

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

SÍNTESIS IN SITU DE HEMATITA ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) DOPADA CON CLORARGIRITA (AgCl) CON PROPIEDADES FOTOACTIVAS

IN SITU SYNTHESIS OF HEMATITE ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) DOPED WITH CHLORARGYRITE (AgCl) WITH PHOTOACTIVE PROPERTIES

Nota: Foto de ThisisEngineering RAEng en Unsplash

REVISTA OJELT
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA METROPOLITANA
ISSN: 3122-4296 . Volumen 1. Número 2, 2023.

Humberto Flores Méndez.

Licenciado en química. Maestro en educación.
Estudiante de posgrado. Universidad TECMILENIO.
México.

humberto.flores2022@ensenapormexico.org
<https://orcid.org/0009-0002-6019-3177>

Rosenda García Hernández.

Licenciado en Química
Estudiante. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
México.

<https://orcid.org/0009-0008-4525-8554>

RECIBIDO: 05 de mayo de 2023
ACEPTADO: 15 de junio de 2023
PUBLICADO: 01 de julio de 2023

RESUMEN

En este trabajo se reportó la síntesis de hematita con actividad fotoactiva utilizando un medio acuoso y una parte de la hematita fue dopada con AgCl para valorar el cambio en el valor de banda prohibida del material ya que los materiales basados en Fe_2O_3 (hematita) y otros compuestos similares en los últimos años han despertado el interés de los investigadores por sus aplicaciones en el medio ambiente, procesos catalíticos y propiedades fotoactivas. Para este proceso se utilizó el método de precipitación controlada para sintetizar $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ y algunos materiales se doparon con AgCl creado in situ obtenido $\text{AgCl} + \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Estos materiales se caracterizaron empleando microscopía eléctrica de transmisión (SEM) para investigar la morfología de los compuestos, la estructura del material se investigó mediante análisis de difracción de rayos X (XDR) y la propiedad fotoactiva de los materiales se determinó mediante la medición de reflectancia difusa. El $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ y $\text{AgCl} + \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ exhibieron la capacidad de recolección de luz visible con una brecha energética de 2.29 y 1.60 eV respectivamente. Finalmente, utilizando los datos de difracción encontrados, se calculó el tamaño de la celda de cristalito y fue de aproximadamente 53,91 nm para la hematita dopada y 46,62 nm para la hematita pura.

Palabras clave: Brecha energética, material fotoactivo, hematita.

Código JEL: Q42, P48

ABSTRACT

In this work, the synthesis of hematite with photoactive activity using an aqueous medium was reported and one part of hematite was doped with AgCl to value the change band gap level of material owing to the materials based about Fe_2O_3 (hematite) and other compounds similar on the last years have aroused the interest of researchers because the applications on the environment, catalytics process and photoactive properties. For this process the controlled precipitation method was used to synthesize $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ and some material was doped whit AgCl created in situ obtained $\text{AgCl} + \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. These materials were characterized using scanning electrical microscopy (SEM) to investigate the morphology of the compounds, the structure of compounds was investigated by X-ray diffraction analysis (XDR) and the photoactive property of materials was determined using diffuse reflectance measurement. The $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ and $\text{AgCl} + \alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ exhibited the visible light harvesting ability with band-gap 2.29 and 1.60 eV respectively. finally using the diffraction data found was has calculate the size crystallite cell and was about 53.91 nm for the hematite doped and 46.62 nm for the hematite pure.

