

Síntesis de CaO por el método Pechini empleando Óxido de Grafeno como mineralizador de fase.

CaO synthesis by the Pechini method using Graphene Oxide as phase mineralizer.

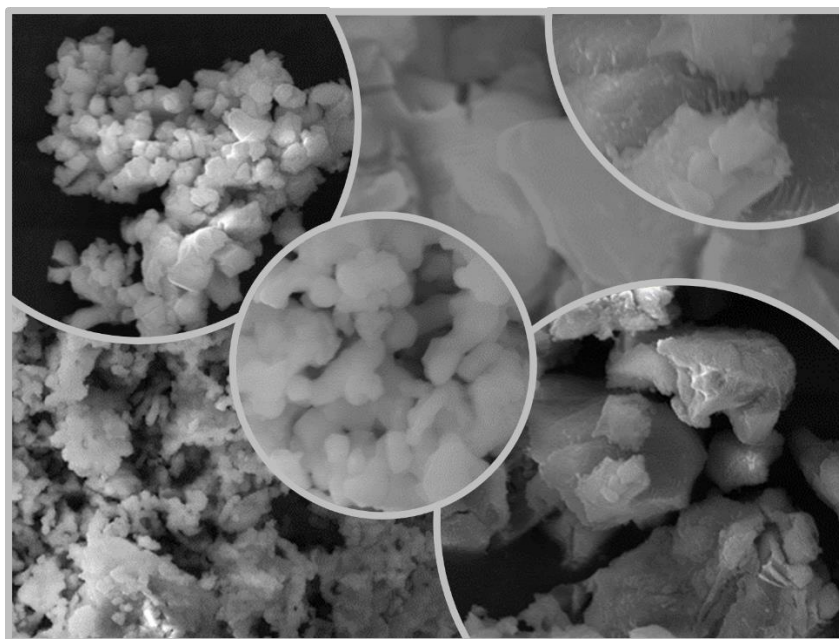


Imagen: Elaboración propia.

C.M. López Badillo^{1,*}, J.J. Ruíz-Mondragón², L.C. Vislar-Mares¹, H.Y. López-De la Peña³, B.R. Cruz-Ortiz¹.

¹ Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, Blvd. Venustiano Carranza e Ing. José Cárdenas Valdés s/n, 25280, Saltillo, Coahuila, México.

² Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, Calle Ciencia y Tecnología 790, Fracc. Saltillo 400, Saltillo, Coahuila, México.

³ Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Saltillo, Coahuila, México.

*Correspondencia para autor: Claudia M. López Badillo
Universidad Autónoma de Coahuila
[correo electrónico: cllopezb@uadec.edu.mx](mailto:cllopezb@uadec.edu.mx)

Resumen:

Se llevó a cabo la síntesis de óxido de calcio por el método de Pechini, empleando óxido de grafeno (GO) como mineralizador de fase usando una atmósfera no controlada, con el propósito de disminuir la temperatura de reacción para la obtención del CaO. Se logró obtener la fase pura de CaO desde los 700 °C, disminuyendo la obtención del material en 50 °C en comparación con la muestra sin GO, obteniendo tamaños de cristalita de 39, 39.7 y 55.5 nm para las temperaturas de 700, 750 y 800 °C, respectivamente. Por microscopía electrónica de barrido se observó que conforme se incrementó la temperatura de reacción se incrementó el tamaño de partícula, obteniendo resultados favorables en la disminución de las temperaturas de reacción para la síntesis de Pechini usando GO como mineralizador.

Palabras clave: Pechini, óxido de grafeno, CaO, mineralización.

Abstract:

The synthesis of calcium oxide was carried out by the Pechini method, using graphene oxide (GO) as a phase mineralizer using an uncontrolled atmosphere, with the purpose of reducing the reaction temperature to obtain CaO. It was possible to obtain the pure phase of CaO from 700 °C, decreasing the obtaining of the material by 50 °C compared to the sample without GO, obtaining crystallite sizes of 39, 39.7 and 55.5 nm for the temperatures of 700, 750 and 800 °C, respectively. By scanning electron microscopy, it was observed that as the reaction temperature increased, the particle size increased, obtaining favorable results in the reduction of the reaction temperatures for the Pechini synthesis using GO as a mineralizer.

Key words: Pechini, Graphene oxide, CaO, mineralization.

