



Captura y transformación de CO₂ utilizando como adsorbentes nanopartículas de calcio y magnesio soportados en SBA-15c

CO₂ capture and transformation using as adsorbents calcium and magnesium nanoparticles supported in SBA-15c

González-Nava María Isabel

Universidad Autónoma de Querétaro, Qro.

Facultad de Ingeniería

División de Investigación y Posgrado

Correo: mgonzalez304@alumnos.uaq.mx

<https://orcid.org/0009-0000-3161-6105>

Nava-Mendoza Rufino

Universidad Autónoma de Querétaro, Qro.

Facultad de Ingeniería

División de Investigación y Posgrado

Correo: rufino@uaq.mx

<https://orcid.org/0000-0001-7230-073X>

Resumen

Día con día las emisiones de gases de efecto invernadero van en aumento provocando que la superficie de la tierra se caliente a un ritmo muy acelerado que preocupa a numerosos científicos y climatólogos (Maring & Webley, 2013). Las emisiones de CO₂ han ido en aumento en estos últimos años, por lo que se requiere de soluciones y tecnologías para reducir estas emisiones. La captura, almacenamiento y transformación de CO₂ nos brinda la oportunidad de reducir las emisiones a la atmósfera y así mitigar los problemas relacionados (Chacón, 2019). En la siguiente investigación se describen brevemente los procesos que se llevaron a cabo para adsorber CO₂, comenzando con la síntesis de la SBA-15c. Al obtener MgO, Mg(OH)₂, CaO y Ca(OH)₂ en proporciones de 5 %, 10 % y 15 %, se impregnaron en la sílice mesoporosa, continuando con los estudios necesarios para saber que los materiales se impregnaron correctamente y así seguir con el proceso de la adsorción de CO₂. De acuerdo con los resultados y analizando las muestras del MgO, Mg(OH)₂, CaO y Ca(OH)₂, las cuales se encuentran soportadas en la sílice mesoporosa del tipo SBA-15c, las muestras con mayor adsorción de CO₂ son las de magnesio, el cual va en aumento mientras mayor sea la proporción de la impregnación para un 15 % de MgO, 4.5 mmol/g y 4.1 mmol/g para 15 % de Mg(OH)₂.

Descriptores: Adsorción de CO₂, óxidos, hidróxidos, sílice mesoporosa.

Abstract

Day by day, greenhouse gas emissions are increasing, causing the earth's surface to warm at a very fast rate that worries many scientists and climatologists (Maring & Webley, 2013). CO₂ emissions have been increasing in recent years, so solutions and technologies are required to reduce these emissions. The capture, storage, and transformation of CO₂ gives us the opportunity to reduce emissions into the atmosphere and thus mitigate related problems (Chacón, 2019). In the following research, the processes that were carried out to adsorb CO₂ are briefly described, starting with the synthesis of SBA-15c, and by obtaining MgO, Mg(OH)₂, CaO and Ca(OH)₂, in proportions of 5 %, 10 % and 15 %, they were impregnated in the mesoporous silica, continuing with the necessary studies to know that the materials were impregnated correctly and thus continue with the process of CO₂ adsorption. According to the results and analyzing the samples of MgO, Mg(OH)₂, CaO and Ca(OH)₂, which are supported by the mesoporous silica of the SBA-15c type, the samples with the highest CO₂ adsorption are those of magnesium, which increases the higher the proportion of impregnation, for 15 % of MgO, 4.5 mmol/g and 4.1 mmol/g for 15 % Mg(OH)₂.

Keywords: CO₂ adsorption, oxides, hydroxides, mesoporous silica.

INTRODUCCIÓN

La actividad humana ha causado que las emisiones de CO₂ se emitan en grandes cantidades a la atmósfera y afecte seriamente al medio ambiente y la calidad de vida de las personas. Se estima que sin el CO₂ y el vapor de agua en la atmósfera, la temperatura promedio en la superficie de la Tierra sería con valores bajo cero, ya que estos gases absorben parte de la radiación infrarroja que va de regreso al espacio después de rebotar en la superficie terrestre (Abdullah *et al.*, 2022). De esta forma, si no se disminuyen drásticamente las emisiones de carbono, habrá un daño irreparable al planeta, pero ¿Qué pasaría si hubiera una manera de capturar carbono de la fuente y atraparlo en algún lugar permanentemente?

La captura de CO₂ consiste, de manera general, en la separación del dióxido de carbono del resto de gases que se originan durante la combustión en centrales térmicas, refinerías de petróleo, fabricación de cemento e industria siderúrgica, fundamentalmente. Una vez separado, se transporta e inyecta en formaciones geológicas profundas, donde permanecerá confinado de forma segura por un tiempo indefinido. De esta manera se reduce la cantidad de CO₂ emitida a la atmósfera (López *et al.*, 2013).

Acorde a lo que menciona Cuellar *et al.* (2015) el proceso de transformar CO₂ consiste en la conversión química que ocurre con los adsorbentes alcalinos. La transformación de CO₂ en carbonatos de calcio y magnesio estables e insolubles en agua es un enfoque sostenible para el almacenamiento permanente de CO₂ (Shan *et al.*, 2018). A su vez, la adsorción es un proceso de separación en el que se transfiere un material conocido como adsorbato, de un fluido ya sea líquido o gaseoso a una fase sólida denominada adsorbente (Adamson, 1996). En este proceso, el material adsorbente se trata de un sólido poroso para concentrar al adsorbato en su superficie (Beruto & Botter, 2000).

Varios adsorbentes alcalinos se han propuesto para captura y mineralización del CO₂ a través de la carbonatación gas-sólido tales como óxidos metálicos simples (por ejemplo, CaO, MgO), hidróxidos (por ejemplo, Ca(OH)₂, Mg(OH)₂ y Na(OH)₂ (Reddy *et al.*, 2011). Estas nanopartículas consisten en partículas de metales comunes con tamaños inferiores a los micrones, es decir, de escala nanométrica (Gislason *et al.*, 2014). El hidróxido de calcio se puede utilizar como reactivo (Vance *et al.*, 2015), la carbonatación mineral implica la reacción de CO₂ con óxidos metálicos tales como magnesio y óxido de calcio para formar carbonatos (Cuellar *et al.*, 2015). Los hidróxidos y óxidos de calcio y de magnesio son minerales de silicato, que son relativamente abundantes en todo el mundo, son una materia prima atractiva para la mineralización del CO₂ (Styring & North, 2015). En este sentido, el material deno-

minado SBA-15 (Santa Bárbara Amorfo No. 15), que fue desarrollado por primera vez por Stucky *et al.*, (1994), posee una alta área superficial y una estructura hexagonal de poros uniformes (honeycomb-like), y que además, puede ser preparado en un amplio rango de tamaños de poro (4.6 nm a 30 nm) y espesores de pared de poro (3.1 nm a 6.4 nm) (que se logra variando la temperatura (35 °C a 140 °C) y tiempo de reacción (11 h a 72 h) durante su síntesis); ofrece propiedades texturales adecuadas para incorporar en su superficie nanopartículas de hidróxidos y óxidos metálicos, generando una alta dispersión de éstos y en consecuencia, se podrían generar adsorbentes más activos para la reacción de carbonatación.

En este trabajo se buscan desarrollar materiales adsorbentes de CO₂ con base en sílices mesoporosas del tipo SBA-15 de talla corta y decorada con nanopartículas de los hidróxidos y óxidos metálicos de calcio y magnesio, para la captura y conversión de CO₂.

MATERIALES Y MÉTODOS

PREPARACIÓN DE MATERIALES

Síntesis del material de sílice mesoporoso ordenado SBA-15c

El material de sílice mesoporoso SBA-15 corta se preparó mediante el proceso Sol-Gel (Zarazua *et al.*, 2017), donde se utiliza un surfactante neutro como agente director de la meso-estructura, el Pluronic P123.