Key Words: Band-gap, photoactive material, hematite

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el estudio de los óxidos de hierro ha despertado el interés de muchos investigadores debido a que se ha encontrado que presentan propiedades interesantes que los convierten en candidatos ideales para diversas aplicaciones en los diferentes campos de investigación de las ciencias, esto se debe a que de manera general en la naturaleza también se pueden encontrar de manera abundante en la mayoría de los rincones del planeta y es por esto que desde la antigüedad los óxidos de hierro se han empleado como colorantes debido a que presentan gran estabilidad fisicoquímica y coloración, una coloración que va desde rojizo hasta anaranjado que resulta ser muy llamativa (Marmo y Gallardo, 2020) y los hace ideales para ser empleados en procesos de decoración de cerámicos y pinturas que hasta el día de hoy se siguen empleando en algunos lugares de la costa ecuatoriana. Por otro lado, es importante mencionar que actualmente a este tipo de materiales se les está encontrando aplicación que no solo se basan en propósitos decorativos, sino más bien se enfocan en diseñar procesos que ayuden a resolver una problemática como lo son: el tratar la calidad del aire en las zonas industriales basándose en la elaboración de composites de materiales mesoporosos como el ZnO y la hematita que aprovechan las diversas rutas sintéticas para la obtención de estos materiales absorbentes con una alta área superficial que puede llegar a alcanzar hasta los 1270 m²/g de composite (Rondón et al., 2021), otras aplicaciones importantes que se han estado analizando en los últimos años en los diversos centros de investigación están relacionados con el uso de la hematita en procesos de catálisis, como medio de contraste en observaciones de microscopía, en usos médicos como al analizar estudios de resonancia magnética de imagen y en otros casos se aprovechan propiedades como la morfología, estabilidad química y biocompatibilidad para proponer futuras aplicaciones que ayuden y promuevan el avance científico acerca de estos materiales. Con base en lo anterior podemos visualizar el alcance que puede llegar a tener el uso de los óxidos de hierro en los diferentes campos de investigación por lo que desde la década de 1980 a la fecha las publicaciones con respecto a la utilidad de estos materiales se han enfocado fuertemente en la obtención de

adsorbentes sintéticos a base de goethita, hematita y ferrihidrita que ayuden a minimizar algunos de los problemas ambientales que se generan en los diversos procesos industriales favoreciendo el desarrollo de la química verde. En la parte de las investigaciones en química ambiental se ha encontrado que los óxidos de fierro como la hematita en combinación con arcillas sintéticas son capaces de absorber grandes cantidades de contaminantes orgánicos como derivados del polietileno e incluso promueven las reacciones de oxidación-reducción en medio acuoso, lo que facilita los procesos de biorremediación en lugares contaminados con compuestos orgánicos como hidrocarburos y sus derivados ayudando a disminuir el impacto ambiental que generan estos contaminantes (De Melo Santiago, et al, 2022).

Algunos autores como López y Linares (2018) han enfocado sus investigaciones para resaltar la necesidad de crear materiales que ayuden a minimizar los impactos ambientales adversos que resultan de los accidentes industriales, como lo son el derrame de residuos metálicos que contaminan los suelos y fuentes pluviales en las diversas naciones como en el caso de Hungría, que en el año 2010 ocurrió un derrame de lodo rojo inundo tierras agrícolas, en este sentido se han reportado intentos por emplear este tipo de suelos contaminados como materia prima para elaborar materiales de construcción como ladrillos ecológicos que ayuden a mejorar la calidad del aire (aprovechando las propiedades catalíticas de la hematita y otros óxidos de fierro).

Actualmente existen diversos métodos de síntesis reportados para la obtención de composites de materiales ferricos así como ferrosos y entre los más populares tenemos el método de sol-gel (Paulso y Jothibas, 2021) el cual tiene la ventaja de brindar estructuras estables y con alta área superficial, sin embargo presenta el inconveniente de que el tiempo que se debe de esperar para obtener el composite es largo debido a que en la mayoría de los casos se debe sintetizar primero la arcilla y posteriormente la hematita, por lo que al final se combinan estos dos compuestos, otro método muy empleado es el de deposición por baño químico (CDB) en el que se sumerge un sustrato en cada una de las soluciones precursoras del compuesto estableciendo series definidas para lograr el depósito de capas homogéneas, el resultado en la mayoría de los casos son depósitos uniformes, sin embargo el tiempo que se debe de emplear es demasiado largo y existe un gran desperdicio de materia prima por lo que este proceso suele elevar demasiado los costos de producción (Nyari-ge, 2020). Finalmente se tiene la síntesis por el método de depo-

sición controlada, la cual ha demostrado ser muy eficiente al momento de generar nanomateriales y los procesos son relativamente rápidos, sin embargo, entre las dificultades que enfrentamos esta la caracterización del material, debido a que se encuentra en el seno de la solución y hay que provocar en la mayoría de las ocasiones la formación de un precipitado (Morales-Morales, 2017).

