

Adsorción de CO₂ en faujasita: influencia de la relación Si/Al CO₂ adsorption on faujasite: influence of the Si/Al ratio

F. Legorreta-García^a, J. J. Gutiérrez-Escalante^{b,*}, M. A. Díaz-Santana^a, L. E. Trujillo-Villanueva^a,
D. Díaz-Guzmán^a

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Área Académica de Química, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

Se evaluó el efecto de la relación sílice-alúmina (Si/Al) en la síntesis de zeolita tipo faujasita, empleando jales mineros provenientes de la extracción de oro y plata en Hidalgo, México, como precursor de silicatos. La metodología incluyó lixiviación, reacción alcalina y tratamiento hidrotermal, incorporando Al(OH)₃ reciclado para evaluar su impacto en la cristalinidad y el potencial de adsorción de CO₂ en condiciones ambientales. El material fue caracterizado mediante DRX, MEB-EDS y capacidad de intercambio catiónico (CIC). La adsorción de CO₂ y la estabilidad térmica del material se determinaron mediante TGA y DSC, respectivamente.

Los resultados obtenidos evidenciaron la formación de faujasita con alta pureza estructural. La relación Si/Al mostró una influencia crítica en la morfología, cristalinidad y consecuentemente, en la capacidad de adsorción de CO₂. Estos hallazgos respaldan la viabilidad del uso de jales mineros como fuente alternativa de sílice, contribuyendo al desarrollo de tecnologías sostenibles para la captura de CO₂ y la gestión de residuos industriales.

Palabras Clave:

Zeolita faujasita, Relación Si/Al, Adsorción de CO₂, Jales mineros, Reciclaje.

Abstract

The effect of the silica-alumina (Si/Al) ratio on the synthesis of faujasite-type zeolite was evaluated using mine tailings from gold and silver extraction in Hidalgo, Mexico, as a silicate precursor. The methodology included leaching, alkaline reaction, and hydrothermal treatment, incorporating recycled Al(OH)₃ to assess its impact on crystallinity and CO₂ adsorption potential under ambient conditions. The material was characterized by XRD, SEM-EDS, and cation exchange capacity (CEC). CO₂ adsorption and thermal stability of the material were determined by TGA and DSC, respectively.

The results obtained showed the formation of faujasite with high structural purity. The Si/Al ratio showed a critical influence on morphology, crystallinity, and consequently, on CO₂ adsorption capacity. These findings support the viability of using mine tailings as an alternative source of silica, contributing to the development of sustainable technologies for CO₂ capture and industrial waste management.

Keywords:

Zeolite faujasite, Si/Al ratio, CO₂ adsorption, Mining tailings, Recycling.

1. Introducción

El calentamiento global constituye una de las principales amenazas ambientales, con impactos evidentes en la pérdida de biodiversidad, el deterioro de los ecosistemas y la intensificación de fenómenos climáticos extremos. En México, estas consecuencias son perceptibles: de acuerdo con Estrada (2025), director del Programa de Investigación sobre Cambio Climático de la UNAM, la temperatura promedio nacional se ha incrementado 1.8 °C desde la era preindustrial hasta 2024, ocasionando olas de calor extremas de entre 35 °C y 45 °C en 21 estados de la República.

El aumento en la temperatura a nivel global se relaciona con la actividad industrial y la falta de políticas regulatorias eficaces

sobre la generación de residuos con alto impacto ambiental, como es el caso de los gases de efecto invernadero (GEI): dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozono (O₃) y gases fluorados (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2025). En 2021, México generó alrededor de 714 millones de toneladas de CO₂, lo que representó aproximadamente el 1.4% de las emisiones globales de GEI (López *et al.*, 2024), donde las principales fuentes de emisión corresponden al sector energético, la industria manufacturera y el transporte terrestre. Este aumento en las concentraciones de GEI en la superficie terrestre, en concreto de CO₂, ha reflejado un impacto significativo a la salud humana.

En este contexto, el desarrollo y aplicación de técnicas de captura y retención de este contaminante adquiere una

*Autor para la correspondencia: gu471707@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: profe_974@uaeh.edu.mx (Felipe Legorreta-García), gu471707@uaeh.edu.mx (José Julián Gutiérrez-Escalante), di444720@uaeh.edu.mx (Marco Antonio Díaz-Santana), lalink@live.com.mx (Luis Eduardo Trujillo-Villanueva), damian_diaz@uaeh.edu.mx (Damián Díaz-Guzmán).

importancia creciente en cuanto al desarrollo de técnicas innovadoras y eficientes. Por ejemplo, Jiayin Yuan *et al.*, (2017) presentaron la síntesis de carbonos micro/mesoporos dopados con nitrógeno derivados de poli(líquidos iónicos) para la captura de CO₂ y oxidación de alcoholes, sus resultados mostraron una alta adsorción de CO₂ de hasta 6.2 mmol CO₂/g, con alta reversibilidad y selectividad; por otra parte, Bu Wang *et al.*, (2025) presentaron una innovadora mezcla natural de aminoácidos para retención de CO₂, sus resultados mostraron una adsorción del contaminante de 3.65 mmol CO₂/g, siendo significativamente mejor que la de algunas aminas convencionales, con mejor estabilidad térmica y un enfoque altamente natural.