Introducción

El óxido de calcio (CaO) ha sido ampliamente usado como: sorbente regenerable para la captura de gases como el CO_2 proveniente de los gases de combustión de las plantas de energía, donde el CO_2 es absorbido por el CaO para formar CaCO_3 (Akgornpeak y col., 2014; Rolfe y col., 2017), en cámaras de combustión de lecho fluidizado para capturar SO_2 , obteniendo CaSO_3 (Anthony y Granatstein, 2001; Bai y col., 2020), como parte de una de las materias primas más importantes para la elaboración de materiales vitrocerámicos (Koshchug y col., 2020; Pei y col., 2020) y vidrios (Sergi y col., 2020), como material para aplicaciones antibacteriales (López-Badillo y col., 2021), para favorecer los procesos de densificación de cerámicos (Jing y col., 2020), etc.

Para la síntesis de las partículas de CaO se empleó el método Pechini el cual es un método simple para preparar polvos de óxidos metálicos donde los precursores poliméricos se obtienen a partir de sales metálicas, etilenglicol y ácido cítrico mediante tratamiento térmico a baja temperatura, entre sus ventajas se encuentran que se obtienen composiciones homogéneas de bajo costo, alta pureza y bajas temperaturas de tratamiento térmico (Sakka y Kozuka, 2005).

Las temperaturas de obtención del CaO están en el intervalo de 700-900 °C, esta temperatura está en función tanto del método de síntesis empleado como de los reactivos de partida (Akgornpeak y col., 2014; López-Badillo y col., 2021; Radfarnia y Sayari, 2015; Sun y col., 2020).

Por su parte, el óxido de grafito, comúnmente llamado óxido de grafeno (GO) es una lámina de carbono corrugado con más de la mitad de los átomos de carbono funcionalizados con grupos hidroxilo y epoxi, y los bordes parcialmente ocupados por hidroxilos, carboxilos, cetonas, ésteres e incluso estructuras de lactol. El GO ha mostrado varias aplicaciones prometedoras en catálisis, compuestos, almacenamiento de energía, detección, purificación de agua, electrónica, etc. (Gao,

2015). Se ha reportado que la combinación de GO con algunos materiales reduce su punto de fusión para el caso de materiales poliméricos (Dhanalakshmi y Vijayakumar, 2020), en otros casos favorece la nucleación y crecimiento de fases cristalinas, como en el caso de nanopartículas de óxidos de cobalto en láminas de óxido de grafeno reducido (Jokar y col., 2014). También se ha observado que la presencia de óxido de grafeno favorece la formación de sistema ternarios sin necesidad de atmósfera inerte (Kottappara y col., 2021). Cabe aclarar que los materiales mencionados anteriormente son materiales compuestos, la finalidad de este trabajo fue emplear al óxido de grafeno como mineralizador de fase, de tal manera que formara CaO en atmósfera de aire empleando temperaturas más bajas.

Materiales y Métodos

Síntesis de nanopartículas de CaO

Parte 1: Se preparó en una solución acuosa con etilenglicol (EG) y ácido cítrico anhidro (AC) a una relación 3:1 respectivamente, subsecuentemente se agregó el nitrato de calcio tetra hidratado (NC) hasta disolverse, la relación NC:AC fue de 1:2, se ajustó el pH hasta 8.6 con hidróxido de amonio, posteriormente, fue calentado a 70 °C, ajustando nuevamente el pH en ~8 con hidróxido de amonio, manteniendo la temperatura y el pH durante 2 h. El gel formado se colocó en la estufa a 180 °C durante 24 h.

Parte 2: Se molió en el mortero y se trató térmicamente el material (650-800 °C).

Síntesis del óxido de grafeno

El óxido de grafeno fue sintetizado por medio del método empleado por Araujo (Araujo y col., 2015) que es el método Hummers modificado en el cual no se agregó el NaNO₃. Se añadieron en un matraz Erlenmeyer 125 mL de H₂SO₄ y 15 g de KMnO₄ (añadido cuidadosamente) con agitación constante durante 15 min, el matraz Erlenmeyer se debe mantener en un sistema de enfriamiento, después se

agregaron 5 g de grafito lentamente, posteriormente se retiró el sistema de enfriamiento y se mantuvo en agitación durante 4 h, pasando de una agitación magnética a mecánica. Posteriormente se agregó en un vaso de precipitado 1 L de agua destilada y se fue agregando poco a poco la mezcla anterior, se elevó la temperatura hasta 80 °C y se agitó durante 30 min, después se agregaron 10 mL de H₂O₂ (al 30% V/V) y se dejó agitando 30 min y se dejó reposar durante 24 h para posteriormente decantar y lavar con 100 mL de agua destilada y 50 mL de HCl (0.1 M) y se dejó agitando por 30 min, después se dejó precipitar, este lavado fue para remover los iones metálicos. El procedimiento de agregar agua destilada, agitar y decantar, se realizó varias veces hasta alcanzar el pH neutro. Finalmente se dejó secando en una mufla a 100 °C.