En este artículo nos enfocamos en la síntesis de hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) a la que se le realiza un proceso de dopado con un precursor de plata, en este aspecto es importante mencionar que se eligió el método de precipitación controlada debido a que es un proceso sencillo de realizar y no requiere de equipo especializado para llevarse a cabo, lo que lo convierte en una ruta sintética muy económica y con buena efectividad para la obtención del material deseado. Es importante mencionar que se modificó el proceso reportado por Morales-Morales (2017) debido a que en nuestro caso lo que buscamos era obtener un valor de banda prohibida (band gap) en el material que nos permitiera obtener hematita con propiedades fotoactivas, lo que nos permitirá en un futuro diseñar proceso para emplearla en proceso de generación de energía limpia y renovable a un bajo costo. El objetivo principal del presente trabajo es la obtención y caracterización de α -hematita dopada con cloruro de plata, que tengan un valor de brecha energética (E_g) que nos permita emplearlo en un futuro como capa activa en la elaboración de celdas solares y reacciones de catálisis. Durante el proceso de síntesis se buscó generar un proceso todo en uno (one-put) que permitiera ahorrar tiempo y generar el proceso de dopaje in situ, ya que como hemos analizado en la

bibliografía consultada, las rutas sintéticas existentes requieren de una serie de pasos que en ocasiones provocan tiempos de síntesis muy largos para la obtención del producto deseado.

Por otro lado, es importante mencionar que a pesar de que la energía solar presenta una alternativa ideal para generar procesos de energía renovable los materiales semiconductores que actualmente se emplean como capa activa de las celdas solares presentan altos costos de producción y baja eficiencia al utilizar la energía del sol, lo anterior es debido a que se basan en elementos que son demasiado caros y tóxicos como el Selenio (Se), indio (In) o Telurio (Te), por lo que su producción en masa también representa una gran fuente de contaminación debido a que son elementos nocivos para el medio ambiente. Otro inconveniente de usar los materiales mencionados es que no se ha logrado diseñar un proceso que garantice la generación de películas delgadas y estables para ser usados como fase activa en la elaboración celdas solares (Cucaita, 2017).

Un aspecto importante en la obtención de α -hematita dopada con cloruro de plata es el mencionar que se realiza con materiales de bajo costo que son comunes en los laboratorios de investigación lo que garantiza la disponibilidad de la materia prima y el obtener un valor de brecha energética en este tipo de compuestos ampliará el uso de los óxidos de hierro para mejorar sus propiedades fotoactivas. hematita-AgCl el tamaño de cristal es de 53.91 nm y para la α -hematita se encontró un tamaño de 46.62 nm usando las señales en el plano de (220) y (116) respectivamente.

METODOLOGÍA

La síntesis de hematita se realizó empleando el método de precipitación controlada, en este proceso se prepararon dos soluciones de 100 mL a una concentración 0.5 M (molar) de Cloruro de Hierro (III) (FeCl_3), una solución de 50 mL de Hidróxido de Sodio (NaOH) 1.0 M y una última solución de Nitrato de Plata (AgNO_3) con una concentración de 0.1 M, esta última solución fue empleada para realizar el proceso de dopaje del material, es por esto que su concentración es mucho menor comparada con la de las otras soluciones. Una vez que se tienen las soluciones listas se colocan en agitación moderada las soluciones de FeCl_3 y se adicionan 25 mL de la solución de NaOH gota a gota sin dejar de agitar a ambas soluciones.

Al finalizar la adición se la solución de Hidróxido de Sodio se mantienen los sistemas en agitación durante 4 horas más y para finalizar con el proceso de síntesis se agregó (a solo una solución que contiene la mezcla FeCl_3 - NaOH) gota a gota solo 10 mL de agente dopante (solución de Nitrato de Plata) manteniendo siempre el proceso de agitación. Es importante mencionar que el proceso de agitación evita que se formen aglomerados de sólidos en el seno de la solución, por lo que al adicionar el precursor de plata también se mantiene la agitación por 10 minutos más. Con el propósito de realizar un proceso de caracterización adecuado, se formaron películas gruesas sobre un sustrato de silicio monocristalino que durante las mediciones se empleó como línea base en los procesos de medición en los diferentes equipos y los depósitos generados fueron lavados con agua destilada abundante, se les dejó secar a temperatura ambiente y finalmente se procedió a dar tratamiento térmico a 450 °C.