El P123 se disuelve en una solución de ácido clorhídrico y agua desionizada con agitación constante a 35 °C. Una vez completamente disuelto el P123, se inicia el proceso Sol-Gel mediante la adición del precursor de la sílice (Hernández *et al.*, 2013) el TEOS. La reacción se realizó por 24 horas y con agitación constante.

Transcurrido este tiempo se efectúa el proceso de madurado, colocando el gel obtenido en un recipiente de polipropileno, se tapa y se coloca en la mufla durante 24 horas a una temperatura de 80°C sin agitación.

Al terminar se deja enfriar y se recupera el sólido por filtración (Styring & North, 2015). Se seca a temperatura ambiente y posteriormente a 110 °C por 18 h a una rapidez de calentamiento de 2 °C/min.

Finalmente, se calcina a 550 °C por 4 h a una rapidez de calentamiento de 1 °C/min. De esta manera se logrará eliminar la base orgánica dando como producto solo la estructura mesoporosa de sílice (Vance *et al.*, 2015). El proceso se describe en la siguiente Figura 1.

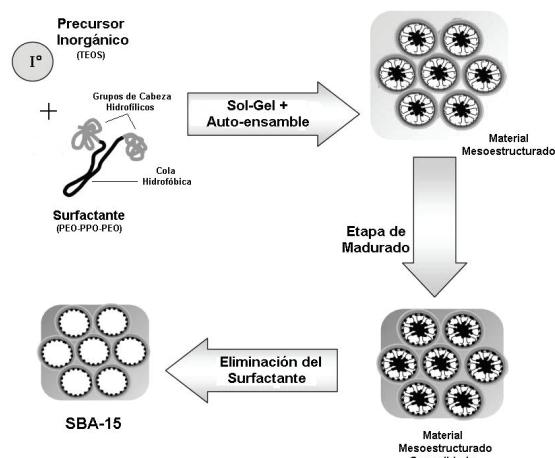


Figura 1. Síntesis del material de sílice mesoporoso ordenado SBA-15c

Incorporación de las nanopartículas de Ca(OH)₂ y de Mg(OH)₂ en la SBA-15c

Para la incorporación de las nanopartículas de hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) e hidróxido de magnesio (Mg(OH)₂) en la superficie de la sílice mesoporosa de talla corta SBA-15c se empleó el método de impregnación por llenado de poro (mojado incipiente) (Feliczak *et al.*, 2016). Se utilizaron como fuente los hidróxidos de calcio y magnesio, soluciones acuosas de acetato de calcio (II) dihidratado Ca(OH)₂·2H₂O (Sigma-Aldrich) y acetato de magnesio (II) dihidratado Mg(OH)₂·2H₂O (Sigma-Aldrich). Se variaron las cantidades (5, 10 y 15 % en peso) de Ca(OH)₂ y de Mg(OH)₂ y de (5, 10 y 15 % en peso) de CaO y de MgO que se depositaron en la SBA-15c. Posteriormente, las muestras impregnadas se secaron a una temperatura de 110 °C por 18h.

CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Determinación de las propiedades texturales, morfológicas, estructurales y electrónicas de los materiales adsorbentes:

Isotermas de adsorción-desorción de N₂ a 77 K

Las propiedades texturales de las sílices mesoporosas SBA-15 y NH₂-SBA-15 se determinaron mediante las isotermas de adsorción-desorción de N₂ a 77 K en un equipo Autosorb iQ2, de la marca Quanthachrome.

Previo al análisis, la muestra se desgasificó a 150 °C a vacío durante 5 h, para asegurar una superficie seca, limpia y libre de especies débilmente adsorvidas.

Difracción de Rayos-X (DRX) a ángulos bajos y convencionales

Mediante la difracción de rayos-X (DRX) a bajos ángulos (0-5 ° en 2θ), se verificaron el orden en el arreglo de los poros de la SBA-15c y de la NH₂-SBA-15c (Tanev & Pinnavaia, 1995).

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Con el microscopio electrónico de barrido HITACHI SU8200 se tomaron las imágenes de las muestras de la SBA-15c y de la NH₂-SBA-15c, con las cuales se determinaron principalmente la morfología y el tamaño de las partículas (Chang, 2017b).

Las muestras en forma de pastilla se colocarán en los portamuestras y se recubrirán con carbón.

Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier (FT-IR)

La presencia de los grupos amino en la superficie de la sílice mesoporosa SBA-15c, así como la interacción de la molécula de CO₂ con los grupos amino, se analizaron por medio de la respuesta vibracional de sus enlaces moleculares, a través de los análisis por espectroscopía de infrarrojo (Beck *et al.*, 2008). Los espectros de vibración de IR de las muestras en polvo, se medirán en un espectrofotómetro Bruker Vector 33, en el rango de 400 a 4000 cm⁻¹, con una resolución de 2 cm⁻¹.

Espectroscopía micro Raman

Los espectros vibrónicos de los enlaces moleculares debido a la presencia de los grupos amino en las muestras de NH₂-SBA-C y como caracterización complementaria a los espectros de FT-IR, se realizó la espectroscopía micro Raman, utilizando un microespectrómetro modelo Labram-Dior (López *et al.*, 2013).

Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico TGA/DTG permitirá evaluar la estabilidad térmica de los grupos funcionales amino en el interior de los poros de los materiales mesoporosos (Montes *et al.*, 2012). Este estudio se realizará en un equipo Q500 TGA y Q2000 DSC de TA Instruments, en un rango de temperatura de 25 °C a 600 °C.

Reacción decarbonatación

La reacción de carbonatación bajo condiciones no-isotérmicas se efectuó en un analizador termogravimétrico TGA/DTG, en un equipo Q500 TGA de TA Instruments, en un rango de temperatura de 25 °C a 800 °C. Con una rapidez de calentamiento de 10°C/min y un flujo de 50 mL/min de 100 % de CO₂ gas.

Determinación del tipo de interacción entre las nanopartículas de hidróxido y óxido de calcio y magnesio.

Especroscopía fotoelectrónica de rayos-X (XPS)

La técnica XPS permite identificar las especies en una muestra, su estado de oxidación y su entorno químico. Debido a que cada átomo tiene un factor de respuesta característico, la señal de XPS se puede utilizar en la determinación cuantitativa de especies químicas en la superficie (Zhao *et al.*, 1998).

Para verificar la adsorción de las moléculas de CO₂ en los adsorbentes se realizó la espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CALORIMETRÍA DIFERENCIAL DE BARRIDO (DSC)

Los precursores del Ca y Mg impregnados en la SBA-15c, y que se les dio un tratamiento térmico de 110 °C, determinaron con mayor precisión a qué temperatura se obtienen los hidróxidos y óxidos de calcio y magnesio, de acuerdo con lo reportado en la literatura (Figura 2).

