

INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN EN INGENIERÍAS

Obtención y caracterización de sulfato de hierro (II)
heptahidratado a partir de alambre de acero proveniente de
llantas residuales

Obtaining and characterization of iron (II) sulfate heptahydrate
from steel wire derived from waste tires

Sebastián Amar Gil



Alba Ardila Arias



Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Colombia

Rolando Barrera Zapata



Universidad de Antioquia, Colombia

OPEN  ACCESS

Recibido: 16/10/2023

Aceptado: 11/12/2023

Publicado: 15/01/2024

Correspondencia de autores:
sebastian.amar@udea.edu.co



Copyright 2024
by Investigación e
Innovación en Ingenierías

Resumen

Objetivo: Estudiar el aprovechamiento de alambre de acero residual de llantas en desuso para la obtención de sulfato de hierro hidratado. **Metodología:** El proceso consistió en la disolución ácida de las fibras de acero residual con ácido sulfúrico comercial y la posterior síntesis de los cristales de sulfato de hierro utilizando etanol como agente oxidante. **Resultados:** La sal obtenida presentó humedad del 44% y estado de hidratación cercano a 7 (6.64). Mediante análisis FTIR se evidenció en la sal la presencia de bandas características de absorción entre 900 – 1300 cm⁻¹, 1500 – 1700 cm⁻¹ y 3100 – 3500 cm⁻¹ correspondientes a los grupos SO₄²⁻, H₃O⁺ y OH, respectivamente. Por otro lado, la sal sintetizada presentó alto contenido en Fe (20%) y trazas de metales como Mn, Mo, Ni y Zn, atribuidos a la composición del alambre de acero de las llantas. **Conclusión:** De acuerdo con los resultados, se logró evidenciar que la sal sintetizada presenta propiedades similares a un sulfato de hierro heptahidratado comercial, cuya obtención a partir de llantas en desuso no se encuentra reportada. Por tal razón, la presente contribución representa una alternativa potencial para la valorización de llantas residuales.

Palabras clave: Sulfato de hierro heptahidratado, Acero residual, Llantas usadas, Valorización de residuos.

Abstract

Objective: To study the utilization of residual steel wire from disused tires to obtain iron sulfate hydrate. **Methodology:** The process consisted of the acid dissolution of the residual steel fibers with commercial sulfuric acid and the subsequent synthesis of iron sulfate crystals using ethanol as oxidizing agent. **Results:** The salt obtained had a moisture content of 44% and a hydration state close to 7 (6.64). FTIR analysis showed the presence of characteristic absorption bands between 900 - 1300 cm⁻¹, 1500 - 1700 cm⁻¹ and 3100 - 3500 cm⁻¹ corresponding to SO₄²⁻, H₃O⁺ and OH groups, respectively. Furthermore, the synthesized salt presented high Fe content (20%) and traces of metals such as Mn, Mo, Ni and Zn, attributed to the composition of the steel wire of the tires. **Conclusion:** According to the results, it was possible to demonstrate that the synthesized salt has properties similar to a commercial iron sulfate heptahydrate, whose production from disused tires has not been reported. Therefore, this contribution represents a potential alternative for the valorization of used tires.

Keywords: Iron sulfate heptahydrate, Residual steel, Used tires, Waste valorization.

Como citar (IEEE): S. Amar-Gil., A. Ardila-Arias., y R. Barrera-Zapata. "Obtención y caracterización de sulfato de hierro (II) heptahidratado a partir de alambre de acero proveniente de llantas residuales". *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 12, n°1, 13-21, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.12.1.6717>

Introducción

El modelo de producción actual, basado en una economía lineal de “Extraer, Fabricar, Consumir, Desechar”, hace que la cantidad de residuos que se generan sea cada vez mayor. Según el Banco Mundial, los residuos a nivel global crecerán un 70 % para 2050, a menos que se adopten medidas urgentes [1]. Lo anterior ha motivado en todo el mundo iniciativas de investigación y desarrollo relacionadas no solo con el replanteamiento de modelos de producción, sino también con el aprovechamiento de todo tipo de residuos.