Si bien estas técnicas presentan una alta eficiencia en la adsorción de CO₂, su metodología de obtención, costos y limitaciones en la estabilidad a largo plazo hacen que su uso sea limitado. En contraste, el uso de materiales zeolíticos ha emergido como una opción atractiva debido a su bajo costo de obtención, amplia disponibilidad, estabilidad estructural y capacidad de adsorción de gases. En este contexto, Paolo P. Pescarmona *et al.*, (2023) implementaron la síntesis de perlas tipo faujasita para la adsorción selectiva de CO₂ con aplicación en la mejora del biogás, con resultados altamente favorables, logrando una capacidad de retención de 4.3 mmol CO₂/g. Del mismo modo Saeed Soltanali *et al.*, (2023) lograron mejorar la capacidad de fijación de CO₂ en zeolitas tipo FAU, mediante la técnica de incorporación de metales (Cu²⁺ y Fe³⁺) en la síntesis, los resultados mostraron una capacidad de retención del 4.9 mmol/g. Estos análisis validan el uso de materiales zeolíticos como buenos adsorbentes de contaminantes tipo GEI, lo que abre pauta para la validación de nuevos materiales con características y resultados de retención similares.

En este trabajo se presenta la síntesis de un material zeolítico tipo faujasita a partir de jales mineros de Pachuca de Soto, Hidalgo, México, como una estrategia de doble remediación ambiental. La metodología sigue un proceso tradicional de síntesis alcalina-hidrotermal, con la particularidad de ajustar la relación Si/Al mediante la adición de Al(OH)₃. El objetivo de este trabajo es evaluar el impacto de la relación Si/Al en la cristalinidad, pureza y capacidad de intercambio catiónico de la zeolita FAU obtenida, con énfasis en su capacidad de adsorción de CO₂ bajo condiciones normales de presión y temperatura aportando así un material de alto valor agregado y de bajo costo para la mitigación de GEI.

2. Metodología

2.1 Obtención de la muestra

Los jales fueron obtenidos de la Presa Sur II, ubicada en Pachuca de Soto, Hidalgo, en las coordenadas 20.074559,98.762338 (Google, 2025). Gutiérrez Escalante y colaboradores describieron la metodología de muestreo, así como la delimitación de las muestras, separación de fracciones finas y lixiviación de los jales mineros provenientes de la extracción de oro y plata.

2.2 Materiales y reactivos

Todos los reactivos empleados en este estudio son de calidad analítica y se utilizaron directamente, sin someterse a procesos de purificación adicionales. Entre ellos se incluyen: NaOH, HCl, NH₄OH, Negro de Eriocromo T marca Reactivos Química Meyer;

NH₄Cl, MgSO₄*7H₂O, Ba(CH₃COO)₂ marca PQM Fermont; Ácido etilendiaminotetraacético, sal disódica dihidratada (EDTA) marca MERCK; gas de CO₂ (No. CAS: 124-38-9) proveniente de un cilindro de gas de línea industrial marca INFRA.

2.3 Preparación de Al(OH)₃

El Al(OH)₃ utilizado durante la síntesis fue obtenido a partir de aluminio reciclado proveniente de latas de bebidas, siguiendo la metodología reportada por Ibarra Cruz *et al.*, (2024). Inicialmente, las latas fueron lavadas y lijadas para eliminar impurezas superficiales, y posteriormente trituradas hasta obtener partículas menores a 1.2 mm. Estas fueron sometidas a una reacción alcalina con NaOH 2.5 M bajo agitación constante durante 24 h. La disolución resultante se filtró, obteniéndose un precipitado de color marrón y un sobrenadante traslúcido. Este último se neutralizó con HCl 3.0 M hasta pH cercano a 7.0, observándose la formación de un precipitado blanco correspondiente a Al(OH)₃. Finalmente, el sólido se lavó con agua destilada hasta alcanzar una conductividad nula en el filtrado, para después secarla en una estufa a 90 °C durante 24 h.

2.4 Reacción alcalina

En un crisol, se pesaron y mezclaron 2.0 g de NaOH y 5.0 mL de agua destilada con 1.0 g de jales lixiviados hasta obtener una mezcla homogénea. Posteriormente, se prepararon cuatro sistemas independientes con la misma relación base, pero con la adición de cantidades crecientes de Al(OH)₃, con el fin de analizar la influencia del contenido de este en la síntesis de la zeolita tipo faujasita. Cada sistema fue preparado por duplicado, resultando un total de ocho mezclas experimentales. Las proporciones químicas correspondientes se presentan en la **Tabla 1**.

Los crisoles fueron sometidos a un tratamiento térmico en un horno a 300 °C durante 1 h, con el objetivo de promover la activación y reordenamiento de la materia prima, ya que bajo estas condiciones favorecemos la formación de una estructura amorfa que permita en pasos posteriores su transformación a un material zeolítico. Una vez finalizado el tratamiento, los sólidos se sometieron a un proceso de envejecimiento por 24 h en agua destilada, con el fin de facilitar la disponibilidad de los átomos de silicio para la etapa de recristalización en la reacción hidrotermal.

Tabla 1. Condiciones experimentales y proporciones de Al(OH)₃ en la reacción alcalina para la síntesis de FAU.

Muestra	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Al(OH) ₃ (g)
1	1	300	0.000
2	1	300	0.000
3	1	300	0.250
4	1	300	0.250
5	1	300	0.375
6	1	300	0.375
7	1	300	0.500
8	1	300	0.500

2.5 Reacción hidrotermal

En el interior de los reactores hidrotermales se colocó el producto obtenido de la fusión alcalina, junto con 20.0 mL de agua destilada. A continuación, la reacción hidrotermal se llevó a cabo durante 10 h a 100 °C.

