  
MINERALES  
(XIII JATRAMI)**

**4, 5 y 6 DE OCTUBRE DE 2023  
SALTA, ARGENTINA**



XVI Jornadas Nacionales de Tratamiento de Minerales

Universidad Nacional de Salta

Facultad de Ingeniería

Instituto de Beneficio de Minerales

Libro Digital: descarga y online

I.S.B.N. N°: 978-987-633-617-8

Universidad Nacional de Salta

Av. Bolivia 5150 – Salta Capital – CP 4400 – Arg.

Tel: 0387-4258707 – FAX: 0387-4325745

E-mail: [seu@unsa.edu.ar](mailto:seu@unsa.edu.ar)

Web: [www.seu.unsa.edu.ar](http://www.seu.unsa.edu.ar)

EUNSa – Editorial de la Universidad Nacional de Salta

-Dirección: Rubén Emilio Correa.

Secretario de Extensión Universitaria.

-Coordinación y Registro: Juan Carlos Palavecino.

E-mail: [editorialuniversitaria.eunsa@gmail.ar](mailto:editorialuniversitaria.eunsa@gmail.ar)

Queda prohibida la reproducción total o parcial del texto de la presente obra en cualquiera de sus formas, electrónica o mecánica, sin el consentimiento previo y escrito del autor.

I.S.B.N. N°: 978-987-633-617-8

## **Comité Organizador**

**Presidente:** Dra. Silvana Valdez

**Vicepresidente:** Ing. Leung Kwok

**Secretaria:** Lic. Mabel Magarzo

## **Vocales:**

Dra. Agustina Orce

Ing. Adolfo Riveros Zapata

Ing. Martín Thames Cantolla

Dra. Noemí Tolaba

Ing. Judith Angélica Arenas

Dra. María Virginia Quintana

Dra. María de los Ángeles Tinte Montalbetti

Dra. Silvina Echazú

Geo. Marianela De Paul

Geo. Natalia Salado Paz

## **Colaboradores:**

Tco. Martín Esteban Bonini

Tco. Roque Nicolás Álvarez

Tco. Matías Alejandro Suyo

Tco. Enrique Soria

Sr. Albornoz Pablo Facundo

Sr. Enrique Morales

Srta. Selva Guanuco

Sr. Orlando Vaca

## **Comité Científico**

Dra. Silvana Valdez (INBEMI- UNSa)  
Dra. Agustina Orce (INBEMI- UNSa)  
Ing. Adolfo Riveros Zapata (INBEMI- UNSa)  
Ing. Horacio R. Flores (INBEMI-UNSA)  
Dra. María de los Ángeles Tinte Montalbetti (INBEMI- UNSa)  
Ing. Marianella De Paul (UNSa)  
Dra. María Vicich (UNSa)  
Ing. Lucia Garaventa (CIPROMIN-INTEMIN)  
Mag. Luis Gutierrez (IIM-UNSJ)  
Dr. Marcelo Bellini (IIM-UNSJ)  
Dr. Marcelo Esquivel (CNEA-CONICET-UNCo)  
Dr. Mario Rodríguez (UNCu)  
Dra. Natalia Marchevsky (UNSL)  
Dr. Nicolás Carrizo Rosales (UNLaR)  
Dra. Patricia Chiacchiarini (UNCo. CONICET)  
Dra. Vanesa Bazán (IIM-UNSJ)  
Mag. Roberto Meissl (IIM-UNSJ)  
Mag. Ivana Orozco (IIM-UNSJ)  
Dra. Alejandra Giaveno (UNCo. CONICET)  
Mag. Andre Santos (UFMG-BRASIL)  
Dr. Eduardo Donati (CINDEFI-CONICET)  
Dr. Eduardo Marchevsky (UNSL. CONICET)  
Dra. Elena Brandaleze (FRSN-UTM)  
Dr. Fernando Torres (IDIM-UNCA)  
Dr. Luis Gonzaga Santos Sobral (CETEM-BRASIL)  
Dr. Patricio Navarro Donoso (USACH-CHILE)  
Dr. Paulo Braga (CETEM-BRASIL)  
Dr. Roberto Parra (UdeC-Chile)