En Colombia se generan cada año alrededor de 61 mil toneladas de llantas residuales, las cuales en su mayoría son quemadas, incineradas o dispuestas en rellenos sanitarios [2]. Desde julio de 2017 mediante la Resolución 1326 se establecieron en Colombia los Sistemas de recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, obligando a los productores e importadores de neumáticos a realizar un manejo adecuado de estos desechos, fomentando como primera opción de aprovechamiento la actividad de reencauche técnico de llantas y como segunda opción el aprovechamiento de llantas residuales [3]. Según cifras de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA, para el 2019 Colombia contó con un total de 16 programas de recolección de llantas residuales para su postratamiento y aprovechamiento [4].

La composición típica de una llanta está dada por cuatro tipos de materiales: i) mezclas de caucho natural y sintético (40-48%), ii) negro de humo o sílice (22-27%), iii) materiales de refuerzo (metales y/o fibras textiles) (5-25%) y iv) aditivos y otros (0-8%) [5, 6]. Dada su composición química, la recuperación de energía y materiales a través del procesamiento de llantas residuales se ha convertido en una solución potencial para minimizar los problemas ambientales y de salud provocados por los grandes volúmenes de llantas en depósitos y su inadecuada disposición. Según cifras del SAIC [7], a nivel mundial se aprovecha menos del 15% del alambre y acero residual resultante del proceso de reciclaje de llanta.

En la literatura se encuentran escasas investigaciones enfocadas en la recuperación de acero y hierro de materiales residuales, destacándose el estudio de la recuperación de hierro proveniente de escoria de fábricas metalúrgicas y de aguas residuales de plantas de tratamiento de hierro y acero [8, 9]. Rodríguez y colaboradores [10], reportaron la obtención de sulfato de hierro heptahidratado ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) a partir de residuos metálicos de la industria mecánica. Para ello, sintetizaron la sal de hierro a partir de virutas de acero (residuo) y ácido sulfúrico comercial, obteniendo un producto de alta calidad con especificaciones USP XXIV como materia prima y apto como reactivo para distintas industrias. A nivel comercial, el sulfato de hierro heptahidratado se utiliza en distintos campos, incluyendo su uso como medicamento para el control de la anemia, como fertilizante, como aditivo en la precipitación de fosfatos en aguas residuales o el tratamiento de la clorosis férrica en horticultura y como materia prima para la producción de pigmentos de óxido de hierro y preparación de tintas [8]. A nivel industrial, comúnmente se obtiene como subproducto de la fabricación de TiO_2 a partir de ilmenita, proceso donde se generan cerca de 6 toneladas de sulfato de hierro heptahidratado por tonelada producida de óxido de titanio [11], pero con un alto contenido de impurezas que dificultan su comercialización [12]. En este estudio, se presenta una propuesta para la obtención de sulfato de hierro (II) heptahidratado a partir de alambre de acero proveniente de llantas residuales, ofreciendo de esta forma una ruta alterna para la reutilización de este residuo y su potencial aprovechamiento en la industria química.

Metodología

Recolección y acondicionamiento del acero residual de llanta

La obtención de llantas recicladas fuera de uso se realizó en colaboración con la empresa Ekogroup Colombia S.A.S, quienes se encargaron de la recolección y transporte de las llantas usadas acorde con la normatividad colombiana (Resolución 1457 de 2010 Capítulo III de las obligaciones de los productores, literales c y d). Posteriormente, las llantas fueron desvenadas usando maquinaria especial (tipo “Tire circle cutter”). Luego, los aros laterales provenientes de las llantas se dispusieron en una máquina separadora (tipo “Rims separator”) para retirar completamente el material metálico del caucho, obteniendo los hilos de acero totalmente independientes y limpios, a través de un sistema magnético que funciona con electroimanes y facilita la separación del residuo fibroso del proceso por medio de aspersión. En una investigación paralela, se estudió el uso del caucho residual de la llanta como soporte para la fabricación de catalizadores, utilizando como fuente para la fase activa el material metálico proveniente de las mismas llantas residuales [13].