Síntesis de nanopartículas de CaO empleando GO como mineralizador

El 2% en peso de óxido de grafeno se colocó en agua desionizada dentro de un baño de ultrasonido durante 30 min con una frecuencia de 40 kHz, posteriormente, se agregó la mezcla obtenida en la parte 1 (Síntesis de nanopartículas de CaO) previamente molida en un mortero de diamonita y se sonicó durante 30 min, seguido de un mezclado con un agitador magnético durante 30 min. Se colocó en la estufa a 120°C durante 1 h para eliminar el agua y finalmente se trató térmicamente durante 5 h a 650-800 °C.

Técnicas de Caracterización

Las fases presentes encontradas con los diferentes tratamientos térmicos para obtener el CaO fueron identificadas por Difracción de Rayos X (DRX) usando un equipo PANalytical Modelo Empyrean, los patrones de DRX fueron recopilados empleando radiación CuK α ($\lambda=1.54$ Å) en el intervalo $2\theta= 10-80^\circ$, usando un tamaño de paso de 0.026° , usando un voltaje de 40 kV y corriente de 30 mA.

Los tamaños de cristalita fueron calculados de los patrones de difracción de rayos-X usando la ecuación de Scherrer, usando los dos picos principales. El cálculo de

la energía libre de Gibbs fue calculado por medio del software HSC Chemistry (versión 6).

La morfología de las partículas fue observada mediante Microscopía Electrónica de Barrido usando un equipo Tescan modelo Mira 3, el cual está equipado con un detector EDS (espectrómetro de energía dispersiva) para realizar el análisis elemental. Las muestras fueron previamente recubiertas con oro-paladio.

Resultados y discusión

El óxido de grafeno fue caracterizado por medio de difracción de rayos-X en los ángulos $2\theta = 8-80^\circ$, difractando el pico principal en el ángulo $2\theta = 10.97^\circ$, esta posición en el ángulo 2θ corresponde al plano (001) de acuerdo a la carta ICDD-PDF-2 00-065-1528, cabe mencionar que esta posición 2θ puede verse fácilmente influenciada por el grado de oxidación e hidratación de la muestra de GO (Gao, 2015), lo cual coincide con lo publicado con Vazquez-Jaime y col. (2020), los cuales obtuvieron este pico característico entre el ángulo $2\theta = 9.37^\circ$ y 10.71° , dichas posiciones están influenciadas por el método de síntesis empleado revelando que la oxidación del grafeno se lleva a cabo exitosamente (Vazquez-Jaime y col., 2020), este espacio entre las intercapas del GO es proporcional al grado de oxidación (Marcano y col., 2010). También se observó en este patrón de DRX la presencia de un pico en el ángulo $2\theta = 42.18^\circ$, el cual también se observó en otros trabajos donde sintetizaron óxido de grafeno (Guerrero-Contreras y Caballero-Briones, 2015; Kottappara y col., 2021; Vazquez-Jaime y col., 2020).

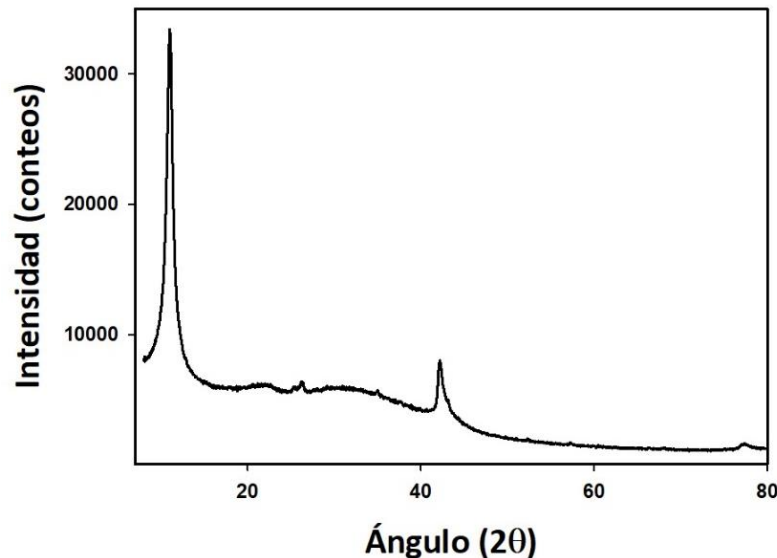


Figura 1. Patrón de difracción de rayos-X del óxido de grafeno.