# ORGANIZA



# AUSPICIA



# COLABORA



Subsecretaría de Ciencia y Tecnología  
Ministerio de Educación,  
Cultura, Ciencia y Tecnología  
**Gobierno de Salta**

## **PREFACIO**

Este libro contiene los trabajos de investigación presentados en las XVI Jornadas Argentinas de Tratamiento de Minerales. Estas jornadas se llevaron a cabo en la ciudad de Salta, del 4 al 6 de Octubre de 2023.

El objetivo de estas Jornadas es estrechar vínculos entre los ámbitos académico, empresarial y gubernamental y promover el intercambio de experiencias; ellas constituyen un medio para divulgar nuevas tecnologías de procesamiento de minerales y salmueras como así también del tratamiento de residuos y efluentes para la conservación del medio ambiente y estrechar vínculos universidad-empresa-sociedad.

Esta edición de las Jornadas se realizó de manera mixta, permitiendo participar de manera activa a nuestros colegas de Mendoza, San Juan, San Luis, Catamarca, Neuquén, Buenos Aires, Chile y Brasil, independientemente de las circunstancias que les impidieron estar de manera presencial.

Las áreas temáticas propuestas fueron:

- **HIDROMETALURGIA, PIROMETALURGIA Y BIOMETALURGIA**
- **MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS**
- **CARACTERIZACIÓN Y PROCESAMIENTO DE MINERALES**
- **MEDIO AMBIENTE (Tecnologías limpias)**
- **OTRAS TÉCNICAS APLICADAS AL PROCESAMIENTO DE MINERALES**
- **GEOLOGÍA ECONÓMICA Y YACIMIENTO MINERALES**
- **ECONOMÍA Y LEGISLACIÓN MINERA. GESTIÓN EMPRESARIAL.**

Las conferencias plenarias fueron dictadas por reconocidos profesionales del medio, quienes comentaron sobre el litio y su rol en la transición energética, innovación en la caracterización de yacimientos de litio, y el empleo de la inteligencia artificial aplicada al mantenimiento. Contamos con una Mesa Panel conformada por mujeres exitosas del ámbito académico, empresarial y gubernamental, quienes presentaron su experiencia, y los desafíos que se les presentan al ocupar puestos que tradicionalmente se destinaban a los hombres.

Les agradecemos su participación, presencial y virtual, sin Uds estas jornadas no serían una realidad.

Comité organizador XVI JATRAMI

## ÍNDICE DE TRABAJOS

### **HIDROMETALURGIA, PIROMETALURGIA Y BIOMETALURGIA**

**CINÉTICA DE EXTRACCIÓN DE ARSÉNICO REMANENTE EN CALCITAS PROVENIENTES DE CONCENTRADOS SULFURADOS DE MOLIBDENO-COBRE – RENIO** 14

Orozco I.

**MODELADO DE LA LIXIVIACION DEL COBRE A PARTIR DE RAEE UTILIZANDO TECNICAS DE PROCESAMIENTO DE MINERALES** 21

Orozco, I.; García L.; Salem, C.; Quiroga, V.; Gaspar, F.

**PROCESAMIENTO DE UN MINERAL AURÍFERO CARBONOSO CON MODERADO PREGROBBING** 28

Meissl, R.J.; Quinzano, V.A.; Caroprese, M.A.

**SÍNTESIS DE FORSTERITA Y ESPINELA DE ALUMINATO DE MAGNESIO Y EXTRACCIÓN DE PLATA MEDIANTE LA CALCINACIÓN DE CELDAS SOLARES DE SILICIO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS DESCARTADOS CON BISCHOFITA** 35

Ramos I. D. E.; Orosco P. R.; Barrios O. C.; Paéz Jerez A. L.; Ling Sham E.; Tesio A. Y.