Obtención sulfato de hierro

El sulfato de hierro se obtuvo siguiendo recomendaciones de la literatura [10]. Con el fin de remover mayoritariamente las impurezas superficiales (acero y óxido) del acero residual, primero se realizó un lavado de los hilos de acero por 10 minutos a 90 °C usando H₂SO₄ al 5% en una relación de 1:1 (g de hilos de acero residual/mL de solución de ácido). Posteriormente, se separó el acero de la solución ácida y se agregó a una solución de síntesis de H₂SO₄ al 23% en una relación 1:6.5 (g de acero residual/mL de solución de síntesis) y se dispuso bajo agitación magnética (120 rpm) y calentamiento moderado (90 °C) por 2 horas. Una vez concluido este tiempo, se procedió a filtrar la solución y se agregó etanol al 97% como agente oxidante (relación de 1:1 de g de sólido/mL de etanol). Finalmente, se dejó cristalizar la sal por 12 h y se dispuso la sal obtenida en un desecador. Este procedimiento se realizó sobre tres lotes diferentes de acero residual de llanta.

Caracterización química del sulfato de hierro

Para efectos de comparación, se determinaron diferentes propiedades fisicoquímicas del sulfato de hierro obtenido en este trabajo (denominado FeSO₄.XH₂O) y de un sulfato de hierro heptahidratado comercial marca MERK (FeSO₄.7H₂O).

Se determinó el estado de hidratación (X) de las sales de hierro comercial y la sintetizada en este estudio a partir de la Ecuación (1).

$$X = \frac{\frac{m_i \text{Sal} \times \% \text{Humedad}}{PM_{H_2O}}}{\frac{m_f \text{Sal}}{PM_{FeSO_4}}} \quad (1)$$

Donde, $m_i \text{Sal}$ y $m_f \text{Sal}$ son el peso inicial de la sal antes y después del proceso de secado respectivamente, PM_{H_2O} es el peso molecular del agua y PM_{FeSO_4} es el peso molecular del sulfato de hierro. Las moles de agua se determinaron por análisis de humedad mediante balanza de humedad, mientras que las moles de sulfato de hierro se determinaron por diferencia de masa.

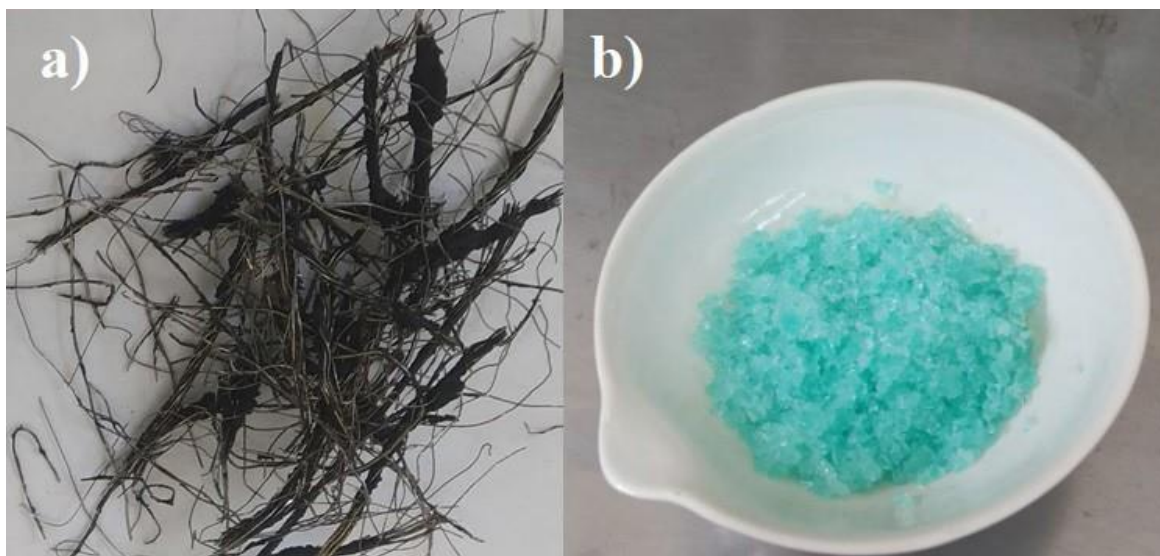
Adicionalmente, la sal sintetizada se caracterizó usando análisis termogravimétrico (TGA/DTG), espectroscopía Infrarrojo de Reflectancia Total Atenuada con Transformada de Fourier (ATR-FTIR), difracción