Finalizado el tiempo de reacción y con el objetivo de frenar la actividad térmica, los reactores se enfriaron mediante inmersión en un baño de hielo. El material obtenido se filtró y lavó con agua destilada sobre el papel filtro, hasta alcanzar un pH 7.0 en el remanente.

Finalmente, los sólidos obtenidos se secaron en horno durante 12 h a 70 °C y posteriormente fueron pesados. Los resultados del rendimiento se resumen en la **Tabla 2**, se observó un incremento progresivo en el peso de los materiales conforme aumenta la adición de $\text{Al}(\text{OH})_3$ en la síntesis. Este comportamiento sugiere que la incorporación de Al^{3+} favorece la nucleación y el crecimiento de la fase zeolítica, lo que podría estar asociado a un mayor rendimiento global del proceso.

Tabla 2. Condiciones de reacción hidrotermal y masa final del producto sólido obtenido.

Muestra	Tiempo (h)	Temperatura (°C)	Gramos finales
1	10	100	0.6193
2	10	100	0.5869
3	10	100	0.7830
4	10	100	0.7429
5	10	100	1.0427
6	10	100	0.9685
7	10	100	1.2287
8	10	100	1.1263

2.6 Evaluación de la adsorción de CO_2

La capacidad de adsorción de CO_2 de las zeolitas sintetizadas se evaluó bajo flujo continuo del gas. Para ello, se pesaron 0.20 g de cada muestra con diferente relación Si/Al y se colocaron sobre el papel filtro de poro fino, asegurando una adecuada distribución del material.

Cada muestra fue introducida en un sistema diseñado para permitir el paso de un flujo continuo de CO_2 (No. CAS: 124-38-9) proveniente de un cilindro de gas de línea industrial, con un caudal constante de 17.5 L min^{-1} durante 30 min. Este proceso se realizó a condiciones ambientales, garantizando la exposición uniforme del material al gas, lo anterior con el objetivo de simular escenarios cercanos a los sistemas de emisión industrial.

Finalizado el tiempo de adsorción, las muestras fueron retiradas del sistema y evaluadas mediante análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC), con el fin de cuantificar la pérdida de masa asociada a la desorción térmica del CO_2 retenido en la estructura porosa. La cantidad adsorbida del gas se determinó por diferencia de masa. Además, se evaluó la estabilidad térmica del material sintetizado, correlacionando los resultados en función del contenido de aluminio y su influencia sobre la captación de CO_2 .

3. Caracterización fisicoquímica de los materiales sintetizados

3.1 Difracción de Rayos X (DRX)

Con el propósito de examinar las fases cristalinas después de los tratamientos alcalinos e hidrotermales y así evaluar la influencia de la adición de iones aluminio en la síntesis de la zeolita, se empleó un difractómetro de rayos X, marca Malvern Analytical Empyrean Series 3.

El equipo operó con un tubo de rayos X de cobre (Cu LFF HR), $\text{K-}\alpha$ 1.5405 Å, bajo tensión de 40 kV y corriente de 35 mA, acoplado a un detector PIXcel 3D Medipix3 (256×256 píxeles, tamaño de píxel de 55 μm). El sistema empleó ópticas multiCore BBHD Soller slits 0.03 rad, máscara de 14 mm y se adaptó una cuchilla de haz para detectores lineales, dCore Soller slits 0.04 rad; las muestras fueron analizadas con un tiempo de exposición de 15 min cada una. Los difractogramas obtenidos se procesaron mediante el software *Match!* versión 3.0, empleando la base de datos PDF-2 Release 2004.

3.2 Microscopía Electrónica de Barrido acoplada a Espectroscopía de Energía Dispersiva (MEB-EDS)

El análisis del tamaño, morfología y la composición química del material sintetizado se llevó a cabo usando un microscopio electrónico de barrido (MEB-EDS) JEOL, modelo JSM-IT300. Las micrografías se obtuvieron con electrones secundarios, aplicando un voltaje de aceleración de 20 kV y una corriente de haz de 25 pA, con distancias de trabajo entre 14.7 y 14.9 mm, capturando vistas en distintos niveles de aumento ($\times 5\,000$, $\times 10\,000$, $\times 15\,000$, $\times 20\,000$).

En cuanto a la preparación de las muestras, los polvos resultantes de la síntesis se fijaron sobre un portamuestras con cinta de carbono conductiva. Posteriormente, se sometieron a un pretratamiento de alto vacío y se recubrieron con una fina película de oro ionizado, con el fin de mejorar la conductividad eléctrica de la superficie y obtener imágenes de mayor calidad.

3.3 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

La CIC se determinó por *intercambio compulsivo* $\text{Ba}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ por medio de una valoración complejométrica de Mg^{2+} con EDTA, siguiendo el método $\text{Ba}(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{-MgSO}_4$ que inicialmente fue diseñada para suelos, pero ahora con adaptaciones para zeolitas, y tomando como referencia guías estandarizadas para CIC en materiales aluminosilicatos (Ketterings *et al.*, 2014; Gillespie *et al.*, 2000). Este análisis proporciona un indicador indirecto de la influencia de los iones aluminio en el marco estructural, permitiendo identificar las condiciones de síntesis más favorables para obtener un material con mayor capacidad de retención de CO_2 .

El procedimiento experimental se llevó a cabo de acuerdo con lo comunicado por Gutierrez Escalante. Expresando la CIC en unidades de meq/100 g de material.