Las fases desarrolladas después de las síntesis por el método Pechini sin emplear óxido de grafeno como mineralizador se muestran en los patrones de DRX de la Figura 2, donde en el tratamiento térmico a 800 °C se pudo observar solamente la presencia de CaO (carta ICDD PDF-2 01-082-1691), sus picos principales están ubicados en las posiciones $2\theta = 32.29, 37.46$ y $54.02, 64.365, 67.600$ y sus planos son el (111), (200), (220), (311) y el (222), respectivamente, en las muestras tratadas a 750 °C se pudo detectar la presencia de la fase CaO, sin embargo, la intensidad de los picos fue menor, lo cual puede indicar un menor desarrollo de la cristalización del CaO. En el tratamiento térmico realizado a 700 °C se puede observar la presencia de las fases de Ca(OH)_2 como fase principal (carta ICDD PDF-2 01-076-0570), el CaCO_3 (carta ICDD PDF-2 01-076-0570), y trazas de CaO que es la fase deseada, también se realizó un tratamiento a 650 °C, sin embargo, no se tuvo una mezcla de fases no identificadas, en las cuales el CaO no estuvo presente.

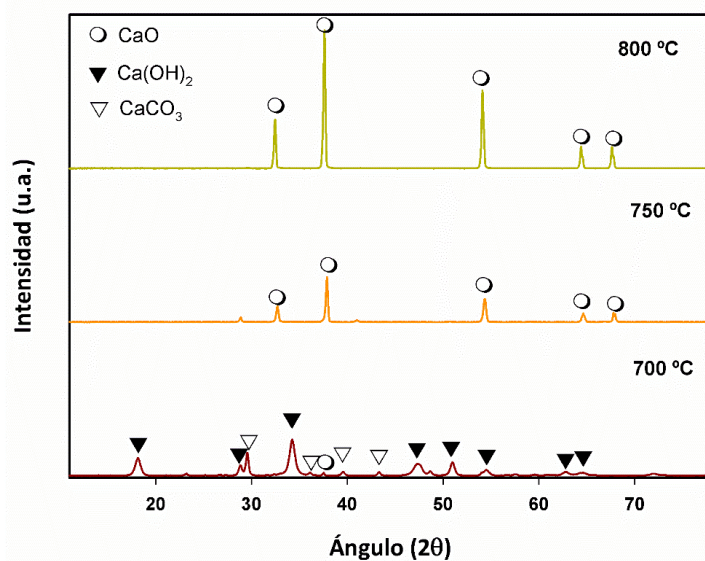


Figura 2. Patrones de difracción de rayos-X para la síntesis de CaO con tratamientos térmicos a 700, 750 y 800 °C.

En la Figura 3 se pueden observar los patrones de DRX de las síntesis de CaO con un 2% e.p. de óxido de grafeno como mineralizador, se puede observar a 650 °C la presencia de CaCO₃ como fase principal, con trazas de CaO, cabe mencionar que el proceso de análisis de todas las muestras se llevó a cabo en menos de 24 h, sin embargo, en la muestra tratada a 650 °C, aún bajo condiciones de análisis inmediato (15 min) no se pudo evitar la presencia de CaCO₃ como fase principal.

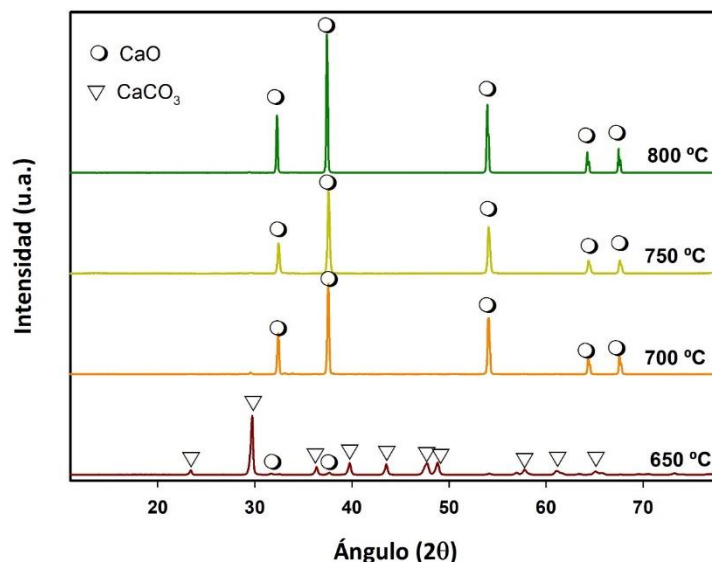
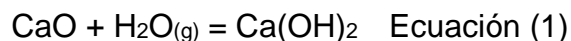