de rayos X (DRX), espectrofotometría de absorción atómica de llama (AAS) y análisis de espectrometría fotoelectrónica de rayos X (NAP-XPS). Los análisis TGA/DTG se llevaron a cabo en un equipo TGA Instruments Q600 en atmosfera de N_2 (100 mL/min) desde 20 a 120 °C (40 °C/min), luego se mantuvo esta temperatura por 12 minutos, seguido de una rampa de 40 °C/min hasta 800 °C. Los espectros infrarrojos se tomaron con un espectrómetro IRAffinity-1S a una resolución de 4 cm^{-1} , entre 4700 y 700 cm^{-1} con un número de 20 barridos. El contenido de los distintos metales (Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, Mg, Mo, Na, Ni y Zn) presentes en la sal fueron determinados en espectrómetro de absorción atómica de llama marca Agilent 240FS AA. Los análisis DRX se realizaron en Difractómetro de Rayos X Malvern-PANalytical Modelo Empyeen 2012, con detector Pixel 3D joy fuente de Cu ($\lambda = 1.541874$) a 45kV y 40mA; Goniómetro: Omega/2 theta y configuración de la plataforma: Reflexión Transmisión Spinner con giros de 4s. El paso fue de 0.05° y un tiempo por paso de 52s.

Resultados

La sal de hierro obtenida presentó una tonalidad verde-azul en su estado hidratado y al secarla tomó un color blanco (Figura 1). Esto permite suponer inicialmente que la sal obtenida corresponde a sulfato de hierro heptahidratado.

Figura 1. a) Acero residual de llanta y b) Sal de hierro obtenida del acero residual de llanta



Fuente: elaboración propia

En la Tabla 1 se presentan los rendimientos obtenidos hacia el sulfato de hierro heptahidratado, el caucho y el sólido residual; subproductos obtenidos en este proceso. El rendimiento másico respecto al acero residual para la sal obtenida fue del $87.13 \pm 2.79\%$, valor cercano al reportado en la literatura para la obtención de sales de hierro a partir de residuos metalúrgicos (rendimiento cercano al 94%) [10]. Por otro lado, se obtuvo un rendimiento hacia caucho y sólido residual del 10.47% y 124.24% respecto al acero residual. Es importante destacar que en el proceso se añadió agua, ácido sulfúrico y etanol en distintas etapas, lo cual agrega masa al sistema y hace posible obtener rendimientos mayores al 100% tomando como referencia el acero residual.

Tabla 1. Rendimiento hacia productos y subproductos respecto al acero residual

Producto	Rendimiento (%)			
	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Promedio
FeSO ₄ .XH ₂ O	84.79	90.22	86.37	87.13 ± 2.79
Caucho residual	13.48	11.47	6.45	10.47 ± 3.62
Sólido residual	126.54	113.14	133.05	124.24 ± 10.15

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 2 se presenta el rendimiento hacia productos y subproductos respecto a la masa total ingresada en el sistema. El rendimiento obtenido hacia sulfato de hierro heptahidratado respecto a la masa total ingresada al sistema es de 5.27%, así mismo, el rendimiento hacia caucho y sólido residual es del 0.63% y 7.51% respectivamente. El porcentaje restante corresponde a soluciones residuales obtenidos en la etapa de cristalización y purificación del sulfato de hierro.