3.4 Análisis de TGA/DSC para el contenido de CO_2

El estudio de desorción térmica del CO_2 adsorbido en el material zeolítico se realizó mediante análisis termogravimétrico (TGA) utilizando un Analizador Térmico Simultáneo (STA 8000, Perkin Elmer), con una precisión de $\pm 0.1 \mu\text{g}$. Las muestras previamente expuestas al flujo continuo de CO_2 fueron colocadas en crisoles y sometidas a un programa de calentamiento controlado desde 30 hasta 900 °C, con una tasa de calentamiento de $10 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ bajo una atmósfera inerte de nitrógeno (N_2 , 99.999%).

Esta rampa de calentamiento permitió evaluar el proceso de desorción térmica del CO_2 retenido en la estructura zeolítica, con el fin de identificar los mecanismos de fisisorción y quimisorción involucrados. De acuerdo con estudios previos (Yalou *et al.*,

2018), la liberación del gas adsorbido ocurre en dos etapas térmicas: la primera asociada a la desorción física de CO₂ débilmente retenido en los poros, y la segunda a la ruptura de interacciones químicas más fuertes dentro de la red FAU.

El rango térmico hasta 900 °C se seleccionó con el propósito de determinar el punto de colapso estructural de la zeolita, lo cual permite comparar los resultados de síntesis en función de la relación Si/Al. Adicionalmente, los termogramas de DSC registraron los eventos endotérmicos y exotérmicos asociados tanto a la desorción del CO₂ como al inicio de la desintegración térmica del material, aportando información complementaria sobre la estabilidad estructural y energética de las muestras (Dos Santos de Castro *et al.*, 2019).

4. Resultados y discusión

4.1 Estudio cristalográfico de la muestra de partida y del material zeolítico

En la **Figura 2** se presentan los difractogramas obtenidos para las muestras sintetizadas con diferentes concentraciones de aluminio. El análisis de difracción de rayos X (DRX) permitió identificar la presencia de fases correspondientes a la zeolita faujasita tipo X, cuya formación y fase cristalina depende estrechamente de la relación Si/Al en el medio de síntesis. Esta relación determina la proporción de tetraedros [AlO₄]⁵⁻ y [SiO₄]⁴⁻ en la red, modificando la simetría estructural y el tamaño de la celda unitaria, de acuerdo con lo reportado por García Martínez y Pérez Pariente (2003).

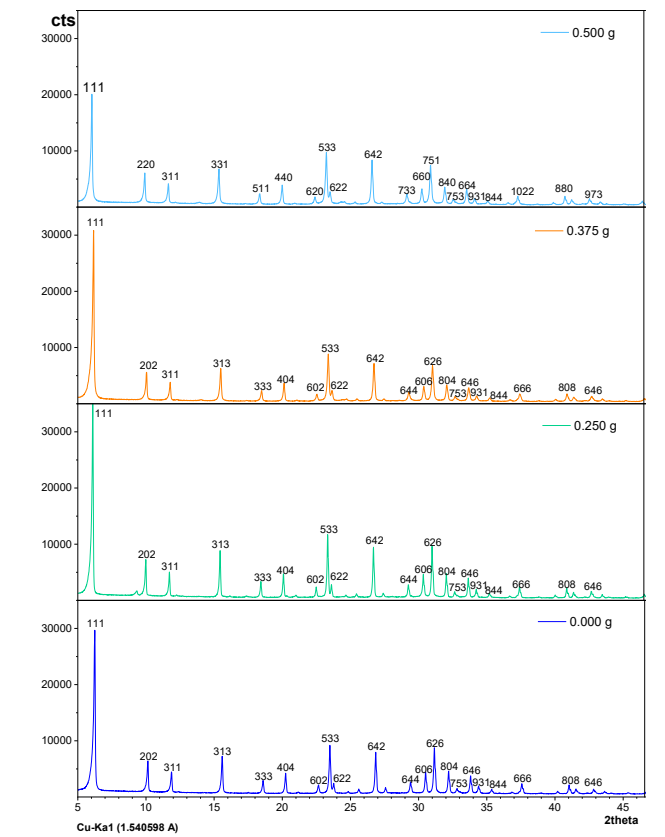


Figura 2. Difractogramas de DRX de las muestras con distinta concentración de Al³⁺, mostrando la evolución de la fase FAU-X.

Tabla 3. Fases cristalinas identificadas en las muestras sintetizadas con distintas concentraciones de Al³⁺.

Contenido de Al ³⁺ (g)	Conteos máximos	Fase	Entrada PDF
0.5000	20.099	Zeolita X	01-072-2422
0.3750	30.842	Faujasita-X	96-150-7215
0.2500	37.022	Faujasita-X	
0.0000	29.685	Faujasita-X	

Como se observa en la **Tabla 3**, las muestras con concentraciones de aluminio de 0.000, 0.250 y 0.375 g de Al³⁺ mostraron una correspondencia clara con la fase faujasita-X (PDF 96-150-7215), mientras que la muestra obtenida con 0.500 g Al³⁺ evidenció la aparición de la fase zeolítica X (PDF 01-072-2422), que estructuralmente equivalente a FAU-X, pero con mayor contenido de cationes Na⁺, este comportamiento es consistente, debido a que un incremento de sitios aniónicos generados por el exceso de aluminio, requieren una mayor compensación de carga mediante cationes alcalinos.