**RECICLAJE DEL ALUMINIO PROVENIENTE DE LAS BATERÍAS DE ION-LITIO AGOTADAS PARA LA SÍNTESIS DE  $MgAl_2O_4$**  41

Barrios, O.; Ramos, I.; Barbosa, L.; Orosco P.

**SÍNTESIS DE SÍLICE AMORFA A PARTIR DE PRODUCTOS DE FLUORACIÓN DE MINERALES CON BIFLUORURO DE AMONIO** 48

Alexander C. Resentera; Dalma S. Olima; Marcelo R. Esquivel; y Mario H. Rodriguez

**SÍNTESIS DE FLUROSILICATOS DE AMONIO Y SU COMPORTAMIENTO TERMOCINÉTICO** 54

Resentera, A.; Esquivel, M.; Rodriguez, M.

**ESTUDIO DE LA DISOLUCIÓN DE  $LiF$  CON SULFATO DE ALUMINIO: OPTIMIZACIÓN Y TESTEO EN EL SISTEMA  $\alpha$ -ESPODUMENO/KF** 60

Finno, J.; Pinna E.G.; Braga, P.; Rosales G.D.

## **RECICLAJE DEL ALUMINIO PROVENIENTE DE LAS BATERÍAS DE ION-LITIO AGOTADAS PARA LA SÍNTESIS DE $MgAl_2O_4$**

### **RECYCLING OF THE ALUMINUM FROM SPENT LITHIUM-ION BATTERIES FOR THE SYNTHESIS OF $MgAl_2O_4$**

Barrios, O.<sup>1/2</sup>, Ramos, I.<sup>3</sup>, Barbosa, L.<sup>1/2</sup>, Orosco P.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones en Tecnología Química (INTEQUI), A. Brown 1455, San Luis, D5700, Argentina

<sup>2</sup>Facultad de Química, Bioquímica y Farmacia (FQBF), UNSL, Ejercito de los Andes 950, San Luis, D5700, Argentina.

<sup>3</sup>Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Materiales Avanzados en Acumulación de Energía (CIDMEJu), Av. Martijena s/n, Jujuy, Y4612, Argentina.

Contacto: orianabarrios2511@gmail.com

#### **RESUMEN**

La creciente demanda mundial de baterías de ion litio (LIB) y su vida útil relativamente corta, ha traído como consecuencia una gran acumulación de baterías desechadas cuya disposición inadecuada puede afectar negativamente al medioambiente y a la salud humana. Una gestión adecuada de las mismas involucra la recolección, clasificación y reciclaje de las LIB agotadas (SLIB). El reciclaje del material catódico de las SLIB ha sido extensamente estudiado. Sin embargo, pocas investigaciones se enfocan en el reciclaje de las láminas de aluminio (Al). Estas láminas se usan en el cátodo de las SLIB como soporte del material catódico y funcionan como colectores de corriente. Este residuo metálico se podría aprovechar para sintetizar materiales con aplicación tecnológica que requieran al Al como materia prima. Un ejemplo de ello es la espinela de aluminato de magnesio ( $MgAl_2O_4$ ), la cual tiene propiedades físicas de interés tecnológico y se puede aplicar en conductores superiónicos, aislantes eléctricos o, incluso, en superconductores.

En este trabajo se investigó el reciclaje del Al proveniente de las SLIB para sintetizar  $MgAl_2O_4$ . Las láminas de Al fueron pretratadas con  $NH_4Cl$  y posteriormente calcinadas en presencia de  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  para producir la reacción de síntesis. Se realizaron ensayos en condiciones no-isotérmicas e isotérmicas, en un analizador termogravimétrico. Se estudió el efecto de temperatura y tiempo de reacción para la formación de  $MgAl_2O_4$ . Los productos y residuos sólidos de la síntesis fueron caracterizados empleando diferentes técnicas, como difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (SEM) y microanálisis por espectroscopia de rayos X (EDS). El estudio se llevó a cabo en el intervalo de temperatura comprendido entre 500 y 900 °C y tiempos de reacción entre 15 y 120 min. Los resultados experimentales mostraron que las condiciones óptimas de formación de la espinela fueron 700 °C y un tiempo de reacción de 60 min.