Tabla 2. Rendimiento hacia productos y subproductos respecto a la masa total.

Producto	Rendimiento (%)			
	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Promedio
FeSO ₄ .XH ₂ O	5.13	5.45	5.22	5.27 ± 0.17
Caucho residual	0.82	0.69	0.39	0.63 ± 0.22
Sólido residual	7.66	6.84	8.03	7.51 ± 0.61

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la Tabla 3, los resultados del contenido de humedad muestran que ambos materiales presentan una humedad cercana al 44%. Lo anterior indica una relación molar entre el agua y sulfato de hierro cercana a 7 (estado heptahidratado) para ambos casos.

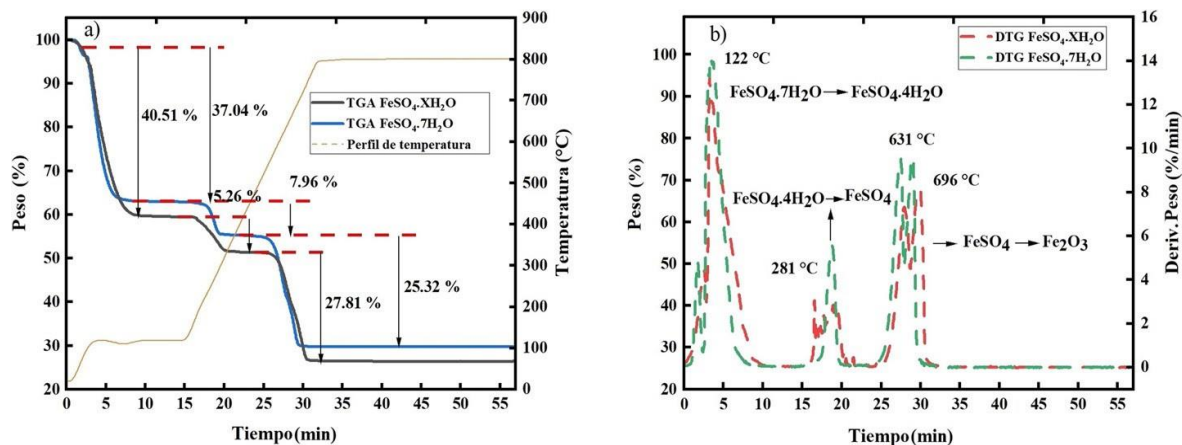
Tabla 3. Humedad y agua de hidratación obtenida para FeSO₄.XH₂O y FeSO₄.7H₂O

Parámetro	FeSO ₄ .XH ₂ O				FeSO ₄ .7H ₂ O
	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Promedio	
Humedad (%)	45.08	43.35	44.02	44.15	44.04
Agua de hidratación*	6.93	6.46	6.64	6.67	6.64

*Calculado como relación molar H₂O/FeSO₄ seco.