Figura 3. Patrones de difracción de rayos-X para la síntesis de CaO con tratamientos térmicos a 650, 700, 750 y 800 °C, empleando un 2% e.p. de GO.

La presencia de óxido de grafeno no se observó en los patrones de difracción de rayos X cumpliendo con el propósito de que el GO actuara como mineralizador, acelerando la formación del CaO durante la síntesis, tomando en cuenta de que en literatura se había reportado que el GO producía desproporcionadas reacciones altamente exotérmicas y con calentamiento explotaba en pocos segundos, llevándose a cabo la desoxigenación térmica altamente exotérmica del GO a ~210 °C de acuerdo a pruebas térmicas realizadas (Krishnan y col., 2012).

Los tamaños de cristalita fueron obtenidos usando el pico principal del CaO en la posición $2\theta = 37.46^\circ$ en el plano (200), para las muestras obtenidas con el 2% de GO, para la temperatura de síntesis de 700, 750 y 800 °C fueron 39, 39.7 y 55.5 nm, y para las muestras obtenidas por el método Pechini sin GO, a las temperaturas de 750 y 800 °C, se obtuvo un tamaño de cristalita de 39.5 y 40.8 nm, respectivamente. Estos valores obtenidos son muy similares a los tamaños promedio de cristalita reportados por Fedunik-Hofman, Bayon, Hinkley, Lipinski, Donne (2019), los cuales fueron de 55.2 nm (Fedunik-Hofman y col., 2019).

De manera general, cuando se tiene la presencia de CaCO_3 o de Ca(OH)_2 en las muestras después de sintetizar el CaO es debido a las reacciones presentadas en las ecuaciones 1 y 2, ocurriendo primero la formación de CaO a partir de la reacción de Pechini, y posteriormente, proceden dichas reacciones.



Los cálculos de la energía libre de Gibbs de la Ecuación 1 y 2 a diferentes temperaturas se muestran en la Tabla 1 y de acuerdo con estos cálculos, a mayor temperatura de síntesis es menos factible que ocurra la reacción del CaO con el CO_2 , se piensa que esta reacción del CaO con el CO_2 pudo haberse presentado desde que estaba en el horno, ya que la muestra tratada a $650\text{ }^\circ\text{C}$ se analizó inmediatamente por DRX al salir del horno, de acuerdo con estos cálculos de energía libre de Gibbs el CaO es más estable a más altas temperaturas, esto está relacionado con los procesos de sinterización que experimenta la muestra a más alta temperatura que impiden una mayor reacción con el CO_2 (Lysikov y col., 2007). De tal manera que cuando se lleva a cabo la reacción a más baja temperatura, el CaO se vuelve mucho más reactivo, lo cual depende del método de síntesis utilizado y por lo tanto también el grado de reacción con el CO_2 .

Un comportamiento similar a lo ocurrido en este trabajo de investigación fue reportado por E.T. Santos y col. (2012), revelando que el CaO fresco reaccionó fácilmente con el dióxido de carbono, presentando cambios en función del método de obtención, donde en muestras de CaO obtenidas a partir del proceso sol-gel ($850\text{ }^\circ\text{C}/5\text{ h}$) se detectó la presencia de trazas de CaCO_3 en el CaO fresco, y posteriormente se hidrataron conforme se incrementó el tiempo de exposición al medio ambiente, formando Ca(OH)_2 . Por otra parte, cuando el CaO fue obtenido a

partir de la calcinación de CaCO_3 no se observó la presencia de CaCO_3 , solo la presencia de Ca(OH)_2 solo después de 8 h de exposición al medio ambiente.

Tabla 1. Cambio de la energía libre de Gibbs para la reacción 1 y 2.