El análisis de los conteos máximos de intensidad correspondientes al pico más intenso (111) (ver **Tabla 3**) muestra un comportamiento no lineal conforme aumenta la concentración de aluminio. Inicialmente, a 0.0 % de Al, la intensidad registrada es de aproximadamente 29.000 unidades, asociada principalmente a la presencia de Faujasita-X.

Posteriormente, al incrementar ligeramente el contenido de aluminio hasta 0.2500 g, la intensidad alcanza un máximo cercano a 37.000 unidades, lo cual puede atribuirse a la coexistencia de dos fases cristalinas en proporciones comparables (Faujasita-X y Zeolita X). A mayores concentraciones de aluminio (0.375 g), la contribución de la Faujasita-X disminuye considerablemente y predomina la formación de Zeolita X, mientras que a 0.5000 g de Al el sistema se encuentra compuesto casi en su totalidad por esta última fase, observándose nuevamente una disminución en la intensidad del pico.

Este comportamiento sugiere que el máximo de intensidad no depende únicamente del aumento de cristalinidad, sino también de la superposición de contribuciones difractométricas provenientes de ambas fases cristalinas. Desde el punto de vista estructural, tanto la Faujasita-X como la Zeolita X cristalizan en el mismo sistema cúbico Fd-3m, por lo que la coexistencia de ambas fases puede generar incrementos aparentes en la intensidad difractada debido a la contribución simultánea de planos cristalográficos equivalentes.

Asimismo, este fenómeno podría estar acompañado de variaciones en el ancho a media altura (FWHM), relacionadas con cambios en el tamaño cristalino o en el orden estructural del material.

4.2 Microscopía Electrónica de Barrido acoplada a Espectroscopia de Energía Dispersiva (MEB-EDS)

En la **Figura 3** se muestran los cristales seleccionados para el análisis mediante MEB-EDS, mientras que la relación Si/Al de cada material se presenta en la **Tabla 4**. Los resultados obtenidos permiten observar la formación de una fase tipo faujasita-X (FAU-X) con morfología predominantemente cúbica y octaédrica irregular, indicativa de una estructura altamente cristalina y definida.

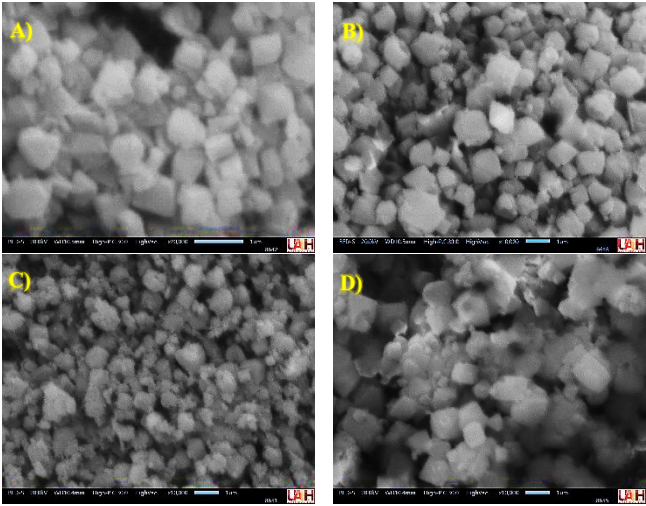


Figura 3. Imágenes MEB de la zeolita tipo faujasita sintetizada. A) Micrografía a $\times 20\,000$ – 0 g Al^{3+} , B) Micrografía a $\times 10\,000$ – 0.25 g Al^{3+} , C) Micrografía a $\times 10\,000$ – 0.375 g Al^{3+} , D) Micrografía a $\times 10\,000$ – 0.5 g Al^{3+} .

Tabla 4. Relación silicio/aluminio de cada zeolita obtenida.

Zeolita tipo FAU	Relación Si/Al
0.5000 g de Al^{3+}	1.2850
0.3750 g de Al^{3+}	1.3381
0.2500 g de Al^{3+}	1.3799
0.0000 g de Al^{3+}	1.4130

La variación en el tamaño de partícula (ver **Tabla 5**) y la relación Si/Al entre las muestras, sugiere que el contenido de aluminio influye directamente en el orden estructural y el grado de cristalinidad de la zeolita. En particular, los valores de Si/Al < 1.5 confirman que las fases formadas corresponden a faujasita tipo X, lo que concuerda con los resultados obtenidos mediante difracción de rayos X (DRX).

Los valores obtenidos muestran que un incremento en el contenido de Al^{3+} durante la síntesis modifica tanto la relación Si/Al como la morfología de los cristales, evidenciando partículas de mayor tamaño y bordes menos definidos a concentraciones más altas de aluminio. Este efecto puede atribuirse al aumento de sitios $[\text{AlO}_4]^{5-}$ en la red, los cuales introducen distorsiones estructurales y reducen el grado de orden cristalino, afectando la orientación y el crecimiento regular de las partículas.

Tabla 5. Tamaño de partícula de cada zeolita sintetizada.

Zeolita tipo FAU	Tamaño de partícula (μm)
0.5000 g de Al^{3+}	1.481 – 1.421
0.3750 g de Al^{3+}	1.072 – 1.428
0.2500 g de Al^{3+}	1.086 – 1.448
0.0000 g de Al^{3+}	0.782 – 0.842

De acuerdo con Sen (2023) y Yeong (2020), la zeolita tipo FAU-X se caracteriza por cristales octaédricos irregulares con superficies limpias y definidas, típicas de una formación controlada y homogénea del marco aluminosilicato. Los resultados obtenidos en este estudio concuerdan con dichas observaciones, aunque muestran que una mayor incorporación de Al^{3+} conduce a estructuras más rugosas, incompletas y pequeñas.