**Palabras claves:** Aluminio, Reciclaje, Síntesis, Espinela de aluminato de magnesio

#### **ABSTRACT**

The growing global demand for lithium-ion batteries (LIB) and the fact that they have a relatively short lifespan have resulted in a large accumulation of spent batteries whose improper disposal can negatively affect the environment and human health. Proper management involves collection, sorting and recycling of spent LIB. The recycling of the cathode material from spent

LIB has been extensively studied. However, little research focuses on the recycling of aluminum (Al) foils. These foils are used in the cathode of LIB as a support for the cathode material and function as current collectors. This metal residue could be used to synthesize materials with technological applications that require Al as raw material. An example of this is the magnesium aluminate spinel ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), which has physical properties of technological interest and can be applied in superionic conductors, electrical insulators or even superconductors.

In this work, the recycling of Al from spent LIBs to synthesize  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  was investigated. The Al foils were pre-treated with  $\text{NH}_4\text{Cl}$  and then calcined in the presence of  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  to produce the synthesis reaction. Assays were carried out under non-isothermal and isothermal conditions in a thermogravimetric analyzer. The effect of both temperature and reaction time for the formation of  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  was studied. The products and solid residues of the synthesis were characterized using different techniques, such as X-ray diffractometry (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and microanalysis by X-ray spectroscopy (EDS). The study was carried out in the temperature range between 500 and 900 °C and reaction times between 15 and 120 min. The experimental results showed that the optimum conditions to produce the spinel were 700 °C and a reaction time of 60 min.

**Keywords:** Aluminum, Recycling, Synthesis, Magnesium aluminate spinel.

## INTRODUCCIÓN

Las baterías de iones de litio se caracterizan por tener una alta densidad de energía, alto voltaje, alta eficiencia, bajo peso y efecto memoria casi despreciable. Por ello, se han usado exitosamente como fuente de energía en dispositivos electrónicos portátiles como teléfonos celulares, computadoras portátiles, tabletas, cámaras digitales y herramientas eléctricas inalámbricas, entre otros. En los últimos años, las LIB han cobrado gran relevancia debido a su empleo como fuente de energía para vehículos eléctricos [1].

El aumento de la demanda de las LIB impulsa un aumento de la producción de baterías. Las LIB tienen una vida útil relativamente corta (aproximadamente de 3 a 5 años), por lo tanto, a la larga se puede generar un gran número de baterías agotadas [2]. Hoy en día, las SLIB se gestionan de forma inadecuada, siendo arrojadas a basurales urbanos, vertederos de municipalidad, depósitos electrónicos, entre otros. Con el tiempo las SLIB liberan sustancias contaminantes que afectan negativamente el medioambiente y la salud humana, por lo que se necesita una gestión adecuada que involucre la recolección, clasificación y reciclaje de las SLIB [3]. El reciclaje del material catódico de las SLIB ha sido extensamente estudiado. Dichas investigaciones han demostrado que se pueden recuperar metales de alto valor económico tales como Li, Co, Mn, Ni, Al, y Cu, entre otros materiales valiosos. El reciclaje de estos metales implica una reducción del consumo de las fuentes primarias de dichos metales. Sin embargo, pocas investigaciones se enfocan en el reciclaje de las láminas de aluminio (Al). Estas láminas se usan en el cátodo de las LIB como soporte del material catódico y funcionan como colectores de corriente, dado que tiene una buena conductividad, peso ligero y bajo costo, y la capa de pasivación en su superficie puede evitar la corrosión del electrolito durante el proceso de carga y descarga. Este material valioso se podría aprovechar para sintetizar otros materiales con aplicación tecnológica que requieran al Al como materia prima. Un ejemplo de esto es la espinela de aluminato de magnesio ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), la cual tiene propiedades físicas de interés tecnológico y se puede aplicar en conductores superiónicos, aislantes eléctricos o, incluso, en superconductores. Por lo tanto, el reciclaje del aluminio a partir de las SLIB para sintetizar  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  promueve la sostenibilidad de los recursos naturales y además puede mitigar parte de la contaminación ambiental ya que las baterías agotadas se pueden usar como materia prima de

diversos procesos extractivos para recuperar materiales valiosos evitando así su destino final como desechos [4].