Fuente: elaboración propia

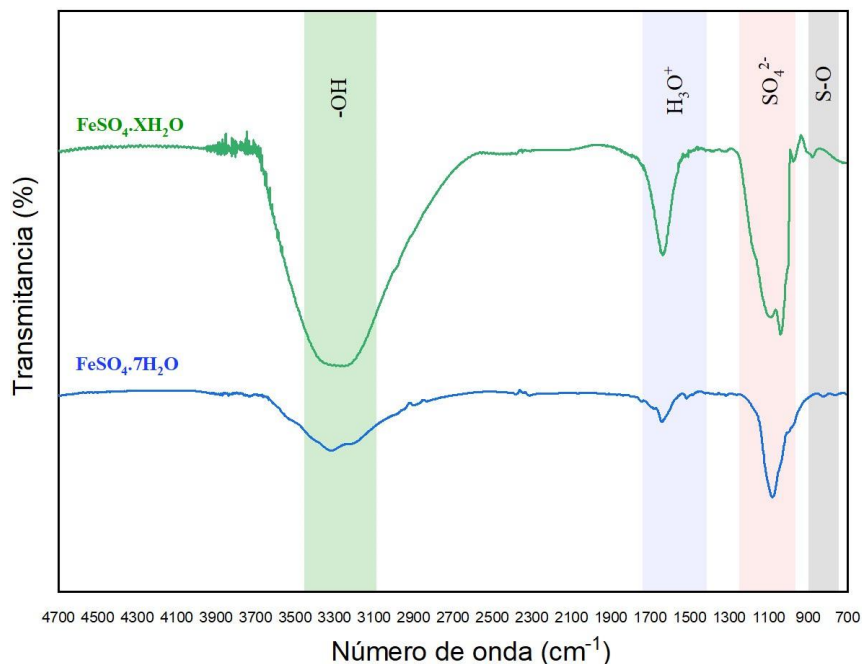
En la Figura 2 (a) se muestran los porcentajes de pérdida de masa para ambas sales de hierro, evidenciando una pérdida de masa cercana al 40% para la sal de hierro comercial y cercana al 37% para la sal sintetizada en este trabajo. Esta primera pérdida de masa se asocia a la deshidratación de la sal desde un estado heptahidratado a un segundo estado estable correspondiente al tetrahidratado (FeSO₄.4H₂O). Posteriormente, se genera una segunda pérdida de masa cercana al 5 y 8% para la sal comercial y la sal a partir de acero residual, respectivamente. Esta segunda etapa de pérdida de masa se asocia a la deshidratación completa del material, por lo cual, la pérdida total de humedad o el contenido de humedad presente en estas sales corresponde al 45% aproximadamente. Contenido de humedad que puede ser asociado a un estado heptahidratado para ambas sales según la Ecuación (1).

Figura 2. (a) Degradación térmica y (b) Curvas DTG para el $\text{FeSO}_4 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ y el $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, a través del análisis DTG (Figura 2 (b)) es posible asociar las pérdidas de masa con la degradación térmica del material. Información complementaria que ayuda a confirmar lo dicho anteriormente. Como se observa en dicha figura, la primera etapa de pérdida de masa se genera a los 122 °C, donde la sal pasa de un estado heptahidratado a tetrahidratado. La segunda etapa de pérdida de masa se genera cerca a los 280 °C, donde la sal se deshidrata completamente. Finalmente, entre 630 y 690 °C la sal se degrada completamente formando óxido de hierro (III) [14].

Los espectros infrarrojos ATR-FTIR para las dos sales se indican en la Figura 3. Ambas sales presentan bandas características entre 700 – 900 cm^{-1} , 900 – 1300 cm^{-1} , 1500 – 1700 cm^{-1} y 3100 – 3500 cm^{-1} correspondientes a los grupos S-O, SO_4^{2-} , H_3O^+ y -OH respectivamente, confirmando nuevamente que la sal obtenida corresponde a sulfato de hierro heptahidratado.

Figura 3. Espectros infrarrojos ATR-FTIR para $\text{FeSO}_4 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 

Fuente: elaboración propia

Por otro lado, con el fin de identificar las impurezas que tiene la sal obtenida en el presente estudio respecto a la sal comercial, se analizaron ambos materiales por AAS, los resultados obtenidos se relacionan en la Tabla 4. Para ambas sales se analizaron los siguientes metales: Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, Mg, Mo, Na, Ni y Zn, lo cuales fueron seleccionados debido a que componen el acero residual de llanta utilizado como fuente de la sal, además de posibles impurezas que pueden estar presentes en el caucho de llanta al momento de realizar el proceso de disolución ácida.