Esto confirma que la razón Si/Al no solo define la composición química, sino que también determina el desarrollo morfológico.

4.3 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

Los resultados del intercambio catiónico para la determinación de la CIC en los materiales zeolíticos sintetizados se presentan en la **Tabla 6** y en la **Figura 4**.

Se observó un comportamiento coherente con el incremento en el contenido de iones Al^{3+} , el cual favorece un aumento en la densidad de cargas negativas en la red estructural, promoviendo un intercambio catiónico más eficiente. Este fenómeno está directamente asociado con el incremento de los sitios $[\text{AlO}_4]^{5-}$ en el marco aluminosilicato, los cuales actúan como centros activos para la retención e intercambio de cationes.

Tabla 6. Capacidad de intercambio catiónico promedio ($\overline{\text{CIC}}$) de las zeolitas sintetizadas con distintas concentraciones de Al^{3+} .

Contenido de Al^{3+} (g)	$\overline{\text{CIC}}$ (meq/100 g)
0.5000	219.50 ± 0.67
0.3750	209.62 ± 0.41
0.2500	197.82 ± 0.52
0.0000	178.06 ± 0.33

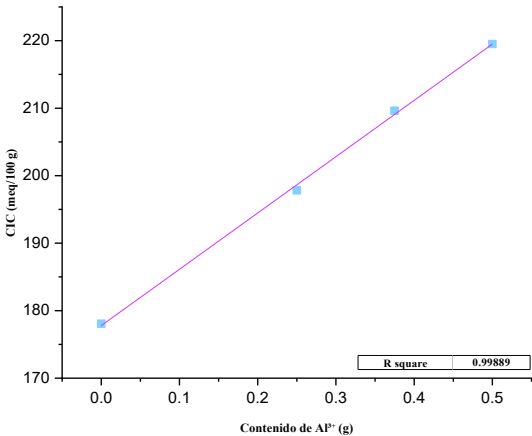


Figura 4. Relación entre contenido de Al^{3+} y capacidad de intercambio catiónico (CIC) en FAU-X.

El análisis del gráfico muestra una tendencia lineal con un coeficiente de correlación de $R^2=0.9989$ en función del aumento de iones Al^{3+} en la red cristalina, lo que confirma que el incremento en la CIC está directamente vinculado al grado de sustitución isomórfica de aluminio en la red cristalina.

Este comportamiento indica que la incorporación de Al^{3+} durante la síntesis favorece la capacidad de intercambio iónico del material, aspecto relevante en procesos de remediación basados en dicho mecanismo. No obstante, como se ha discutido, un mayor contenido de aluminio puede afectar negativamente la cristalinidad y la estructura porosa, lo que resalta la importancia de ajustar la composición del material según la aplicación específica que se busque.

4.4 Evaluación de la capacidad de retención de CO₂ en FAU

Los termogramas obtenidos por TGA y los termogramas calorimétricos de DSC de las cuatro muestras FAU sintetizadas (0; 0.25; 0.375; 0.5 g de Al³⁺) se muestran en la **Figura 5** y sus valores cuantificados se recogen en la **Tabla 7**. La cuantificación del CO₂ adsorbido se realizó por diferencia entre la pérdida de masa de la muestra cargada con CO₂ y la muestra control (sin carga).

Tabla 7. Capacidad de adsorción de CO₂ determinada por TGA.

Muestra (g Al ³⁺)	CO ₂ (mmol×g ⁻¹)	CO ₂ (mg×g ⁻¹)
0.5000	0.03194	1.40564
0.3750	0.45445	19.99980
0.2500	0.47552	20.92716
0.0000	0.04734	2.08339

Los datos revelan que las muestras sintetizadas con 0.250 y 0.375 g de Al³⁺ presentan la mayor capacidad de retención de CO₂ ($\approx 0.45\text{--}0.48\text{ mmol}\times\text{g}^{-1}$; $\approx 20\text{ mg}\times\text{g}^{-1}$), mientras que la muestra sin adición de Al³⁺ y la de mayor adición (0.5 g) presentan captaciones sensiblemente menores.

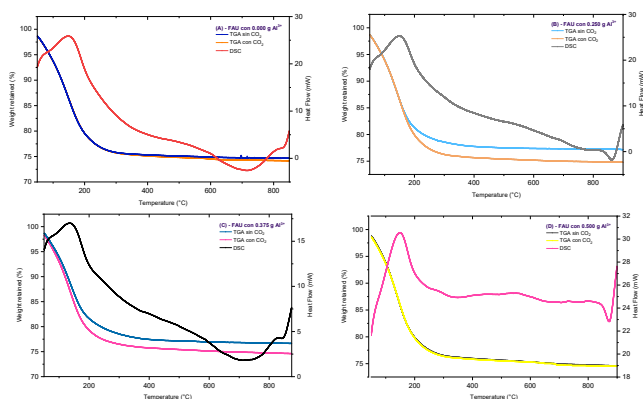


Figura 5. Resultados de TGA del material sintetizado: A) FAU 0 g de Al³⁺, B) FAU 0.250 g de Al³⁺, C) FAU 0.375 g de Al³⁺, D) FAU 0.500 g de Al³⁺.