## **DESARROLLO EXPERIMENTAL**

### **Reactivos**

Las muestras empleadas fueron láminas de aluminio provenientes de las LIB agotadas de teléfonos celulares marca Samsung. Los reactivos usados fueron  $\text{NH}_4\text{Cl}$  marca Merck (99,8 % p/p) y  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  marca Biopack (99 % p/p).

### **Equipo**

Los ensayos experimentales de cloración no isotérmica se realizaron en un sistema termogravimétrico diseñado para trabajar en atmósferas corrosivas y no corrosivas. Este dispositivo experimental está constituido por un reactor tubular de cuarzo, ubicado dentro de un horno eléctrico, el cual está equipado con un controlador de temperatura, un sistema de regulación de gases y una balanza analítica para el registro de la medición durante todo el rango de temperatura estudiado [5]. Los ensayos experimentales de cloración isotérmica se realizaron en una mufla marca ThermoLyne 47900 Furnace. Los análisis por difracción de rayos X (DRX) se realizaron en un equipo Rigaku Última IV tipo II,  $\text{Cu K}\alpha$ , operado a 30 kV y 20 mA. La morfología y el análisis elemental de los residuos de cloración se determinaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS) en un equipo LEO 1450VP, provisto de un espectrómetro dispersivo en energía EDAX Génesis 2000.

### **Procedimiento**

Las láminas de Al extraídas de las SLIB fueron cortadas en forma de círculos de aproximadamente 0,5 cm de diámetro y luego mezcladas con el  $\text{NH}_4\text{Cl}$  (Al/ $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) en una proporción de 25/75 % p/p respectivamente.

Los ensayos de calcinación se realizaron en dos etapas, en una primera etapa se realizaron ensayos de calcinación isotérmicos de la mezcla Al/ $\text{NH}_4\text{Cl}$  a 660 °C por 45 min en atmósfera de aire en donde se obtuvo un residuo de cloración al cual se le denominó residuo uno ( $\text{Re}_1$ ).

En la segunda etapa se realizaron ensayos no-isotérmicos e isotérmicos empleando muestras de 0,5 g de la mezcla del  $\text{Re}_1$  y  $\text{MgCl}_2$  ( $\text{Re}_1/\text{MgCl}_2$ ) en una proporción de 20/80 % p/p. En esta etapa se realizó un ensayo no-isotérmico en un rango de temperatura entre 20 °C y 900 °C en atmósfera de aire. Los ensayos isotérmicos se llevaron a cabo a temperaturas entre 500 y 900 °C y tiempos de reacción entre 15 y 120 min en aire. Las calcinaciones se detallan a continuación.

### **Calcinación no-isotérmica**

Se colocó la mezcla ( $\text{Re}_1/\text{MgCl}_2$ ) en el interior del dispositivo termogravimétrico. Seguidamente, se inició el calentamiento en atmósfera de aire a una velocidad de 5 °C/min hasta alcanzar 900 °C, registrándose la variación de masa en función de la temperatura.

### **Calcinación isotérmica**

Se ingresó la muestra en el interior de la mufla y se inició el calentamiento en atmósfera de aire a una velocidad de 5 °C/min hasta alcanzar la temperatura de trabajo seleccionada. Una vez estabilizada la temperatura, la muestra permanece en la mufla durante el periodo seleccionado para estudiar la reacción de cloración. Estas calcinaciones se llevaron a cabo para las ambas mezclas: Al/ $\text{NH}_4\text{Cl}$  y  $\text{Re}_1/\text{MgCl}_2$ .

## RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

Los resultados de las caracterizaciones realizadas a los reactivos y productos obtenidos en cada etapa se muestran seguidamente.