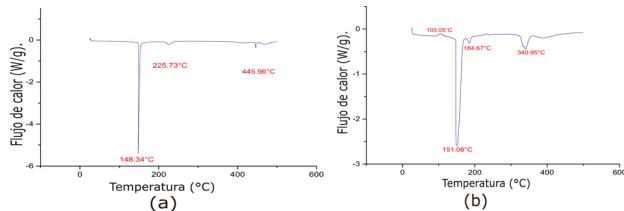


Figura 2. Se obtienen los hidróxidos a partir de 100°-300°. En este caso, los hidróxidos de calcio se obtuvieron a 148.34° y los hidróxidos de magnesio a 151.08, mientras que los óxidos se obtienen a partir de 301°-500°, los óxidos de calcio fueron a 445.96° y los óxidos de magnesio a 340.95°

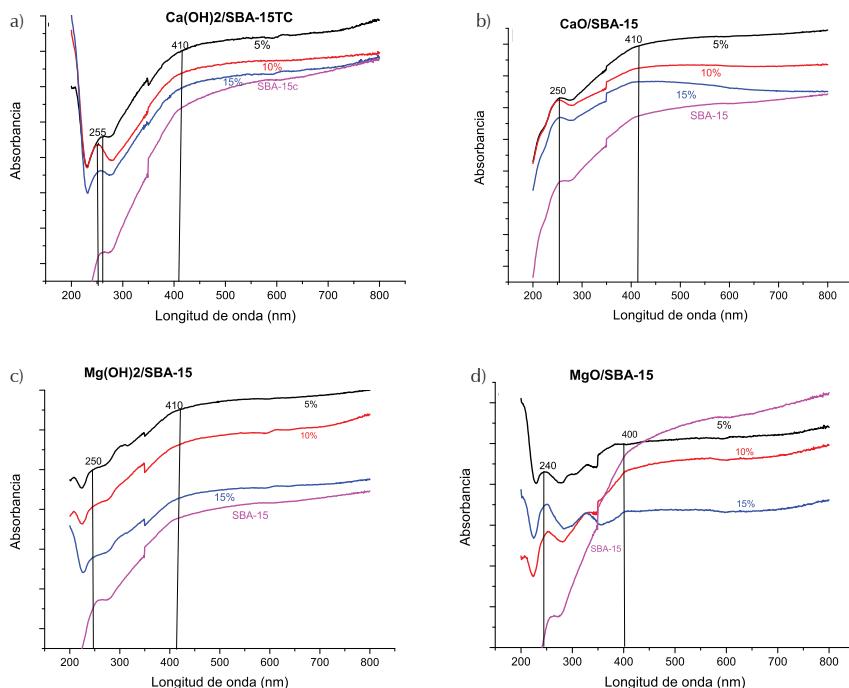


Figura 4. a) Dos bandas de absorción con alta intensidad centradas en aproximadamente 255 y 360 nm, característicos del Ca²⁺ unido al OH⁻, en los bordes y esquinas de los cristalitos del Ca(OH)₂; b) Dos bandas de absorción con alta intensidad, aproximadamente en 250 y 350 nm, característicos del Ca²⁺ unido al O²⁻, en los bordes y esquinas de los cristalitos de CaO; c) Dos bandas de absorción con alta intensidad, aproximadamente en 250 y 330 nm, característicos del Mg²⁺ unido al OH⁻, en los bordes y esquinas de los cristalitos de Mg(OH)₂; d) Dos bandas de absorción con alta intensidad, aproximadamente en 250 y 330 nm, característicos del Mg²⁺ unido al O²⁻, en los bordes y esquinas de los cristalitos de MgO. Estas bandas indican la presencia de los hidróxidos y óxidos de calcio y de magnesio

FLUORESCENCIA DE RAYOS X. FRX

La sílice mesoporosa pura (SBA-15c) y los diferentes resultados se mostraron respecto con la proporción equivalente de cada uno de los precursores, empezando por los óxidos de magnesio, de 5 %, 10 % y 15 %, los hidróxidos de magnesio, de 5 %, 10 % y 15 %, óxidos de calcio, de 5 %, 10 % y 15 % y los hidróxidos de calcio, de 5 %, 10 % y 15 %, los cuales se encuentran en una proporción adecuada (Figura 3).

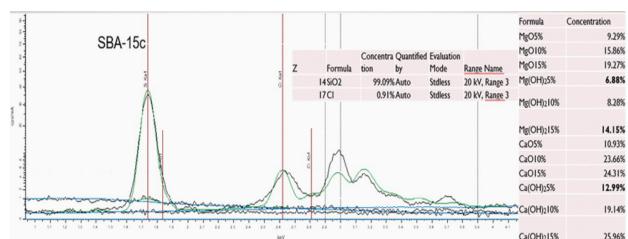


Figura 3. Se puede ver que las proporciones de las muestras están arriba de los porcentajes señalados, por lo que los resultados serán excelentes al adsorber el CO₂ con los materiales

ESPECTROSCOPIA DE REFLECTANCIA DIFUSA EN EL RANGO UV-VIS

ESPECTROSCOPIA MICRO-RAMAN

Al igual que en la reflectancia difusa UV-VIS, el estudio en micro-Raman nos confirma la presencia de los hidróxidos y óxidos de calcio y de magnesio. Se muestran las cargas (números de onda) (Figura 5).

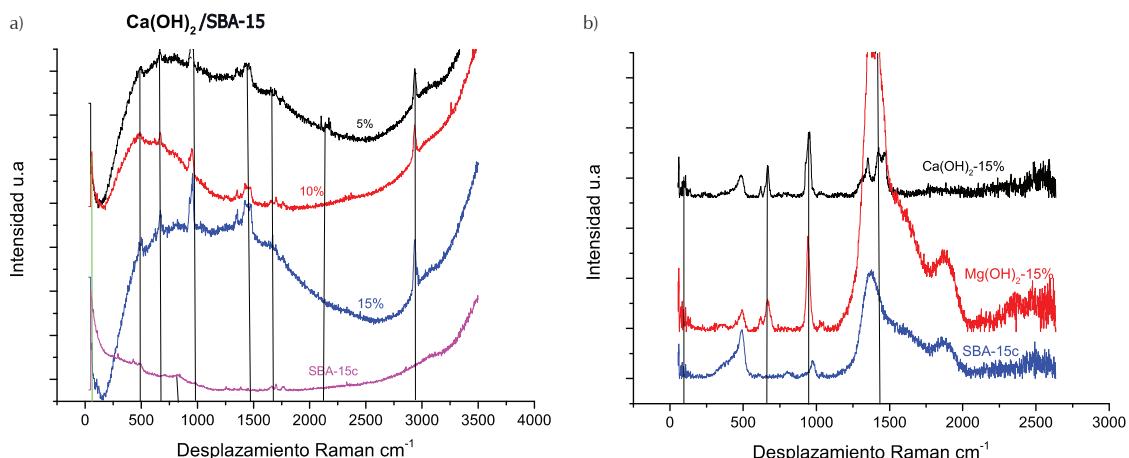


Figura 5. En la figura de la izquierda, en los espectros se observan picos en las posiciones de 80 cm^{-1} , 500 cm^{-1} , 700 cm^{-1} , 1000 cm^{-1} , 1500 cm^{-1} , 1700 cm^{-1} y 3000 cm^{-1} aproximadamente, asignados a los modos de vibración, respectivamente. Estos modos ópticos son característicos de la estructura hexagonal. En la figura de la derecha, en estos espectros se observan picos en las posiciones de 80 cm^{-1} , 500 cm^{-1} , 700 cm^{-1} , 1000 cm^{-1} , 1500 cm^{-1} , 1700 cm^{-1} y 1900 cm^{-1} aproximadamente, asignados a los modos de vibración, respectivamente

DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

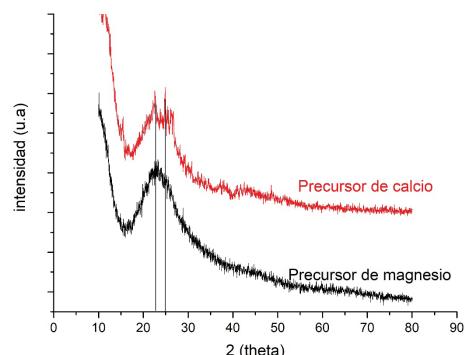


Figura 6. La reflexión intensa, pero muy amplia, centrada en 24° en 2θ corresponde a la sílice amorfá y sobre ella se ven algunas reflexiones características para el CaO y apenas para el MgO, puesto que estos óxidos están soportados en la superficie de la SBA-15c se ven más reflexiones, pero son débiles y amplias, lo cual significa que el CaO soportado en la SBA-15c es amorfa o está tan disperso que está en tamaño de nanopartículas muy pequeñas de 5 nm o menos, no se puede determinar adecuadamente porque el haz de electrones puede ser más grueso. El MgO no tiene reflexiones bien definidas, se encuentran altamente dispersos en la SBA-15c y es bueno, porque entre más dispersas estén las nanopartículas de óxidos e hidróxidos, se tendrá una mayor cantidad de sitios activos para la adsorción. Se secó a 110°C . En el precursor de calcio se presenta una reflexión aproximadamente en 23° y 25° en 2θ , característico de una sílice amorfá

DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

Se puede observar en las imágenes de los incisos a y b (Figura 7), que las reflexiones que se presentan son más, pero más cortas, mientras en la imagen del inciso c se ve una reflexión pronunciada distinta a la de la sílice mesoporosa pura, lo que indica la existencia del $\text{Mg}(\text{OH})_2$, impregnado, lo mismo sucede en el inciso d con el MgO , por lo que en todas las muestras analizadas se impregnaron con éxito los hidróxidos y óxidos de calcio y magnesio.