1. Equipo de caracterización.

Las muestras resultantes son caracterizadas realizando mediciones de reflectancia difusa en un rango de entre 200 a 800nm con una velocidad de barrido de nm/s por lo que se empleó un espectrofotómetro Uv-Vis modelo Cary60 con lámpara de flash-Xenón. Para analizar la morfología de los depósitos generados son analizados empleando un microscopio electrónico de barrido (SEM) con microsonda EDS (JSM 5400L V + NORAN) y para la determinación de la estructura del material obtenido se usó un equipo de Difracción de Rayos X D8-discover usando

una fuente de radiación $\text{CuK } \alpha$ ($\lambda = 1.38762$) y realizando mediciones en un rango de 2θ entre 20° y 80° .

RESULTADOS

1. Discusión de resultados.

Para caracterizar el producto obtenido se analizó por medio de Difracción de Rayos X (DRX), uno de los difractogramas obtenidos de la muestra de hematita que contiene AgCl se muestra en la figura 1.

En este difractograma se identificaron en un primer lugar con color azul el patrón de picos correspondiente a la α -hematita con orientación en los planos (012) a 24.32° , (104) a 33.35° , (110) a 36.8° , (024) a 49.45° , (116) a 54.20° y (300) a 66.62° son asociados a la geometría romboédrica identificados usando el JCPDS card N°: 79-0007 y el N° 89-8104 mostrado por el equipo en el difractograma y que también son reportados en la literatura (Hriji., 2020), el pico orientado en el plano (1010) a 74.10° y a 77.83° también están reportados en la literatura por Mejía et al (2022) y Ortiz-Godoy et al (2021) asignándolos a la formación del compuesto de interés. Posteriormente en color rojo se señalan la presencia de los picos en los planos (111) a 27.94° , (200) a 32.34° y (220) a 46.33° correspondientes a la presencia de AgCl (Mandawat, 2019) en fase cubica centrada en la cara (clorargentina) y en esta ocasión se tomó como referencia el JCPDS N°: 31-1238 y el N° 01-1013 mostrado en el difractograma.

Es importante mencionar que dentro de las muestras es común encontrar la formación de algunas impurezas que son asociadas principalmente a la presencia de cloruro presente en la muestra (Hriji., 2020). El tamaño de los cristales es determinado usando la ecuación de Scherrer (Campos-Quirós., 2022; Lopez & Linares., 2018):

$$D = K\lambda / (\beta \cos \theta) \text{ ecuación (1)}$$

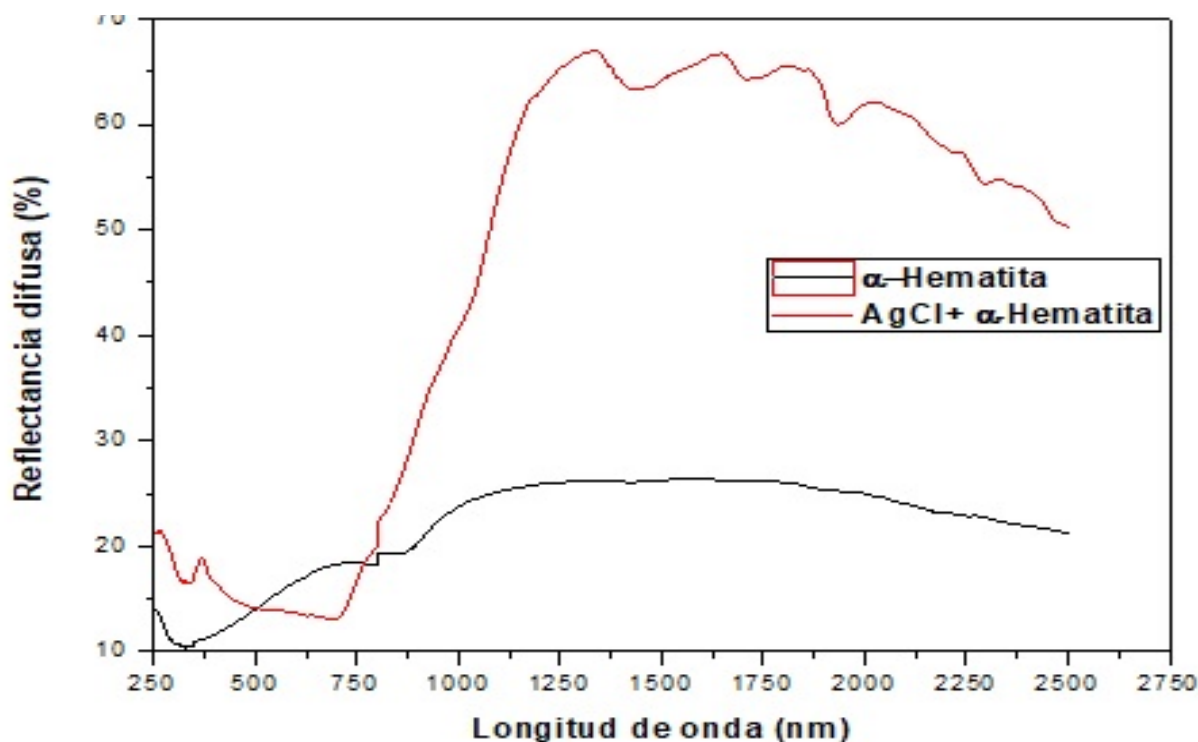
En donde:

D es el tamaño de la partícula en nm, K es la constante de Scherrer, β es FWHM (Full Width at Half Maximum) Ancho medio de pico, λ es Longitud de onda usada en la medición y θ es el Angulo de difracción en grados (Guzmán et al., 2022).

En nuestro proceso de análisis se encontró que para la hematita-AgCl el tamaño de cristal es de 53.91 nm y para la α -hematita se encontró un tamaño de 46.62 nm usando las señales en el plano de (220) y (116) respectivamente.

Figura 2

Espectro de reflectancia difusa obtenido de las muestras de hematita pura y dopada con AgCl.



Nota: La línea roja representa el espectro obtenido para la muestra de α-Hematita después de haberse generado in situ el compuesto AgCl, mientras que en color negro se observa el espectro obtenido para la caracterización de la α-Hematita sola.

Es muy importante resaltar que el band gap (E_g) del material se obtuvo mediante el tratamiento de los datos mediante la construcción de las gráficas de Tauc (Martínez-Hernández et al., 2019) y usando las siguientes ecuaciones:

$$S = 2R \text{ ecuación (2)}$$

$$K = (1-R)^2 \text{ ecuación (3)}$$

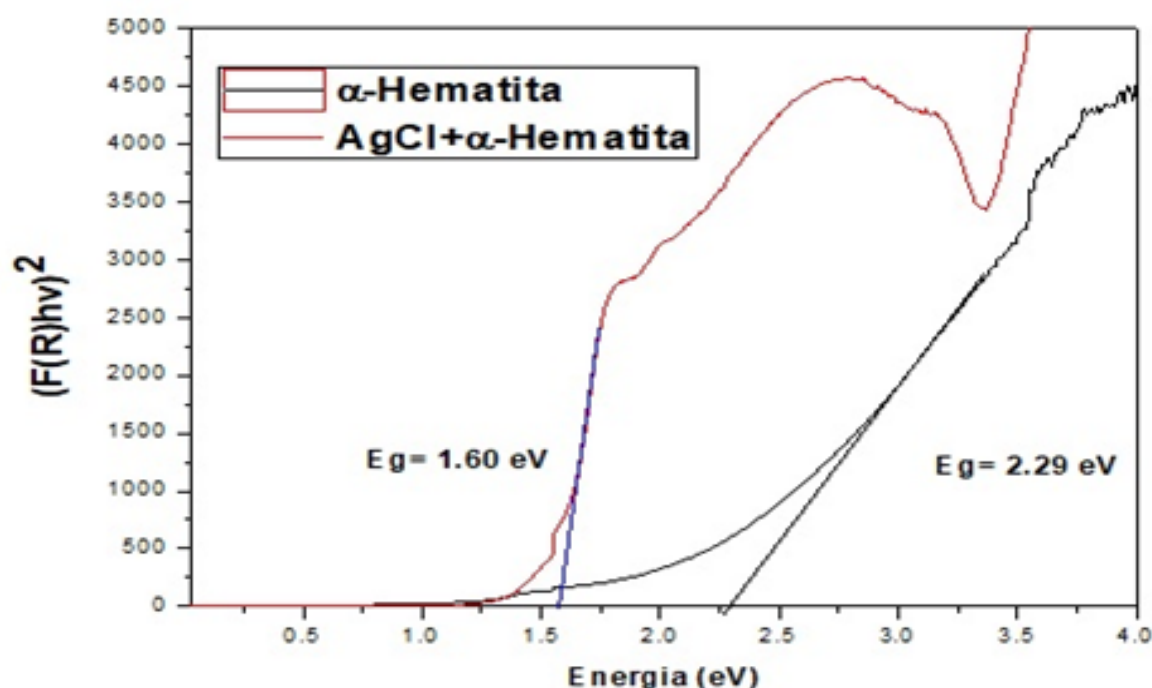
$$F(R) = K/S \text{ ecuación (4)}$$

$$E = h\nu \text{ ecuación (5)}$$

$(F(R)h\nu)^n = fh\nu$ ecuación (6) en donde S es el factor de dispersión de la luz, K es el coeficiente de absortividad del material, f es la función de la energía, $F(R)$ es la ecuación de Kubelka-Munk (Negrete-Duran, et al, 2021) y $n = 2$ al considerar solo la transición directa entre las bandas. En la figura 3 se muestra el valor de band gap obtenido para los materiales sintetizados, dichos valores se obtienen al graficar $(F(R)h\nu)^n$ vs la energía del fotón incidente, al extrapolar de valor de $(F(R)h\nu)^n = 0$ se obtiene el valor de la banda prohibida en eV.

Figura 3

Gráficos de Tauc de la muestra de hematita pura y con agente dopante.



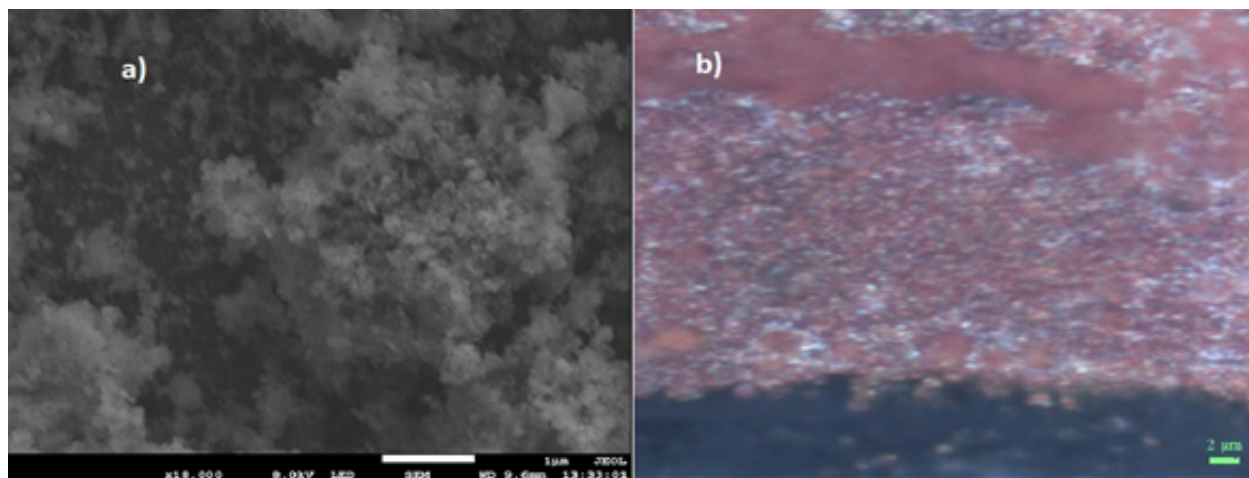
Nota: Para la muestra de hematita pura se obtuvo un valor de eV (línea Negra) mientras que, al generar AgCl con hematita, se logró obtener un valor de $E_g = 2.29 \text{ eV}$ (línea roja).