### Caracterización de la etapa 1

El patrón de DRX del  $Re_1$  mostrado en la Figura 1 revela que la muestra está compuesta principalmente por las fases Al y  $Al_2O_3$ . Este resultado indica que en esta etapa es posible la formación del óxido de aluminio, cuya presencia favorece la formación de la fase de  $MgAl_2O_4$ .

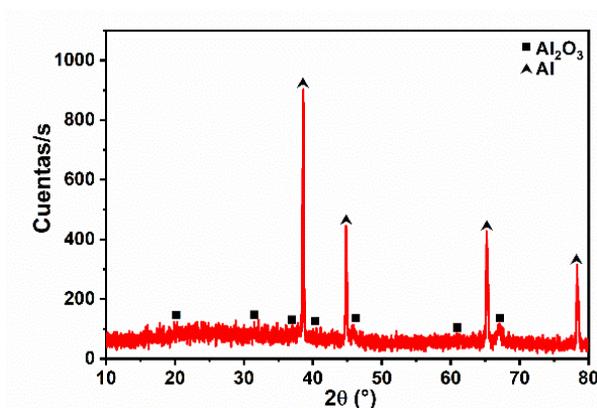


Figura 1. Diffractograma del residuo  $R_1$ .

### Caracterización de la etapa 2

#### a) Análisis termodinámico

Primeramente, se llevó a cabo un estudio teórico a través de un análisis termodinámico del sistema  $Al_2O_3$ - $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ - $O_2(g)$  en el intervalo de temperatura comprendido entre 25 y 900 °C. Este estudio fue realizado utilizando el software HSC Chemistry for Windows versión 5.1 [6], el cual simula un sistema cerrado en condiciones de presión atmosférica.

Los datos termodinámicos obtenidos (Figura 2) indicaron que la formación de  $MgAl_2O_4$  es termodinámicamente factible en todo el rango de temperatura investigado de acuerdo con la siguiente reacción:

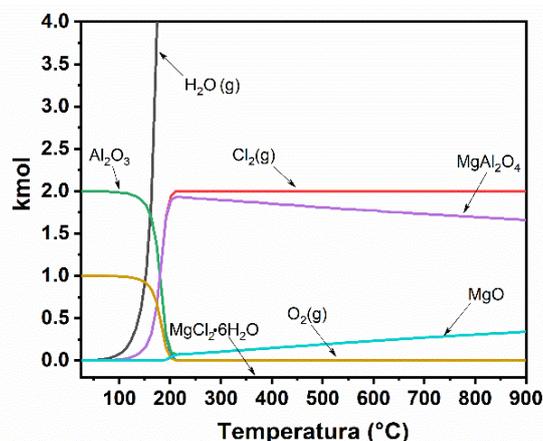
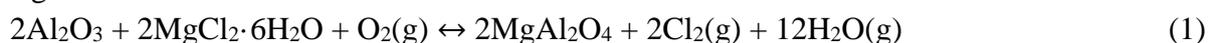


Figura 2. Composición de especies en equilibrio del sistema  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O-O}_2(\text{g})$  en función de la temperatura.

### b) Análisis termogravimétrico no isotérmico

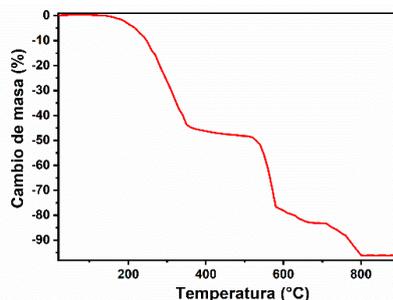
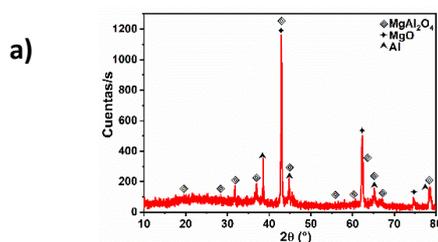


Figura 3. Termograma de la mezcla  $\text{R}_1/\text{MgCl}_2$  calcinada en aire.