Temperatura (°C)	ΔG (kJ) (Reacción 1)	ΔG (kJ) (Reacción 2)
25	-66.360	-130.42
650	16.51	-34.30
700	22.60	-26.95
750	28.62	-19.64
800	33.12	-12.39

En este trabajo de investigación, en las muestras sintetizadas sin GO a 700 °C (Figura 2) se presentaron tanto los procesos de carbonatación como de hidratación, siendo más relevante el de hidratación, esta hidratación ocurre a temperatura ambiente tomando en cuenta que estas muestras se analizaron por DRX en un periodo de 24 h, en cambio en las muestras sintetizadas en presencia de GO a 650 °C el proceso de carbonatación fue el más relevante (Figura 3) y al incrementar la temperatura de síntesis solo se observó la presencia de CaO.

En las micrografías de la Figura 4 se pueden observar las morfologías obtenidas para la síntesis de CaO llevada a cabo en la presencia de GO después de los tratamientos térmicos a 650 y 750 °C, se puede observar que conforme se incrementó el tiempo de tratamiento térmico el tamaño de grano fue incrementando (Figura a y c); cabe mencionar que aunque en la muestra obtenida a 650 °C se carbonató de acuerdo a los resultados obtenidos por DRX, la morfología puede ser

muy similar a la muestras sin carbonatar (Santos y col., 2012), sin embargo, si se presenta un incremento en el volumen de la estructura, siendo más alargada la morfología cuando se carbonata, por otro lado se ha reportado que cuando el CaO experimenta recarbonatación-descomposición se comienza la formación de la red de partículas de CaO interconectadas, y esta formación de dicha red estabiliza la capacidad sorbente del CaO (Lysikov y col., 2007).

Para el caso de la muestra sin la presencia de óxido de grafeno (Figura e y f) el tamaño de partícula fue mucho mayor que en la síntesis llevada a cabo con óxido de grafeno como mineralizador, obteniéndose un tamaño de partícula mucho más refinado para las muestras con GO. Este tipo de morfologías son muy similares a la encontradas por el método sol-gel (850 °C) (Santos y col., 2012) y el método Pechini (900 °C) (Fedunik-Hofman y col., 2019).