Como podemos observar se logró disminuir el requerimiento energético en 0.59 eV al promover el proceso de dopaje in situ del AgCl, obteniendo un valor de $E_g = 1.60 \text{ eV}$ muy similar al de los semiconductores que se elaboran a base de indio, telurio o selenio que resultan ser muy costosos (Wood-Robinson et al., 2020). Los resultados obtenidos indican que este tipo de materiales podría ser usado como capa activa en celdas solares o en procesos de degradación de contaminantes (Fiore et al., 2022; Vinayagam et al., 2022) que sean promovidos por reacciones de catálisis. Finalmente se examinó la morfología de los depósitos generados empleando microscopía óptica y SEM, sin embargo, no se observó mucha variación, los depósitos generados no son homogéneos, ya que, si bien se logra la adherencia al sustrato de hematita con y sin dopar, estos al ser examinados a detalle con el microscopio SEM solo se observan aglomeraciones de material sobre la superficie del material.

Con base en lo anterior en la figura 4 se muestra una micrografía en el a) de la muestra de AgCl + α -hematita y en el b) una toma de la misma muestra solo que se examinó con el microscopio óptico, ambos en escala de micrómetros.

Figura 4

Gráficos de Tauc de la muestra de hematita pura y con agente dopante.



Nota: a) Micrografía de SEM tomada de la muestra de hematita con AgCl, b) imagen tomada de la muestra de hematita con AgCl empleando microscopia óptica.

CONCLUSIONES

Es importante decir que la importancia de este trabajo radica en la síntesis y caracterización de α -Hematita generando un agente dopante durante el proceso de síntesis, que en este caso el AgCl resulta al final ser el agente dopante. Algunos autores como Ruiz, et al (2019) concuerdan en que en un inicio se genera maghemita (γ -Hematita) al adicionar la base y posteriormente con el tratamiento térmico existe un reacomodo estructural dando paso a la formación del producto final (α -Hematita), y es esta etapa de transición en donde aprovechamos para adicionar el agente dopante (AgNO_3) y al final formar con la presencia de cloruros el AgCl cristalino en la hematita.

Es fundamental resaltar que el uso de la técnica de precipitación controlada ayuda a obtener la formación de la hematita y su agente dopante mediante una re-

acción in situ y evita realizar el proceso en dos partes (primero la síntesis de hematita y luego introducir el agente dopante) como comúnmente se hace, acortando los tiempos de síntesis.

También destacamos que al generar correctamente la síntesis in situ de los cristales de AgCl logramos mejorar el valor de la brecha energética del material obteniendo, pasando de un valor inicial $E_g = 2.29$ eV a un valor final de $E_g = 1.60$ eV, dicho valor permitirá que el material pueda ser empleado en aplicaciones fotovoltaicas o catalíticas como ya se ha estado haciendo en otras investigaciones.

Hay que recalcar que con los datos recabados en el difractograma logramos caracterizar y establecer la presencia de α -Hematita con geometría romboédrica y AgCl con geometría cubica centrada en la cara mediante la ubicación de las señales

características reportadas en la literatura.

Por otro lado, cabe mencionar que en las imágenes de microscopía óptica y SEM se observa que los depósitos generados durante el proceso de síntesis no son generados de manera homogénea debido a que se observa la presencia de aglomerados en el depósito generado.

Por último, es importante mencionar

que mediante el uso de los difractogramas se determinó que el tamaño de cristal es de 46.62 nm para la muestra de hematita pura y de 53.91 nm para la muestra que se ha dopado con AgCl, lo que indica que, a pesar de ser un material aglomerado, se pueden formar depósitos en escala nanométrica.