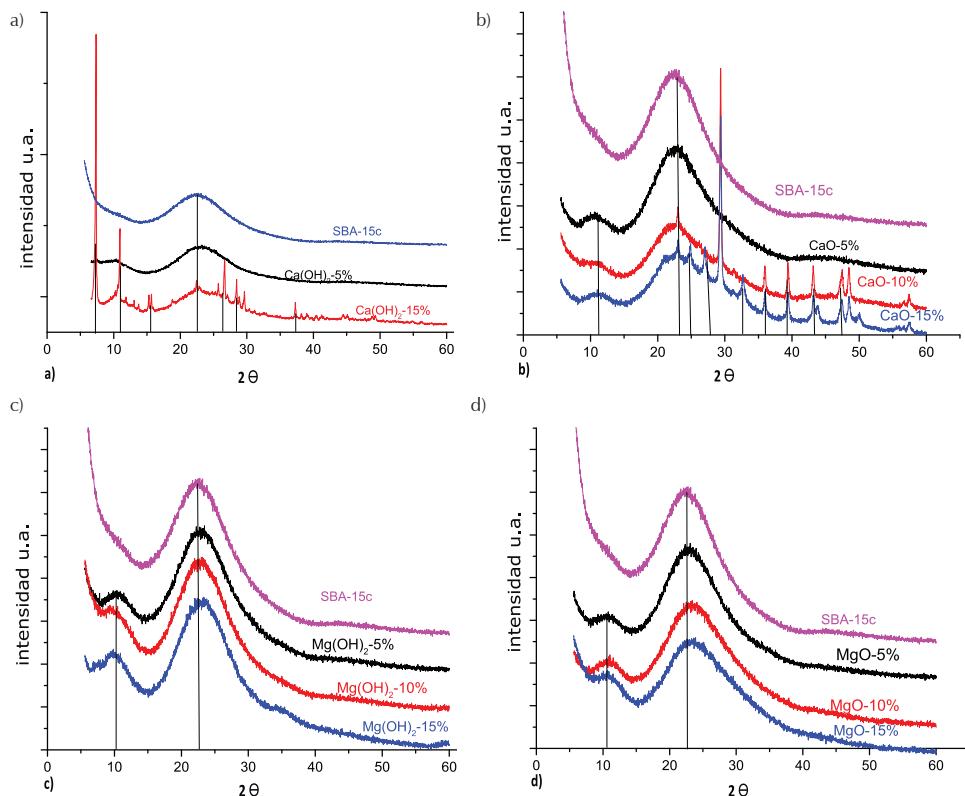


Figura 7. Difracción de Rayos X (DRX): a) Mg(OH)₂, b) Ca(OH)₂-Mg(OH)₂, c) CaO y d) MgO

DIFRACCIÓN DE RAYOS X A BAJOS ÁNGULOS

En la Figura 8 del lado izquierdo, se puede ver el valor de 2 theta entre 0.3 y 0.9, que es característico de una estructura hexagonal del material mesoporoso SBA-15c, del lado derecho se analizó el mismo material, pero acortando el valor de 2 theta desde 0.6 y hasta 2.2, para saber realmente lo que estaba sucediendo, se puede ver la reflexión del CaO, que se encuentra presente en la sílice mesoporosa SBA-15c.

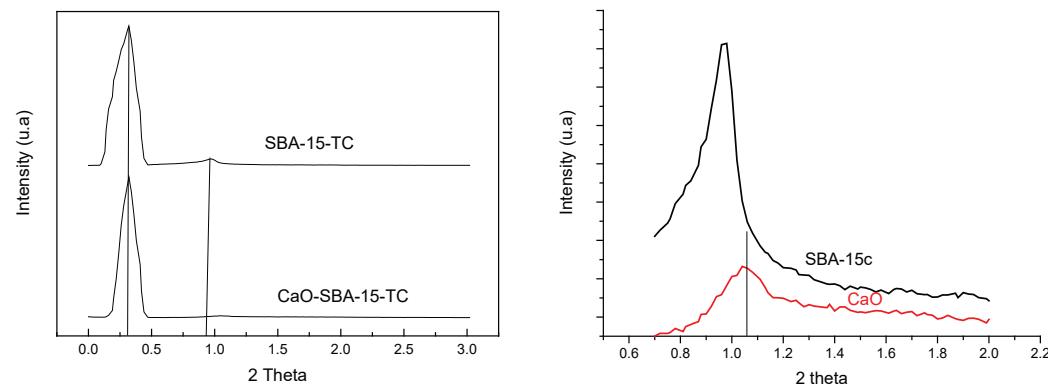


Figura 8. Estructura hexagonal del material mesoporoso SBA-15c

SEM

Aún con la impregnación de los hidróxidos y óxidos de calcio y magnesio se conserva la estructura de la SBA-15c. En todas las imágenes se observan partículas a simple vista que no se ven en la SBA-15c, lo cual comparándolo con los otros métodos que se llevaron a cabo nos dice que existe la presencia del calcio y magnesio, estos se encuentran en la superficie externa. En la figura d, se puede ver que existe mayor área superficial por lo que es muy probable que los CaO, se encuentren impregnados en la superficie interna de los poros (Figura 9).

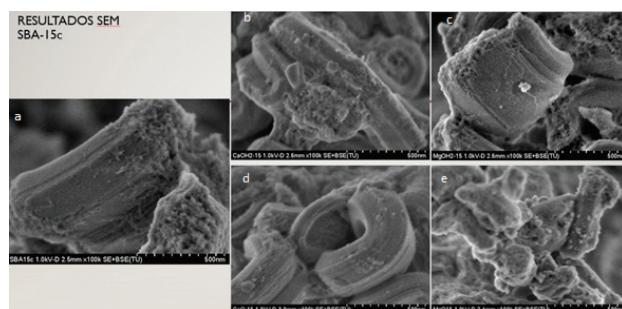


Figura 9. a) SBA-15c, b) Ca(OH)₂, c) Mg(OH)₂, d) CaO y e) MgO

ESPECTROSCOPÍA DE INFRARROJO

Las siguientes bandas mostradas en la Figura 10 indican:

- 750-800 cm⁻¹, se asigna a la vibración del enlace Si-O-Si, grupo siloxano.
- 950 cm⁻¹ grupo silanol Si-OH.
- 1100 cm⁻¹ grupo siloxano Si-O-Si.
- 1600 cm⁻¹ agua adsorbida en el material.
- 2300 cm⁻¹ interacción entre CaO y Si.
- 3500 cm⁻¹ grupo silanol Si-OH.

Se confirma con el análisis de Micro Raman que entre mayor porcentaje serán de mayor tamaño los números de onda.