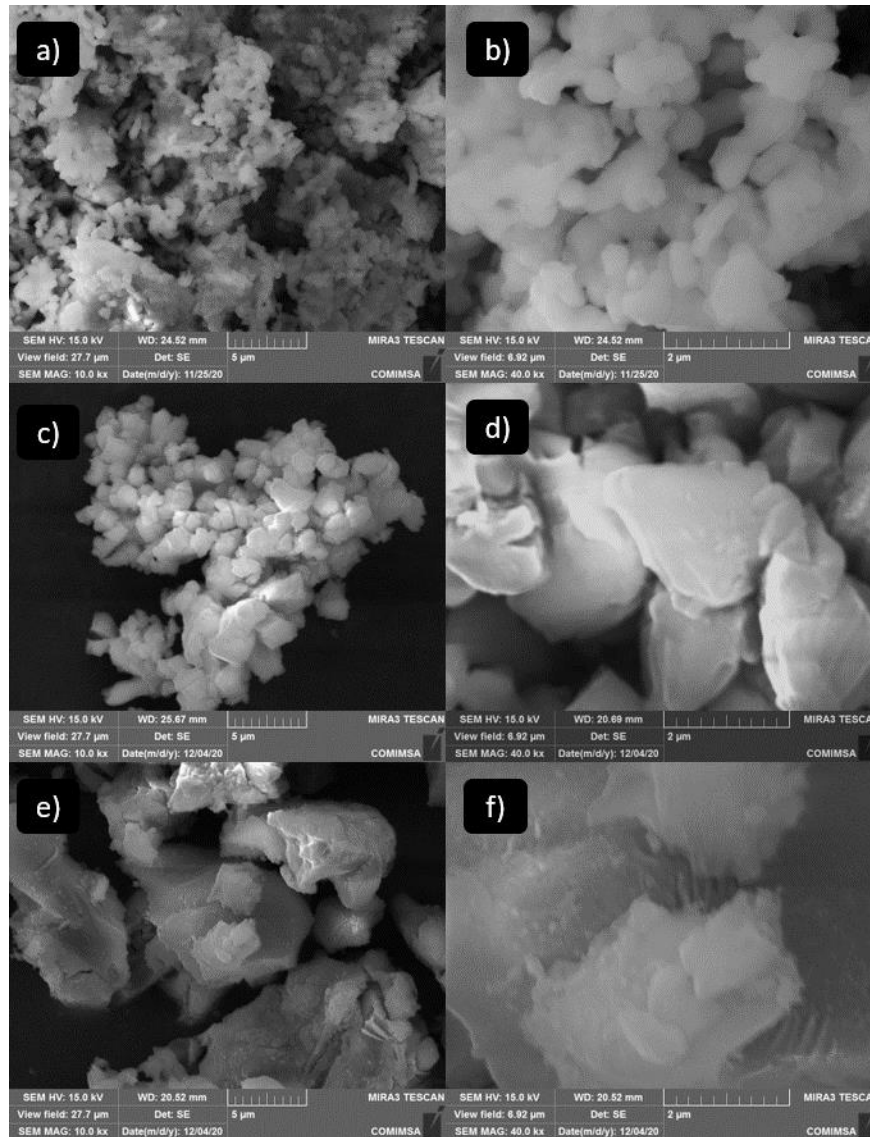


Figura 4. Micrografías de muestras tratadas térmicamente empleando GO como mineralizador: a) 650 °C-10 kX, b) 650 °C – 40 kX, c) 750 °C – 10kX, d) 750 °C – 40 kX, y la síntesis de CaO sin GO de las muestras tratadas a: e) 750 °C – 10 kX y f) 750 °C- 40 kX.

Conclusiones

Fue posible sintetizar la fase CaO por medio del método Pechini empleando óxido de grafeno como mineralizador de fase a 700 °C en atmósfera de aire, disminuyendo 50 °C la temperatura de obtención del CaO, obteniendo un tamaño de partícula más grande conforme se incrementó la temperatura de tratamiento térmico. Esta investigación abre la posibilidad de explorar la síntesis de otros materiales por medio de la síntesis de Pechini usando óxido de grafeno como mineralizador favoreciendo la obtención de fases estables a más baja temperatura.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo otorgado para el desarrollo de este proyecto al “Proyecto Semilla UADEC 2019 CGEPI-UADEC C01-2019-57”.

Referencias bibliográficas

Akgsornpeak, A., Witoon, T., Mungcharoen, T. & Limtrakul, J. (2014). Development of synthetic CaO sorbents via CTAB-assisted sol-gel method for CO₂ capture at high temperature. *Chemical Engineering Journal*, 237, 189–198. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.10.023>

Anthony, E. J. & Granatstein, D. L. (2001). Sulfation phenomena in fluidized bed combustion systems. *Progress in Energy and Combustion Science*, 27(2), 215–236. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(00\)00021-6](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(00)00021-6)

Araujo, R., Marques, M. F. V, Jonas, R., Grafova, I. & Grafov, A. (2015). Functionalization of Natural Graphite for Use as Reinforcement in Polymer Nanocomposites. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 15(8), 6176–6182. <https://doi.org/10.1166/jnn.2015.10033>

Bai, Y. J., Chen, M. Q., Li, Q. H. & Huang, Y. W. (2020). Sulfation performance of CaO under circulating fluidized bed combustion-like condition. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 142(2), 1031–1042. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09857-8>

Dhanalakshmi, J. P. & Vijayakumar, C. T. (2020). Particulate nanocomposites based on bismaleimide-graphene oxide: Thermal studies. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 24, 100604. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2020.100604>

Fedunik-Hofman, L., Bayon, A., Hinkley, J., Lipiński, W. & Donne, S. W. (2019). Friedman method kinetic analysis of CaO-based sorbent for high-temperature thermochemical energy storage. *Chemical Engineering Science*, 200, 236–247.

<https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.02.003>

Gao, W. (2015). Graphene Oxide, reduction recipes, spectroscopy, and applications. En W. Gao (Ed.), *Springer International Publishing Switzerland*. Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15500-5>

Guerrero-Contreras, J. & Caballero-Briones, F. (2015). Graphene oxide powders with different oxidation degree, prepared by synthesis variations of the Hummers method. *Materials Chemistry and Physics*, *153*, 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.01.005>

Jing, Y., Liu, Q., Mao, X., Su, S., Li, X., Liu, X., Feng, Y., Chen, X. & Li, J. (2020). Influence of CaO on microstructure and properties of MgAl₂O₄ transparent ceramics. *Optical Materials*, *110604*. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110604>

Jokar, E., Irajizad, A. & Shahrokhian, S. (2014). Growth control of cobalt oxide nanoparticles on reduced graphene oxide for enhancement of electrochemical capacitance. *International Journal of Hydrogen Energy*, *39*(36), 21068–21075. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.10.061>