Tabla 4. Contenido metálico presente en $\text{FeSO}_4 \cdot \text{XH}_2\text{O}$ y $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

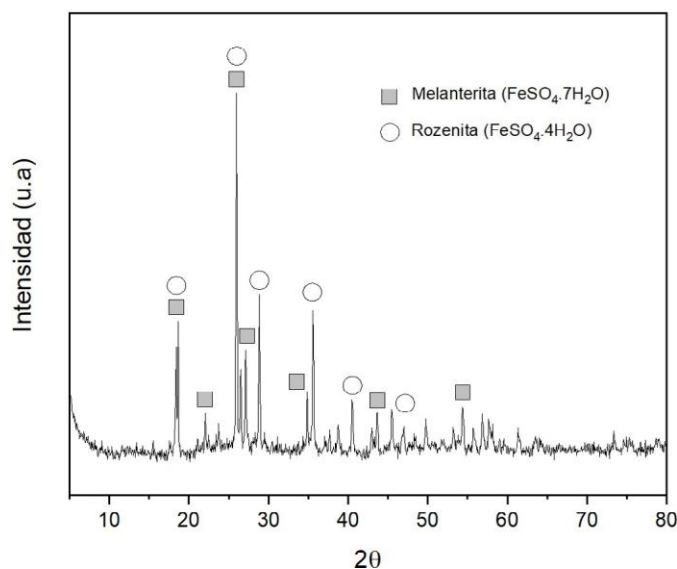
Material	Elemento (wt. %)									
	Ca	Cr	Cu	Fe	Mn	Mg	Mo	Na	Ni	Zn
$\text{FeSO}_4 \cdot \text{XH}_2\text{O}$	0.000	0.000	0.007	20.023	0.017	0.000	0.323	0.000	0.395	0.392
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.000	0.000	0.001	19.850	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.006

Fuente: elaboración propia

Como se muestra en la Tabla 4, tanto la sal comercial como la sal sintetizada no presentan Ca, Cr ni Mg, por otro lado, únicamente el sulfato de hierro a partir del acero residual presenta en su composición alrededor de 0.017, 0.323, 0.395 y 0.392% de Mn, Mo, Ni y Zn, respectivamente. Estos metales se relacionan con la composición del acero de llanta, el cual al ser empleado como materia prima puede incluir distintas impurezas en la sal producida. Estos metales no se presentan en la composición de la sal comercial debido a que esta es normalmente obtenida como subproducto de la producción de óxido de titanio a partir de la ilmenita (FeTiO_3) [14]. Finalmente, se logra observar que ambas sales tienen un contenido de Fe cercano al 20%, porcentaje de hierro normal en los sulfatos de hierro [15].

En la Figura 4 se presenta el difractograma de rayos X (DRX) para el sulfato de hierro sintetizado. El difractograma para este compuesto presenta los planos (102), (111) y (311) correspondientes a la fase cristalina monoclinica, indicando la presencia de minerales como la melanterita ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y rozenita ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), confirmando que la sal obtenida corresponde a sulfato de hierro [8, 16].

Figura 4. Patrón de difracción de rayos X (DRX) para la sal de hierro sintetizada



Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Se evidenció como el acero proveniente de las llantas usadas es un residuo con potencial de aprovechamiento para la síntesis de sulfato de hierro heptahidratado, logrando un rendimiento promedio del 87% en la síntesis de esta sal mediante el método de lixiviación con ácido seguido de cristalización. Del análisis químico se encontró que el sulfato de hierro sintetizado ($\text{FeSO}_4 \cdot \text{XH}_2\text{O}$) tiene un bajo contenido de impurezas, siendo estas principalmente Mo, Ni y Zn, metales provenientes del acero de llanta.

También se logró evidenciar que la sal sintetizada presenta propiedades similares a un sulfato de hierro heptahidratado comercial: el análisis termogravimétrico indicó que el sulfato de hierro preparado es heptahidratado, mientras que el patrón de difracción de rayos X confirmó la presencia de la fase melanterita, indicativo del sulfato de hierro heptahidratado. Lo anterior permite afirmar que el acero residual de las llantas usadas puede considerarse una alternativa de materia prima para la obtención de productos químicos de interés en distintos procesos industriales, académicos o investigativos.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid por la financiación del proyecto de investigación titulado “Aprovechamiento de acero y caucho de llantas residuales para el desarrollo de catalizadores de hierro” con centro de costo 2061080399 y aprobado en la Convocatoria de Proyectos de Investigación Formativa, Año 2020.