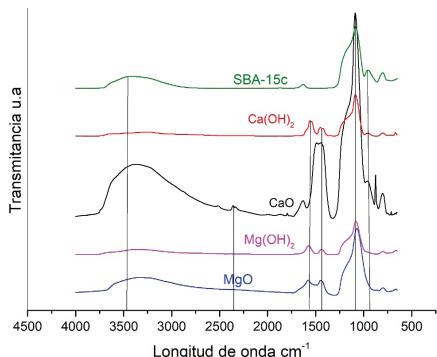


Figura 10

ISOTERMAS DE MgO Y CaO/ DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE POROS DE MgO Y CaO

Las propiedades texturales de los materiales mesoporosos se estudiaron mediante las isoterma de adsorción-desorción N₂ a 77 K. Las distribuciones de tamaño de poro se calcularon a partir de la isoterma de adsorción, utilizando el modelo Barrett-Joyner-Halenda.

Las isoterma de adsorción-desorción N₂ de los materiales se presentan en la Figura 11, del lado izquierdo. Todas las muestras mesoporosas de MgO/SBA-15c y CaO/SBA-15c, así como la SBA-15c pura, exhiben isoterma de adsorción del tipo IV con áreas de histéresis tipo H1 según la clasificación IUPAC. Estas isotermas son características de materiales mesoporosos con una disposición hexagonal de poros.

La muestra SBA-15c presenta el área de histéresis en un rango bien definido a altas presiones relativas (0.61 < P/P₀ < 0.8) que representa el llenado espontáneo de los mesoporos debido a la condensación capilar, indicando la presencia de mesoporos uniformes. Las sílicas mesoporosas modificadas de MgO y CaO muestran áreas de histéresis a intervalos de presiones relativas más bajas (0.4 < P/P₀ < 0.7) debido a una disminución en el tamaño de los mesoporos por la presencia de pequeñas partículas de MgO y CaO dispersas dentro de los poros de SBA-15c.

Todas las isotermas presentadas son similares a las reportadas en la literatura para la sílice mesoporosa SBA-15c. Como se ve en la Figura 11, del lado izquierdo, las isoterma de adsorción-desorción de N₂ de las matrices mesoporosas (MgO)_x/SBA-15 y (CaO)_x/SBA-15c son similares, lo que indica que la mesoestructura del material SBA-15c se mantuvo tras la incorporación de MgO y de CaO.

En cuanto a la distribución del tamaño de poro que se muestra en la misma figura, del lado derecho cabe señalar que todas las matrices mesoporosas muestran una distribución uniforme y estrecha del tamaño de poro. Parece haber un cambio de diámetro de poro a un diámetro más pequeño tras un aumento de la carga de MgO y de CaO. Simultáneamente, el volumen total de N₂ disminuyó con el aumento de la carga de MgO y de CaO en las matrices mesoporosas. Como era de esperar, la carga de magnesio y del calico en la matriz de sílice disminuye el área superficial y el volumen de poro del soporte SBA-15 (Tabla 1).

Al aumentar la carga de Mg y de CaO, hay un cambio de diámetro a más pequeño y el volumen total también disminuye.

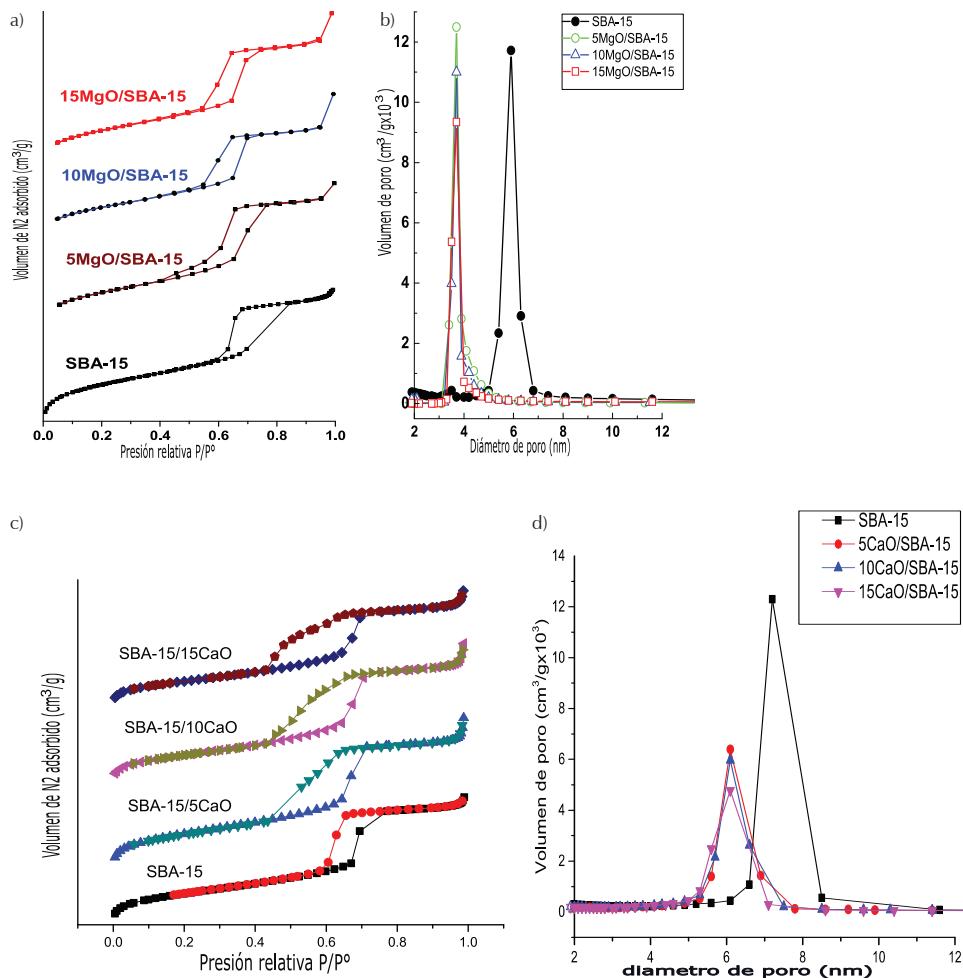


Figura 11. Isothermas de MgO y de CaO del lado izquierdo/distribución de tamaño de poros de MgO y de CaO del lado derecho

Tabla 1. Propiedades texturales de los materiales mesoporosos de SBA-15, de MgO/SBA-15c y de CaO/SBA-15c

Muestra	MgO y CaO (wt.%)	S _{BET} (m ² /g)	V _{total} (m ³ /g)	D _p (nm)
SBA-15	0.0	932	1.05	5.9
5%MgO/SBA-15c	9.29	659	0.83	5.0
10%MgO/SBA-15c	15.86	505	0.69	5.0
15%MgO/SBA-15c	19.27	507	0.52	4.1
5%CaO/SBA-15c	10.93	584	0.694	5.1
10%CaO/SBA-15c	23.66	575	0.683	4.9
15%CaO/SBA-15c	24.31	506	0.581	4.0

Nota: Área superficial específica BET (S_{BET}), volumen total de poros (V_{total}) y diámetro de poro (D_p)

ADSORCIÓN DE CO₂. TGA

De acuerdo con el estudio realizado se puede ver que entre mayor sea el porcentaje de impregnación de los óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio, su adsorban- cia aumenta, pero el material que mayor adsorción de CO₂ presenta es el magnesio (Figura 12).