Koshchug, D. G., Koshlyakova, A. N., Balitsky, V. S. & Vyatkin, S. V. (2020). Infrared and Raman spectroscopy study of Si_{1-x}GexO₂ solid solutions with α -quartz structures. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *233*, 118168. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118168>

Kottappara, R., Palantavida, S., Pillai, S. C. & Vijayan, B. K. (2021). Composition tuning in copper - oxide decorated reduced graphene oxide yields efficient photo- and reduction catalysts. *Surfaces and Interfaces*, *22*, 100792. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100792>

Krishnan, D., Kim, F., Luo, J., Cruz-Silva, R., Cote, L. J., Jang, H. D. & Huang, J. (2012). Energetic graphene oxide: Challenges and opportunities. *Nano Today*, *7*(2), 137–152. <https://doi.org/10.1016/j.nantod.2012.02.003>

López-Badillo, C. M., Hernández-González, M., Hernández-Centeno, F., Olivas-Armendáriz, I., Rodríguez-González, C. A., Múzquiz-Ramos, E. M., López-Cuevas, J. & López-De la Peña, H. Y. (2021). Antibacterial activity and in vitro cytotoxicity studies of Ag-doped CaO nanoparticles. *Materials Letters*, *283*. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128741>

Lysikov, A. I., Salanov, A. N. & Okunev, A. G. (2007). Change of CO₂ Carrying Capacity of CaO in Isothermal Recarbonation–Decomposition Cycles. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *46*(13), 4633–4638. <https://doi.org/10.1021/ie0702328>

Marcano, D. C., Kosynkin, D. V., Berlin, J. M., Sinitskii, A., Sun, Z., Slesarev, A., Alemany, L. B., Lu, W. & Tour, J. M. (2010). Improved Synthesis of Graphene Oxide. *ACS Nano*, *4*(8), 4806–4814. <https://doi.org/10.1021/nn1006368>

Pei, F., Zhu, G., Li, P., Guo, H. & Yang, P. (2020). Effects of CaF₂ on the sintering and crystallisation of CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂ glass-ceramics. *Ceramics International*, *46*(11, Part A), 17825–17835. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.089>

Radfarnia, H. R. & Sayari, A. (2015). A highly efficient CaO-based CO₂ sorbent prepared by a citrate-assisted sol-gel technique. *Chemical Engineering Journal*, 262, 913–920. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.09.074>

Rolfe, A., Huang, Y., Haaf, M., Rezvani, S., Dave, A. & Hewitt, N. J. (2017). Techno-economic and Environmental Analysis of Calcium Carbonate Looping for CO₂ Capture from a Pulverised Coal-Fired Power Plant. *Energy Procedia*, 142, 3447–3453. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.228>

Sakka, S. & Kozuka, H. (2005). *Handbook of sol-gel science and technology. 1. Sol-gel processing*. Kluwer Academic Publishers. <https://books.google.com.mx/books?id=i9swy1D2HxIC>

Santos, E. T., Alfonsín, C., Chambel, A. J. S., Fernandes, A., Soares Dias, A. P., Pinheiro, C. I. C. & Ribeiro, M. F. (2012). Investigation of a stable synthetic sol-gel CaO sorbent for CO₂ capture. *Fuel*, 94, 624–628. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.10.011>

Sergi, R., Bellucci, D., Salvatori, R., Anesi, A. & Cannillo, V. (2020). A novel bioactive glass containing therapeutic ions with enhanced biocompatibility. *Materials*, 13(20), 1–16. <https://doi.org/10.3390/ma13204600>

Sun, J., Wang, W., Yang, Y., Cheng, S., Guo, Y., Zhao, C., Liu, W. & Lu, P. (2020). Reactivation mode investigation of spent CaO-based sorbent subjected to CO₂ looping cycles or sulfation. *Fuel*, 266, 117056. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117056>

Vazquez-Jaime, M., Arcibar-Orozco, J. A., Damian-Ascencio, C. E., Saldaña-Robles, A. L., Martínez-Rosales, M., Saldaña-Robles, A. & Cano-Andrade, S. (2020). Effective removal of arsenic from an aqueous solution by ferrihydrite/goethite graphene oxide composites using the modified Hummers method. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(6), 104416. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104416>

Yoonus, J., Resmi, R. & Beena, B. (2020). Greener nanoscience: Piper betel leaf extract mediated synthesis of CaO nanoparticles and evaluation of its antibacterial and anticancer activity. *Materials Today: Proceedings*, 46, 535-540. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.246>