El termograma de la muestra  $\text{R}_1/\text{MgCl}_2$  calcinada en aire (Figura 3), presenta cuatro regiones de cambio de masa. La primera zona, entre 100 y 350 °C, muestra una pérdida de masa que es consecuencia de la deshidratación e hidrólisis parcial del  $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  [7]. Luego en la segunda zona, entre 500 y 580 °C, se observa una significativa pérdida de masa que se le atribuye a la formación de  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  a partir de la reacción entre los productos de la descomposición parcial del  $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  y el oxígeno del aire. En la tercera zona, entre 580 y 700 °C se observa una pérdida de masa debido a la continua deshidratación e hidrólisis del cloruro de magnesio y la liberación del  $\text{Cl}_2(\text{g})$  que ocurre durante la síntesis de  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ . Por último, entre 700 a 900 °C, se observa una pérdida de masa que se puede asociar a la descomposición total del  $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ . Además, en esta zona se inicia la descomposición de la  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  que genera  $\text{MgO}$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

### c) Análisis isotérmico

La ocurrencia de la reacción 1 fue verificada a través de los difractogramas de los residuos obtenidos a partir de las calcinaciones de la muestra de  $\text{R}_1/\text{MgCl}_2$  a 500, 700 y 900 °C y un tiempo de reacción de 60 min (Figuras 4a-c). Las figuras muestran los picos característicos de la fase de  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  lo que confirma la síntesis de la espinela. También, se evidencia la formación del  $\text{MgO}$  que es producto de la descomposición de  $\text{MgCl}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$  [7]. En el difractograma de la Figura 4b se puede observar un aumento en la intensidad de los picos de  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  y una disminución en los picos de  $\text{MgO}$ , lo que indica que estas son las mejores condiciones de operación para producir  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ .



b)

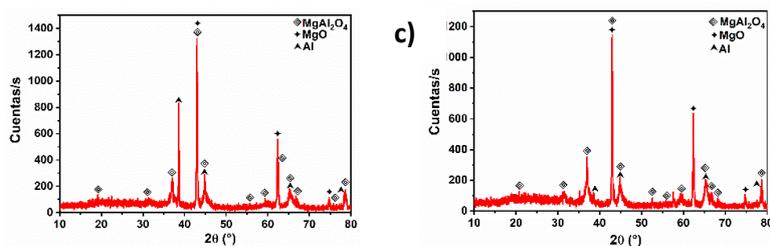


Figura 4. Difractograma de los residuos de la calcinación de  $R_1/MgCl_2$  a 60 min: a) 500; b) 700 y c) 900 °C.

Los residuos de la calcinación de la muestra de  $R_1/MgCl_2$  a 700 °C y 60 min fueron analizadas mediante SEM (Figuras 5a-b) y EDS (Figuras 6a-b). Una imagen general de las partículas del residuo obtenido se muestra en la Figura 5a. La Figura 5b) muestra la micrografía de una partícula compacta de superficie lisa marcada con el símbolo de círculo muestra. El análisis EDS de dicha partícula (Figura 6a) indica que su composición es acorde a  $MgAl_2O_4$ . Por otra parte, la Figura 5c muestra la micrografía de una partícula aglomerada y de superficie rugosa marcada con el símbolo de triángulo. El análisis de EDS de dicha partícula (Figura 6b) indica que su composición es acorde a  $MgO$ .