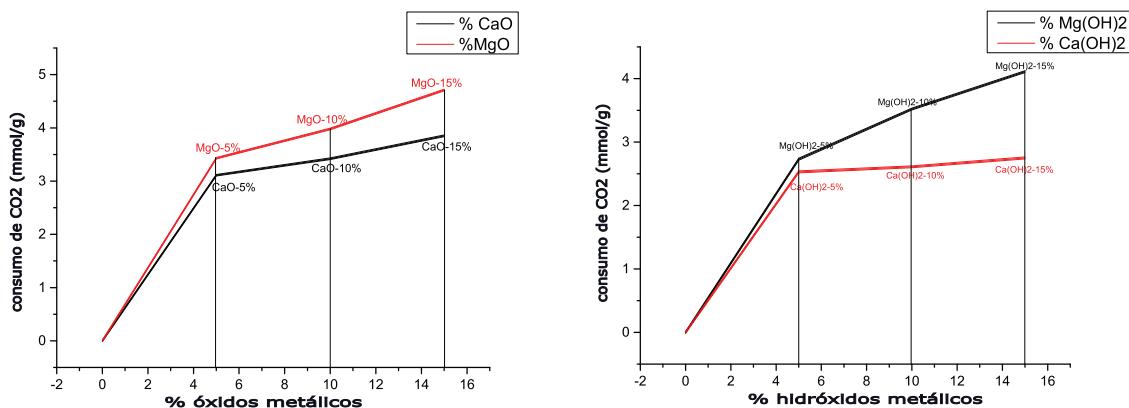


Figura 12. Adsorción de CO₂, del lado izquierdo los óxidos de calcio y de magnesio en proporciones de 5 %, 10 % y 15 %, del lado derecho los hidróxidos de calcio y de magnesio en proporciones de 5 %, 10 % y 15 %

CONCLUSIONES

Se preparó de manera exitosa el material de sílice mesoporoso SBA-15c mediante el proceso Sol-Gel con un surfactante neutro como agente director de la meso-estructura, el Pluronic P123.

Los resultados de DRX, Micro Raman y FTIR, indicaron la presencia de las nanopartículas de los óxidos e hidróxidos de calcio y de magnesio en la SBA-15c.

Los resultados de SBET (distribución del diámetro de poro) indicaron que las nanopartículas de óxido de magnesio se encuentran dispersas en la superficie interna de los poros de la SBA-15c.

Los resultados de DRX, indicaron una alta dispersión de los hidróxidos y óxidos de magnesio en la SBA-15c, generando una mayor densidad de sitios activos para la adsorción de CO₂ y por lo tanto un mayor consumo de CO₂.

Entre mayor sea el porcentaje de impregnación de los óxidos de calcio y magnesio, mayor consumo de CO₂ se obtendrá.

De acuerdo con los estudios realizados se puede ver que el material que se encuentra soportado en la sílice mesoporosa del tipo SBA-15c con mayor adsorción de CO₂ es el magnesio, y el cual va en aumento mientras mayor sea la proporción de la impregnación, para el 15 % de MgO, 4.5 mmol/g y 4.1 mmol/g para 15 % de Mg(OH)₂.

Declaración de interés en competencia

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en competencia ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo informado en este documento.

REFERENCIAS

- Abdullah, M. Z., Bassam, A. T., Adeyemi, A., de Azevedo, A. R. G., Mohamed, A., Hadzima-Nyarko, M., Saad-Agwa, I. (2022). Review on effect of steam curing on behavior of concrete. *Cleaner Materials*, 3, 100042. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100042>
- Adamson, A. (1996). Physical adsorption of vapors: Three personae. *Colloids and Surfaces a: Physicochemical and Engineering Aspects*, 118(3), 193-201. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(96\)03684-9](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(96)03684-9)
- Beck, A., & Horvarth, A., Stefler, G., Katona, R., Geszti, O., Tolnai, Gy., Liotta, L. F., Guczi, L. (2008). Formation and structure of Au/TiO₂ and Au/CeO₂ nanostructures in mesoporous SBA-15. *Catalysis Today*, 139(3), 180-187. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2008.05.039>
- Beruto, D. T., & Botter, R. (2000). Liquid-like H₂O adsorption layers to catalyze the Ca(OH)₂/CO₂ solid-gas reaction and to form a nonprotective solid product layer at 20°C. *Journal of the European Ceramic Society*, 20(4), 497-503. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(99\)00185-5](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(99)00185-5)

- Chacón-Carrera, E. J. (2019). *Sistema de gestión ambiental aplicando norma ISO 14001/2015 para disminuir la contaminación de residuos de construcción en Huacrachuco-Huánuco.* (Tesis de Licenciatura). Universidad de San Pedro, Perú.
- Chang, R., Kim, S., Lee, S., Choi, S., Kim, M., & Park, Y. (2017b). Calcium carbonate precipitation for CO₂ storage and utilization: A review of the carbonate crystallization and polymorphism. *Frontiers in Energy Research*, 5(17). <http://dx.doi.org/10.3389/fenrg.2017.00017>
- Cuellar-Bermudez, S. P., García, S., Rittmann, B., & Parra, R. (2015). Photosynthetic bioenergy from CO₂: an approach to flue gas harvesting for third-generation biofuels. *Journal of Cleaner Production*, 98, 53-65. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.034>
- Feliczak-Guzik, A., Jadach, B., Piotrowska, H., Murias, M., Lulek, J., Nowak, I. (2016). Synthesis and characterization of SBA-16 mesoporous materials containing amine groups. *Microporous and Mesoporous Materials*, 220(15), 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.09.006>
- Gislason, S., Broecker, W. S., Gunnlaugsson, E., Snæbjörnsdóttir, S., Mesfin, K. G., Alfredsson, H. A., Aradottir, E. S., Sigfusson, B., Gunnarsson, I., Stute, M., Matter, J. M., Arnarson, M. Th., Galeczka, I. M., Gudbrandsson, S., Stockman, G., Wolff-Boenisch, D., Stefansson, A., Ragnheiðardóttir, E., Flaathen, T., Gysi, A.P., Olssen, J., Didriksen, K., Stipp, S., Menez, B., & Oelkers, E. H. (2014). Rapid solubility and mineral storage of CO₂ in basalt. *Energy Procedia*, 63, 4561-4574. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.489>
- Hernández, C., Hernández, L., Coy, A., Duarte, N., Peña, D., & Viejo, F. (2013) Síntesis, caracterización y evaluación de recubrimientos híbridos porosos sol-gel dopados con acetato de cerio sobre la aleación de magnesio WE54-AE. *Iteckne*, 10(2). <https://doi.org/10.15332/iteckne.v10i2.403>
- López, J. C., Quijano, G., Souza, T. S., Estrada J., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2013). Biotechnologies for the reduction of greenhouse gases (CH₄, N₂O and CO₂): state of the art and challenges. *Appl Microbiol Biotechnol*, 97(6), 2277-303. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-4734-z>
- Maring, B., & Webley, P. (2013). A new simplified pressure/vacuum oscillation adsorption model for rapid adsorbent detection for CO₂ Capture Applications. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 15, 16-31. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2013.01.009>
- Montes-Hernández, G., Chiriac, R., Toche, F., & Renard, F. (2012). Gas-solid carbonation of Ca(OH)₂ and CaO particles under non-isothermal and isothermal conditions by using a thermogravimetric analyzer: Implications for CO₂ capture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 11, 172-180. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2012.08.009>
- Reddy, K. J., John, S., Weber, H., Argyle, M. D., Bhattachryya, P., Taylor, D. T., Christensen, M., Foulke, T., & Fahlsing, P. (2011). Simultaneous capture and mineralization of coal combustion flue gas carbon dioxide (CO₂). *Energy Procedia*, 4, 1574-1583. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.027>
- Shan, Y., Guan, D., Zheng, H., Ou, J., Li, Y., Meng, J., Mi, Z., Liu, Z & Zhang, Q. (2018). China's CO₂ Emissions Accounts 1997-2015. *Sci Data*, 5(170201). <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.201>
- Stucky, G. D., Huo, Q., Firouzi, A., Chmelka, B., Schacht, S., Voigt, I. G., Schüth, F. (1994). Directed Synthesis of organic/inorganic composite structures. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 105, 3-28. [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(97\)80534-4](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(97)80534-4)
- Styring P., & North, M. (2015). Perspectives and visions on CO₂ capture and utilization. *Faraday Discussions*, 183, 489-502. <https://doi.org/10.1039/C5FD90077H>
- Tanev, P. T., & Pinnavaia, T. J. (1995). A neutral templating route to mesoporous molecular sieves. *Science*, 267(5199), 865-867. <https://doi.org/10.1126/science.267.5199.865>
- Vance, K., Falzone, G., Pignatelli, I., Bauchy, M., Balonis, M., & Sant, G. (2015). Direct carbonation of Ca(OH)2 using liquid and supercritical CO₂; Implications for carbon-neutral cementation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 54(36), 8908-8918. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b02356>
- Zarazua-Aguilar, Y., Paredes-Carrera, S. P., Sánchez-Ochoa, J. C., Avendaño-Gómez, J. R., & Flores-Valle, S. O. (2017). Influence of microwave/ultrasound irradiation on the sol-gel synthesis of titanium dioxide nanoparticles for application in photocatalysis. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(3), 899-909.
- Zhao, D. Y., Huo, Q. S., Feng, J., Bradley, F., & Stucky, G. (1998). Nonionic triblock and star diblock copolymer and oligomeric surfactant syntheses of highly ordered, hydrothermally stable, mesoporous silica structures. *Journal of the American Chemical Society*, 120(24), 6024-6036. <https://doi.org/10.1021/ja974025i>