El análisis combinado TGA–DSC permitió identificar dos regiones térmicas claramente diferenciadas en la desorción del CO₂ (Yalou *et al.*, 2018), la primera región en donde ocurre una desorción de baja temperatura, también conocida como *fisisorción*; en ella se observa una pérdida de masa considerable por debajo de 200–220 °C, acompañada de señales endotérmicas leves en DSC. Esta etapa corresponde a CO₂ débilmente retenido por fuerzas de Van der Waals en la superficie y en los poros accesibles de la FAU. El esquema de la **Figura 6** (proceso de *fisisorción*) ilustra cómo las moléculas quedan alojadas en cavidades y canales sin enlace químico directo a la red.

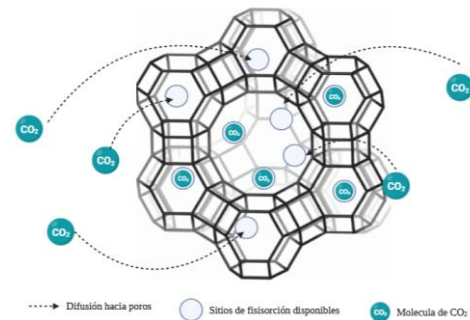


Figura 6. Mecanismo de *fisisorción* de CO₂ en FAU (moléculas alojadas en jaulas, interacción por Van der Waals). Elaboración propia.

A continuación, ocurre la segunda región de desorción del CO₂ a una temperatura intermedia, donde el proceso de *quimisorción* influye en la retención del gas. Los resultados muestran una pérdida parcial y pico térmico alrededor de $\sim 403\text{ °C}$, asociado a CO₂ fuertemente adsorbido y/o coordinado a cationes compensadores (Na⁺) o a sitios aluminio en la red. Lo anterior se interpreta como una interacción de carácter químico, donde ocurre la formación de especies fuertemente ligadas. La **Figura 7** representa el proceso de *quimisorción* en FAU, en la que aparece una posible coordinación del CO₂ a sitios catiónicos/aluminio, lo que requiere temperaturas mayores para su liberación.

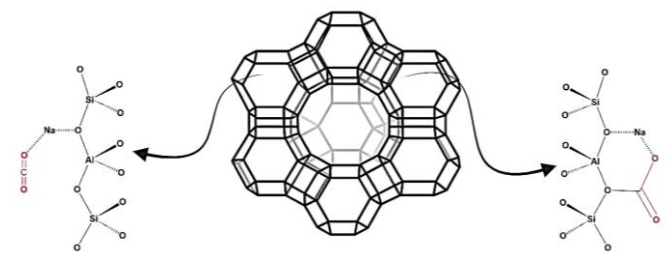


Figura 7. Mecanismo de *quimisorción* de CO₂ en FAU (coordinación a cationes/centros aluminio, formación de especies ligadas). Elaboración propia.

Por encima de $\sim 400\text{--}600\text{ °C}$ las pérdidas detectadas por TGA y los eventos pronunciados en DSC corresponden a procesos de reordenamiento o degradación estructural de la zeolita; por esta razón la cuantificación de CO₂ útil se limita a las desorciones que ocurren antes del inicio del colapso estructural (Yalou *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2010).

Los resultados de TGA/DSC sugieren que el proceso de captura no depende únicamente del número de sitios catiónicos sino también de la accesibilidad porosa y la cristalinidad. En este estudio, las muestras de 0.250–0.375 g de Al³⁺ presentan los mejores resultados de adsorción, lo cual es consistente con lo analizado por DRX y MEB, en donde la relación Si/Al permitió obtener cristales con la morfología adecuada para obtener mejores rendimientos de captura.

En contraste, la muestra con 0.500 g de Al³⁺ al presentar la transición de fase permite que la CIC aumente en base al contenido de Al³⁺, sin embargo, la predominancia de la fase X reduce la accesibilidad de cavidades y canales disponibles para el proceso de *fisisorción* del CO₂, resultando en una capacidad de retención menor frente a las otras muestras que combinan cristalinidad y sitios disponibles.

Los resultados obtenidos mediante DSC evidenciaron que la temperatura de descomposición del material zeolítico varía en función del contenido de aluminio incorporado durante la síntesis (Tabla 8). En particular, la muestra FAU con 0.500 g de Al^{3+} exhibe la mayor resistencia térmica, atribuible a una red más densa por la sustitución isomórfica de Si^{4+} por Al^{3+} .

Tabla 8. Temperaturas de descomposición determinadas por DSC para las muestras de FAU sintetizadas.

Al^{3+} agregado (g)	Descomposición parcial (°C)
0.5000	873
0.3750	870
0.2500	863
0.0000	715

Además, se observa que la muestra FAU con 0.500 g de Al^{3+} no sigue una tendencia lineal de degradación respecto a las demás formulaciones. Este comportamiento sugiere que, aunque los enlaces Al–O son térmicamente más débiles que los Si–O, durante el calentamiento térmico ocurren procesos de reorganización estructural o recristalización, lo que podría dar lugar a nuevas fases cristalinas antes de la descomposición final. Estos resultados son comparables con lo reportado por Dos Santos De Castro *et al.*, (2019) en donde su faujasita obtenida a base de caolín reportó tasas de degradación entre 750 °C y 800 °C.

En concordancia con el objetivo de este estudio, se demuestra que el material sintetizado es capaz de adsorber una cantidad significativa de CO_2 bajo condiciones ambientales, sin requerir presiones o temperaturas controladas. Este comportamiento respalda su aplicación en procesos industriales como una alternativa sustentable para la mitigación de gases de efecto invernadero.