REFERENCIAS

- Campos-Quirós, A., Paniagua-Murillo, K., Valladares-Castrillo, G., Cubero-Sesin, J. M., & Cordero-Arias, L. (2022). Análisis cualitativo y cuantitativo de fosfatos de calcio por difracción de rayos-X mediante los métodos de Scherrer, Williamson-Hall y refinamiento de Rietveld. (35), 104-115. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/5664/6191
- Cucaita, O. (2017). Tendencias en ingeniería de materiales para la fabricación de células solares fotovoltaicas. 1-23 <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/3982>
- de Melo Santiago, G., Paludo, D. y Pasquali, G. D. L. (2022). síntesis y caracterización de óxidos de hierro: goethita, hematita y ferrihidrita para su uso en procesos de descontaminación ambiental. viaje de la iniciativa científica y tecnológica, 1(12) 1-5. <https://portaleventos.uffs.edu.br/index.php/JORNADA/article/view/16763>
- Fiore, A. M., Varvaro, G., Agostinelli, E., Mangone, A., De Giglio, E., Terzano, R. & Mastroilli, P. (2022). Synthesis and use in catalysis of hematite nanoparticles obtained from a polymer supported Fe (III) complex. European Journal of Inorganic Chemistry, 2022(7), 6-10. <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ejic.202100943>
- Guzmán, D. D., Álvarez, M. D. C. Z., García, F. L., González, N. K. P., Urbiola, E. A. C., & Cardona, M. R. (2022). Caracterización de una zeolita obtenida por el método de fusión alcalina con caolín silicoso. 9(9), 81-86. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/aactm/article/view/9429/9346>
- Hjiri, M. (2020). Highly sensitive NO₂ gas sensor based on hematite nanoparticles synthesized by sol-gel technique. 31(6), 5025-5031. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10854-020-03069-4>
- López, D., & Linares, C. (2018). Caracterización del lodo rojo calcinado a diferentes temperaturas. 25(1), 86-92.
- Mandawat, N. K., Sharma, H. S., & Chouhan, N. (2019). Nanocomposite Ag@AgCl/ZnO for efficient hydrogen generation through water splitting. 1, 1-12. <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-019-0578-1>
- Mármol, M., & Gallardo, M. R. (2020). El color del Desarrollo Regional de la Costa Ecuatoriana. Estudio Multianalítico por DRX y SEM-EDS. (39), 64-68. <https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqila/documentos/Numero39/Numero-39.pdf>
- Martínez-Hernández, H. P., Luna-López, J. A., Luna-Flores, A., & Hernández-De La Luz, J. Á. D. Comparaciones ópticas y estructurales de las películas de Óxido de Silicio rico en Silicio (SRO) depositadas por las técnicas LPCVD y HFCVD. (6), 19-25. https://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Sistemas_Experimentales/vol6num21/Revista_de_Sistemas_Experimentales_V6_N21.pdf#page=27
- Mejía, M. E., Bravo, J. A., & Reyes, F. A. (2022).

- Síntesis y caracterización de partículas de hematita (α -Fe₂O₃) obtenidas por tratamiento térmico de FeSO₄ con azúcar. 25(1), 19-25. <https://revista-sinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/fisica/article/view/21240/17908>
- Morales-Morales, J. A. (2017). Synthesis of hematite α -Fe₂O₃ nano powders by the controlled precipitation method. 8(1), 99-107. <http://www.scielo.org.co/pdf/cide/v8n1/0121-7488-cide-8-01-00099.pdf>
- Negrete-Durán, S. E., Villabona-Leal, E. G., Alanís-Pérez, J., Navarro-Contreras, H. R., Quintana-Ruiz, M., & Ojeda-Galván, H. J. (2021). Síntesis y caracterización de Ce_{1/2}Cu₃Ti₄O₁₂ sol-gel asistida por ácido cítrico. 9(Especial2), 128-133. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/8015/8690>
- Nyarige, J. S., Krüger, T. P., & Diale, M. (2020). Effects of L-arginine concentration on hematite nanostructures synthesized by spray pyrolysis and chemical bath deposition. (581), 411924. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092145261930804X>
- Ortiz-Godoy, N., Agredo-Díaz, D. G., Garzón-Posada, A. O., Vargas, C. A. P., Téllez, D. A. L., & Roa-Rojas, J. (2021). A facile method to produce magnetic nanoparticles and its influence on their magnetic and physical properties. (293), 129700. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167577X21003967>
- Paulson, E., & Jothibas, M. (2021). Significance of thermal interfacing in hematite (α -Fe₂O₃) nanoparticles synthesized by sol-gel method and its characteristics properties. (26), 101432. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2468023021005095>
- Rondón, B., Silva, P., Arjona, J. y Mantilla, J. (2021). Síntesis y caracterización de materiales mesoporosos amorfos impregnados con Hematita (Fe₂O₃) para su uso en la eliminación de H₂S. Acta Microscópica, 30(1), 40-52. <https://acta-microscopica.org/acta/article/view/550>
- Ruiz, M. A. C., Molina, C. G., Rodríguez, G. A. J., Mendoza, J. A. P., & Cobos, O. F. H. (2019). Síntesis de un pigmento anticorrosivo mediante el tratamiento térmico de los óxidos de hierro procedentes de residuos siderúrgicos. 28(52), 43-58. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7019310>