BIBLIOGRAFÍA SUGERIDA

- Adger, W. N., Barnett, J., Brown, K., Marshall, N., & O'Brien, K. (2013). Cultural dimensions of climate change impacts and adaptation. *Nat. Clim. Change*, 3, 112-117. <https://doi.org/10.1038/nclimate1666>
- Ashraf, W., & Olek, J. (2016). Carbonation behavior of hydraulic and non-hydraulic calcium silicates: Potential of utilizing low-lime calcium silicates in cement-based materials. *Journal of Materials Science*, 51(13), 6173-6191.
- Biernacki, J. J., Bullard, J. W., Sant, G., Brown, K., Glasser, F. P., Jones, S., Ley, T., Livingston, R., Nicoleau, L., Olek, J. et al. (2017). Cements in the 21st century: Challenges, perspectives, and opportunities. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(7), 2746-2773.
- Bouquet, E., Leyssens, G., Schonnenbeck, C., & Gilot, P. (2009). The decrease of carbonation efficiency of CaO along calcination-carbonation cycles: Experiments and modelling. *Chemical Engineering Science*, 64(9):2136-2146.

- Boyjoo, Y., Wang, M., Pareek, V., Liu, J., & Jaroniec, M. (2016). Synthesis and applications of porous non-silica metal oxide submicrospheres. *Chemical Society Reviews*, 21. <https://doi.org/10.1039/C6CS00060F>
- Brady, P. V., Krumhansl, J. L., & Papenguth, H. W. (1996). Surface complexation clues to dolomite growth. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(4), 727-731.
- Brett, P. S., & Komar-Kawatra, S. (2013). Opportunities and challenges in carbon dioxide capture. *Journal of CO₂ Utilization*, 19, 69-87.
- Bruhn, T., Naims, H., & Olfe-Kräutlein, B. (2016). Separating the debate on CO₂ utilization from carbon capture and storage. *Environ. Sci. Policy*. 60(Suppl. C), 38-43. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.03.001>
- Brunauer, S., Emmett, P. H., & Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *J Am Chem Soc*. 60, 309-319.
- Bukowski, J. M., & Berger, R. L. (1979). Reactivity and strength development of CO₂ activated non-hydraulic calcium silicates. *Cement and Concrete Research*, 9(1), 57-68.
- Burkan, I. O., & Razaqpur, A. G. (2004). Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures. *Cement and Concrete Composites*, 26(1), 57-73.
- Caran, D., Hughes, J., Leslie, A., & Kennedy, C. (2012). A short history of the use of lime as a building material beyond Europe and North America. *International Journal of Architectural Heritage*, 6(2), 117-146.
- Chang, R., Choi, D., Kim, M. H., & Park, Y. (2017a). Tuning crystal polymorphisms and structural investigation of precipitated calcium carbonates for CO₂ mineralization. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(2), 1659-1667.
- CO2 Sciences, Inc. (2016). Global roadmap for implementing CO₂ utilization. Recuperado en octubre de 2018 de https://assets.ctfassets.net/xg0gv1arhdr3/27vQZEvrxaQiQEAsGyoSQu/44ee0b72ceb9231ec53ed180cb759614/CO2U_ICEF_Roadmap_FINAL_2016_12_07.pdf
- Colangelo, F., & Cioffi, R. (2013). Use of cement kiln dust, blast furnace slag and marble sludge in the manufacture of sustainable artificial aggregates by means of cold bonding pelletization. *Materials*, 6(8), 3139-3159.
- Cresswell, D. (2007). MIRO Characterization of mineral wastes, resources and processing technologies-integrated waste management for the production of construction material. WRT 177/WR0115.
- Cuellar-Franca, R., & Azapagic, A. (2015). Carbon capture, storage and utilization technologies: A critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts. *Journal of CO₂ Utilization*, 9, 82-102. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.001>
- Cui, H., Tang, W., Liu, W., Dong, Z., & Xing, F. (2015). Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. *Construction and Building Materials*, 93, 522-527.
- Curry, T. E., Reiner, D., Ansolabehere, S., & Herzog, H. (2005). *How Aware is the public of carbon capture and storage?* Cambridge, UK: MIT Press.
- Dindi, A., Quang, D. V., & Abu-Zahra, M. R. M. (2015). Simultaneous carbon dioxide capture and utilization using thermal desalination reject brine. *Applied Energy*, 154, 298-308.
- DOE (U.S. Department of Energy) National Energy Technology Laboratory. (2015). A Review of the CO₂ Pipeline Infrastructure in the U.S. DOE/NETL-2014/1681.
- Duran, C., Vilanova, X., Brezmes, J., Llobet, E., & Correig, X. (2008). Thermal desorption pre-concentrator based system to assess carbon dioxide contamination by benzene. *Sens. Actuat. B Phys*, 131, 85-92. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2007.12.022>
- EPA (U.S. Environmental Protection Agency). (2016). Advancing sustainable materials management: 2016 Recycling Economic Information (REI) Report. Recuperado en octubre de 2018 de <https://www.epa.gov/smm/recycling-economic-information-rei-report>
- Essaki, K., Kato, M., & Uemoto, H. (2005). Influence of temperature and CO₂ concentration on the CO₂ absorption properties of lithium silicate pellets. *J. Mater. Sci.*, 21, 5017-5019.
- Fernandez, B. M., Simons, S. J. R., Hills, C. D., & Carey, P. J. (2004). A review of accelerated carbonation technology in the treatment of cement-based materials and sequestration of CO₂. *Journal of Hazardous Materials*, 112(3), 193-205. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.04.019>
- Fleischer, M. (1953). *Recent estimates of the abundances of the elements in the earth's crust*. U.S. Geological Survey.
- Gauer, C., & Heschel, W. (2006). Doped lithium orthosilicate for absorption of carbon dioxide. *Journal of Materials Science*, 41, 2405-2409.
- Gehrke, N., Colfen, H., Pinna, N., Antonietti, M., & Nassif, N. (2005). Superstructures of calcium carbonate crystals by oriented attachment. *Crystal Growth & Design*, 5(4), 1317-1319.
- Glasser, F. P., Jauffret, G., Morrison, J., Galvez-Martos, J.-L., Patterson, N., & Imbabí, M. S.-E. (2016). Sequestering CO₂ by mineralization into useful nesquehonite-based products. *Frontiers in Energy Research*, 4. <https://doi.org/10.3389/feNRG.2016.00003>
- Goracci, G., Monasterio, M., Jansson, H., & Cerveny, S. (2017). Dynamics of nano-confined water in Portland cement: Comparison with synthetic C-S-H gel and other silicate materials. *Scientific Reports*, 7(1), 8258. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00436-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00436-X)
- Huijts, N. M., Midden, C. J., & Meijnders, A. L. (2007). Social acceptance of carbon dioxide storage. *Energy Policy*, 35, 2780-2789. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.12.007>
- Huntzinger, D. N., Gierke, J. S., Kawatra, S. K., Eisele, T. C., & Sutter, L. L. (2009). Carbon dioxide sequestration in cement kiln dust through mineral carbonation. *Environ. Sci. Technol.*, 43, 1986-1992.
- Jones, C. R., Radford, R. L., Armstrong, K., & Styring, P. (2014). What a waste! assessing public perceptions of carbon dioxide