Referencias bibliográficas

1. S. Kaza L, Yao P, Bhada-Tata F y Van Woerden. What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. Washington, DC: World Bank, 2018 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>.
2. M. Vegas. Iniciativas nacionales para el reciclaje de llantas usadas en Colombia. Fundación Universidad de América, Bogotá D.C., 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7844/1/233203-2020-I-GA.pdf>
3. Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo territorial. Resolución 1326 de 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/resolucion-1326-de-2017.pdf>
4. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales - ANLA. Sistema de recolección selectiva de llantas usadas, 2019. [En línea]. Disponible en https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Expedientes_Llantas.pdf
5. D. Czajczyńska, R. Krzyżyńska, H. Jouhara y N. Spencer. Use of pyrolytic gas from waste tire as a fuel: A review. *Energy*, 134, 1121–1131, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.042>
6. V. Shulman. Tire Recycling. *Waste*, 489–515, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815060-3.00026-8>
7. C. Mortensen. SAIC. *Markets for Wire and Fiber from Waste Tires. Contractor's Report Produced Under Contract By: SAIC, 2013. September*, 1–24. [En línea]. Disponible en: www.calecyle.ca.gov/Publications/
9. J. Khanama, L. Rahmanb, B. Biswasc, S. Rahmand, N. Sharmine, S. Ahmedf S y T. Negerg. Fabrication of Ferrous Sulfate from Waste Like Condensed Milk Containing Can and its Characterization. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*. Vol 42, No. 1, 2018

10. C. Koymatcik, M. Ozkaymak y S. Selimli S. Recovery of iron particles from waste water treatment plant of an iron and steel factory. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(3), 284–288, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.04.008>
11. J. Rodríguez Amado y A. Lafourcade Prada. Obtención de Sulfato de Hierro (II) Heptahidratado con Calidad Farmacéutica a partir de Residuales Metálicos de la Industria Mecánica. *Revista Cubana de Química*, XVII(2), 138–141, 2005.
12. N. Kanari, E. Ostrosi, C. Diliberto, I. Filippova, S. Shallari y E. Allain. Green Process for Industrial Waste Transformation into Super-Oxidizing Materials Named Alkali Metal Ferrates (VI). *Materials*, 12(12), 1977, 2019. DOI: 10.3390/ma12121977
13. W. Yu, Y. Peng y Y. Zheng. Recovery of iron from waste ferrous sulphate by co-precipitation and magnetic separation. *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China*, 27(1), 211–219, 2017. DOI:10.1016/s1003-6326(17)60024-4
14. S. Amar-Gil S, A. Ardila-Arias y R. Barrera-Zapata. Obtaining and characterization of catalytic materials from waste tires for the Fischer–Tropsch process. *J Mater Cycles Waste Manag* 25, 1325–1332, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01591-1>
15. N. Kanari, N. Menad, E. Ostrosi, S. Shallari, F. Diot , E. Allain y J. Yvon. Thermal Behavior of Hydrated Iron Sulfate in Various Atmospheres. *Metals*, 8(12), 1084, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/met8121084>
16. R. Rodríguez. VAM, vademécum académico de medicamentos. México: McGraw-Hill. Capítulo: Sulfato ferroso: Antianémicos, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://accessmedicina.mhmedical.com/content.aspx?bookid=1552§ionid=90375396>
17. J. Martínez Garcés y J. Barreto Ferreira, “Modelo de planeación para la inversión tecnológica en centros de investigación universitarios”, *Investigación e Innovación en Ingenierías*, vol. 7, n.º 2, jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.17081/invinno.7.2.3448>
18. V. Corregidor, R. Viegas, L. Ferreira y L. Alves. Study of Iron Gall Inks, Ingredients and Paper Composition Using Non-Destructive Techniques. *Heritage*, 2(4), 2691–2703, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/heritage2040166>