5. Conclusiones

La ruta de síntesis hidrotermal permitió la recuperación de pasivos ambientales (jales mineros) en un material zeolítico tipo faujasita-X. Se determinó que el contenido de aluminio durante la síntesis es un parámetro fundamental que influye en el tamaño de partícula, el intercambio catiónico y la obtención de fases definidas, características que favorecen la adsorción de CO_2 .

El control de estos parámetros permitió obtener un material con capacidad de retención de CO_2 bajo condiciones ambientales de presión y temperatura, lo que permite su posible aplicación a nivel industrial como alternativa sustentable para mitigar emisiones gaseosas.

6. Agradecimientos

José Julián G. agradece al Dr. Felipe L. al Laboratorio de Tecnología de Cerámicos, al Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por el apoyo brindado para la realización y difusión de este trabajo.

7. Conflictos de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

8. Referencias

Boer, D. G., Pour, Z. A., Langerak, J., Bakker, B., & Pescarmona, P. P. (2023). Binderless Faujasite Beads with Hierarchical Porosity for Selective CO_2 Adsorption for Biogas Upgrading. *Molecules*, 28(5), 2198. <https://doi.org/10.3390/molecules28052198>

Dos Santos de Castro, P. R., Barreto Maia, A. Á., & Rômulo Simões, A. (2019). Study of the Thermal Stability of Faujasite Zeolite Synthesized from Kaolin Waste from the Amazon. *Materials Research*, 22(5). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2019-0321>

García Martínez, J., & Pérez Pariente, J. (2003). *Materiales zeolíticos: síntesis, propiedades y aplicaciones*. España: Universidad de Alicante, Servicio de Publicaciones.

Gillespie, M. R., Leader, R. U., Higgo, J. J., Harrison, I., Hards, V. L., Gowing, C., Vickers, B. P., Boland, M. P., & Morgan, D. J. (2000). *CEC & Kd Determination in Landfill Performance Evaluation*. British Geological Survey.

Google. (2025). *Google Maps: Presa Sur I y II, Pachuca de Soto, Hidalgo*. <https://maps.app.goo.gl/TG9nL3TseXTrFJV6>

Ibarra Cruz, L. E., Legorreta Garcia, F., Cobos Murcia, J. A., Juarez Tapia, J. O., & Rosario Oguin, Y. (2024). Bohemita de tamaño micrométrico obtenida a partir de desechos urbanos. *PADI Boletín Científico de Ciencias Básicas E Ingenierías del ICBI*, 11(22), 138-143. <https://doi.org/10.29057/icbi.v11i22.11026>

Ketterings, Q. M., Gami, S. K., Mathur, R., & Woods, M. (2014). A Simple Method for Estimating Effective Cation Exchange Capacity, Cation Saturation Ratios, and Sulfur Across a Wide Range of Soils. *Soil Science*, 179(5), 230-236. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000062>

López , G., Hernández , M., & García , D. (2024). La implementación de Sistemas de Energías Renovables y BESS en Infraestructura de Recarga en México y su papel en la descarbonización del transporte. *Instituto Mexicano del Transporte*. <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=614&IdBoletin=211>

Mohd Nazir, L. S., Yeong, Y. F., & Chew, T. L. (2020). Controlled growth of Faujasite zeolite with NaX topology by manipulating solution aging and Na_2O/Al_2O_3 ratios. *Colloids And Surfaces A Physicochemical And Engineering Aspects*, 600(124803). <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124803>

Najafi, A. M., Soltanali, S., & Ghassabzadeh, H. (2023). Enhancing the CO_2 , CH_4 , and N_2 adsorption and kinetic performance on FAU zeolites for CO_2 capture

- from flue gas by metal incorporation technique. *Chemical Engineering Journal*, 468(143719). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143719>
- P, P. (19 de Mayo de 2025). *MEXICO WARMING FASTER THAN THE GLOBAL AVERAGE* . Newsletter. <https://newsletter.unam.mx/index.php/2025/05/17/mexico-warming-faster-than-the-global-average/>
- Sheikh, M. S., Guo, L., Chen, Q., & Wang, B. (2025). Silk-Nano-Fibroin Aerogels: A Bio-Derived, Amine-Rich Platform for Rapid and Reversible CO₂ Capture. *arXiv.org*. <https://doi.org/https://arxiv.org/abs/2504.01129>
- Sujit, S., & Deeptimayee, P. (2023). Optimal synthesis of dolomite derived faujasite zeolite X for highly effective Cd(II) removal. *Environmental Research*, 240 (117494). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117494>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (12 de Mayo de 2025). *EPA*. Descripción general de los gases de efecto invernadero. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- Wang, Q., Luo, J., Zhong, Z., & Borgna, A. (2010). CO₂ capture by solid adsorbents and their applications: current status and new trends. *Energy & Environmental Science*, 4(1), 42-55. <https://doi.org/10.1039/c0ee00064g>
- Yalou, G., Hui, Z., & Ying, S. L. (2018). Desorption characteristics and kinetic parameters determination of molecular sieve by thermogravimetric analysis/differential thermogravimetric analysis technique. *Adsorption Science & Technology*, 36 (7-8), 1389-1404. <https://doi.org/10.1177/0263617418772665>
- Yuan, J., Gong, J., Lin, H., & Grygiel, K. (2017). Main-chain poly(ionic liquid)-derived nitrogen-doped micro/mesoporous carbons for CO₂ capture and selective aerobic oxidation of alcohols. *Applied Materials Today*, 7, 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.009>