- utilization technology. *J. CO₂ Util.*, 7, 51-54. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.05.001>
- Kelemen, P. B., & Matter, J. (2008). In situ carbonation of peridotite for CO₂ storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(45), 17295-17300. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805794105>
- Lanas, J., & Alvarez, J. I. (2004). Dolomitic limes: evolution of slaking process under different conditions. *Thermochimica Acta*, 423, 1-12.
- Leeuw, N. H., & Parker, S. C. (1998). Surface structure and morphology of calcium carbonate polymorphs calcite, aragonite, and vaterite: An atomistic approach. *Journal of Physical Chemistry*, B 102(16), 2914-2922.
- Liu, M., & Gadikota, G. (2018). Integrated CO₂ capture, conversion, and storage to produce calcium carbonate using an amine looping strategy. *Energy & Fuels*, <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b02803>.
- Macario, A., Katovic, A., Giordano, G., Iucolano, F., & Caputo, D. (2005). Synthesis of mesoporous materials for carbon dioxide sequestration. *Microporous and Mesoporous Materials*, 81(1-3), 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2005.02.002>
- Mignardi, S., De Vito, C., Ferrini, V., & Martin, R. F. (2011). The efficiency of CO₂ sequestration via carbonate mineralization with simulated wastewaters of high salinity. *Journal of Hazardous Materials*, 191(1), 49-55.
- Monkman, S., & Shao, Y. (2006). Assessing the carbonation behavior of cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(6), 768-776. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:6\(768\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:6(768))
- Montes-Hernández, G., Pérez-López, R., Renard, F., Nieto, J. M., & Charlet, L. (2009). Mineral sequestration of CO₂ by aqueous carbonation of coal combustion fly-ash. *Journal of Hazardous Materials*, 161(2), 1347-1354.
- Morse, J. W., & Mackenzie, F. T. (1990). *Geochemistry of Sedimentary Carbonates*. Amsterdam: Elsevier.
- Nikulshina, V., Galvez, M. E., & Steinfeld, A. (2007). Kinetic analysis of the carbonation reactions for the capture of CO₂ from air via the Ca(OH)₂-CaCO₃-CaO solar thermochemical cycle. *Chemical Engineering Journal*, 129(1), 75-83.
- Oelkers, E. H., Gislason, S. R., & Matter, J. (2008). Mineral carbonation of CO₂. *Elements*, 4(5), 333-337. <https://doi.org/10.2113/gselements.4.5.333>
- Offermann-Van, H. J., Arning, K., Linzenich, A., & Ziefle, M. (2018). Human-computer interaction center, RWTH Aachen University, Aachen, Germany. Trust and distrust in carbon capture and utilization industry as relevant factors for the acceptance of carbon-based products.
- Pokrovsky, O. S. (1998). Precipitation of calcium and magnesium carbonates from homogeneous supersaturated solutions. *Journal of Crystal Growth*, 186(1), 233-239.
- Portland Cement Association. (2013). U.S. Portland Cement Industry: Plant Information Summary. Skokie, IL: Portland Cement Association.
- Possan, E., Thomaz, W. A., Aleandri, G. A., Felix, E. F., & Dos Santos, A. C. P. (2017). CO₂ uptake potential due to concrete carbonation: A case study. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 147-161.
- Prigobbe, V., Polettini, A., & Baciocchi, R. (2009). Gas-solid carbonation kinetics of air pollution control residues for CO₂ storage. *Chem. Eng. J.*, 148, 270-278.
- Purnell, P., Seneviratne, A. M. G., Short, N. R., & Page, C. L. (2003). Super-critical carbonation of glass-fibre reinforced cement. Part 2: Microstructural observation. *Composites: Part A*, 34, 1105-1112.
- Regnault, O., Lagneau, V., & Schneider, H. (2009). Experimental measurement of portlandite carbonation kinetics with supercritical CO₂. *Chem. Geol.*, 265, 113-121.
- Ricci, M., Trewby, W., Cafolla, C., & Voitchovsky, K. (2017). Direct observation of the dynamics of single metal ions at the interface with solids in aqueous solutions. *Scientific Reports*, 7, 43234.
- Sanna, A., Uibu, M., Caramanna, G., Kuusik, R., & Maroto-Valer, M. (2014). A review of mineral carbonation technologies to sequester CO₂. *Chemical Society Reviews*, 43(23):8049-8080.
- Shackley, S., McLachlan, C., & Gough, C. (2005). The public perception of carbon dioxide capture and storage in the UK: results from focus groups and a survey. *Clim. Policy*, 4, 377-398. <https://doi.org/10.1080/14693062.2004.9685532>
- Styring, P., & Jansen, D. (2021). *Carbon capture and utilisation in the green economy*. The Centre for Low Carbon Futures 2011.
- Sun, J., Bertos, M. F., & Simons, S. J. (2008). Kinetic study of accelerated carbonation of municipal solid waste incinerator air pollution control residues for sequestration of flue gas CO₂. *Energy & Environmental Science*, 1(3):370-377.
- Taylor, H. F. W., & Telford, T. (1997). *Cement Chemistry*. London: Thomas Telford.
- Terwel, B. W., Harinck, F., Ellemers, N., & Daamen, D. D. (2009). Competence based and integrity based trust as predictors of acceptance of carbon dioxide capture and storage (CCS). *Risk Anal.*, 29, 1129-1140. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2009.01256.x>
- USGS (U.S. Geological Survey). (2017). Mineral commodity summaries 2017: U. S. Geological Survey, 202 p. <https://doi.org/10.3133/70180197>
- USGS. (2018). Mineral commodity summaries 2018. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 200 p. <https://doi.org/10.3133/70194932>
- Von der Assen, N., & Bardow, A. (2014). Life cycle assessment of polyols for polyurethane production using CO₂ as feedstock: insights from an industrial case study. *Green Chem.*, 16, 3272-3280. <https://doi.org/10.1039/C4GC00513A>
- Wang, C., Jia, L., Tan, Y., & Anthony, E. J. (2008). Carbonation of fly ash in oxy-fuel CFB combustion. *Fuel*, 87(7), 1108-1114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2007.06.024>
- Wei, Z., Wang, B., Falzone, G., La Plante, E. C., Okoronkwo, M. U., She, Z., Oey, T., Balonis, M., Neithalath, N., & Pilon, L., et al.

- (2018). Clinkering-free cementation by fly ash carbonation. *Journal of CO₂ Utilization*, 23:117-127.
- Young, J. F., Berger, R. L., & Breese, J. (1974). Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂. *Journal of the American Ceramic Society*, 57(9):394-397.

Cómo citar:

González-Nava, M. I., & Nava-Mendoza, R. (2024). Captura y transformación de CO₂ utilizando como adsorbentes nanopartículas de calcio y magnesio soportados en SBA-15c. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 25 (04), 1-13. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2024.25.4.025>