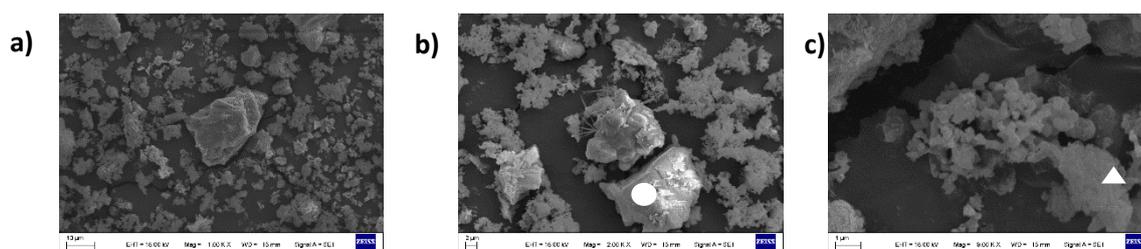


Figura 5. Micrografías SEM del residuo obtenido de la calcinación de  $R_1/MgCl_2$  a 700 °C por 60 min: a) residuo de  $R_1/MgCl_2$  a 700 °C; b) partícula de  $MgAl_2O_4$  y c) partícula de  $MgO$ .

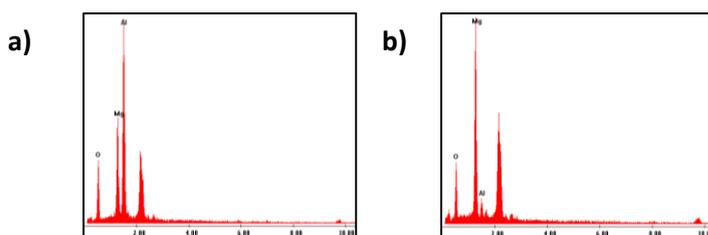


Figura 6. Espectro de EDS del residuo obtenido de la calcinación de  $R_1/MgCl_2$  a 700 °C por 60 min: a) Partícula marcada con un círculo ( $MgAl_2O_4$ ) y b) Partícula marcada con un triángulo ( $MgO$ ).

## CONCLUSIONES

El estudio termodinámico del sistema  $Al_2O_3- MgCl_2 \cdot 6H_2O -O_2(g)$  indicó que es viable la formación de  $MgAl_2O_4$ . Los resultados experimentales mostraron que en la primera etapa se produce la formación del  $Al_2O_3$  a partir de la calcinación de las láminas de Al con  $NH_4Cl$ . En la segunda etapa, el tratamiento térmico del  $Al_2O_3$  con el  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  genera  $MgAl_2O_4$  a partir de 500 °C, siendo las mejores condiciones de operación para producir la espinela 700 °C por 60

min. Estos resultados nos indican que es factible reutilizar el aluminio contenido en las baterías de ion litio agotadas para generar  $MgAl_2O_4$ .

## REFERENCIAS

- [1] Q. Wei, Y. Wu, S. Li, R. Chen, J. Ding, and C. Zhang, “Spent lithium ion battery (LIB) recycle from electric vehicles: A mini-review,” *Sci. Total Environ.*, vol. 866, no. August 2022, p. 161380, 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.161380.
- [2] Y. Tao, Z. Wang, B. Wu, Y. Tang, and S. Evans, “Environmental life cycle assessment of recycling technologies for ternary lithium-ion batteries,” *J. Clean. Prod.*, vol. 389, no. April 2022, p. 136008, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136008.
- [3] G. Tian *et al.*, “Recycling of spent Lithium-ion Batteries: A comprehensive review for identification of main challenges and future research trends,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 53, no. PA, p. 102447, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102447.
- [4] Y. Hu, Y. Yu, K. Huang, and L. Wang, “Development tendency and future response about the recycling methods of spent lithium-ion batteries based on bibliometrics analysis,” *J. Energy Storage*, vol. 27, p. 101111, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.est.2019.101111.
- [5] F. T. Jorge González, María del Carmen Ruiz, “Aparato de Laboratorio para realizar Termogravimetrías en Atmósferas Corrosivas y No corrosivas,” INPI N° 411, 2007.
- [6] Outokumpu Research, “HSC Chemistry for Windows.” Pori, Finland, 2002.
- [7] Q. Huang, G. Lu, J. Wang, and J. Yu, “Thermal decomposition mechanisms of  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  and  $MgCl_2 \cdot H_2O$ ,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 91, no. 1, pp. 159– 164, 2011, doi: 10.1016/j.jaap.2011.02.005.