

RETENCIÓN DE CO₂ POR MINERALIZACIÓN EN ROCAS. UNA PROPUESTA DE PREPARACIÓN Y ANÁLISIS DE MUESTRAS EN EL LABORATORIO

Josué H. Almazán-Mendoza ¹, A. Paulina Gómora-Figueroa ^{1*},
Laura Mori ² y Enrique A. González-Torres ²

¹Departamento de Ingeniería Petrolera, División de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria., Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

²Departamento de Ingeniería Geológica, División de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México.

*p.gomora@unam.mx (autora para correspondencia)

RESUMEN

En este trabajo se plantea una propuesta de laboratorio para valorar diferentes muestras de rocas ígneas y seleccionar, mediante análisis geoquímico y petrográfico, las mejores candidatas para exponerse a dióxido de carbono acuoso. Lo anterior sirve como guía a estudiantes de licenciatura y posgrado interesados en el tema de almacenamiento de CO₂ que deseen conocer algunas de las técnicas de análisis geoquímico que se emplean en el laboratorio. Los protocolos experimentales diseñados fueron validados en el laboratorio por alumnos de los últimos semestres de la carrera de Ingeniería Petrolera y del Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, los cuales permitieron identificar los parámetros críticos para la mineralización de CO₂ en rocas ígneas y olivino, que es un mineral común en las rocas ígneas máficas y se ha reportado como uno de los mejores prospectos para la mineralización de CO₂.

Las muestras de roca fueron expuestas a dióxido de carbono disuelto en agua, a una presión entre 5860 y 6550 kPa y una temperatura de 20 a 25 °C. Para confirmar la mineralización del dióxido de carbono se emplearon las técnicas de espectroscopía infrarroja, difracción de rayos X de polvos, microscopía electrónica de barrido y plasma de acoplamiento inductivo acoplado con espectrofotometría de emisión óptica. Se observó que, después de exponer el olivino a CO₂ durante 21 y 60 días, se formaron bicarbonatos y carbonatos, respectivamente. Para el caso de las rocas ígneas, se identificaron bicarbonatos después de 30 días de exposición y se observó la liberación de iones Ca²⁺, Mg²⁺ y Fe³⁺ en el agua, que son críticos para la formación de carbonatos. Aunque la mineralización de CO₂ en este tipo de rocas se ha reportado previamente, es necesario continuar la investigación en este tema para elaborar una base de datos con las muestras más idóneas que favorezcan la mineralización de dióxido de carbono y se genere conocimiento de la capacidad de almacenamiento de CO₂. Estas experiencias son relevantes para las y los estudiantes de licenciatura y posgrado afines a Ciencias de la Tierra, así como para complementar su formación en temas relacionados con el calentamiento global, la mitigación de emisiones de CO₂ y la transición energética.

Palabras clave: mineralización de CO₂, almacenamiento geológico, geoquímica, rocas ígneas, olivino, piroxeno, calentamiento global.

ABSTRACT

The present work sets a lab proposal for evaluating and selecting among different igneous rocks samples, using geochemical and petrographic analysis, the best candidates for aqueous CO₂ exposure. This work aims to guide students (B.S. and Graduates) interested in practical techniques employed for evaluating carbon dioxide storage through geochemical analysis in the lab. The designed protocols were validated by B.S. and graduate students in the Petroleum Engineering Department at UNAM, to identify of some critical parameters for CO₂ mineralization in igneous rocks and olivine, which is a common mineral present in mafic igneous rocks, and it has been reported as one of the best prospects for carbon dioxide mineralization.

The rock samples were exposed to CO₂ dissolved in water at a pressure range of 5860 - 6550 kPa and a temperature range of 20 to 25 °C. We used infrared spectroscopy, X-ray powder diffraction, scanning electron microscopy, and inductively coupled plasma-mass spectrometry to confirm the CO₂ mineralization. After exposing the olivine to CO₂ for 21 to 60 days, we observed the formation of bicarbonates and carbonates, respectively. For the igneous rocks, we identified bicarbonates after 30 days of exposure and the liberation of Ca²⁺, Mg²⁺, and Fe³⁺ ions in water, which are critical for carbonate formation.

Although the CO₂ mineralization in these rocks has been reported previously it is necessary to continue investigating this topic to enrich the database with the ideal samples and broaden the knowledge about the igneous rocks' capacity for CO₂ storage. This type of experience is relevant for graduate and B.S. students majoring in Earth Sciences and areas alike. Also, it helps to fulfill the education in topics related to global warming, CO₂ emissions mitigation, and energy transition.

Keywords: mineralization of CO₂, geological storage, geochemistry, igneous rocks, olivine, piroxene, global warming

INTRODUCCIÓN

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (COP26) se llevó a cabo en Glasgow en 2021 donde se reunieron 120 líderes mundiales que durante dos semanas trabajaron para discutir fundamentos científicos, soluciones, voluntad política para la toma de decisiones e indicaciones para la acción por el clima. Desafortunadamente, la reducción de las emisiones globales de gases de efecto invernadero sigue estando muy por debajo de lo necesario para preservar un clima habitable, y el apoyo a los países más vulnerables afectados por los efectos del cambio climático continúa siendo insuficiente (Naciones Unidas, 2023).

Ahora bien, los combustibles fósiles se han usado como fuente de energía por más de 6000 años y actualmente siguen siendo las fuentes más utilizadas. En la Figura 1 se observa que el carbón (44,473 TWh) y el gas natural (40,375 TWh) fueron las dos fuentes de energía más usadas globalmente en 2021 después del petróleo (51,170 TWh). Esto implica que el 83 % de la demanda mundial (163,709 TWh) en energía se cubrió con combustibles fósiles.

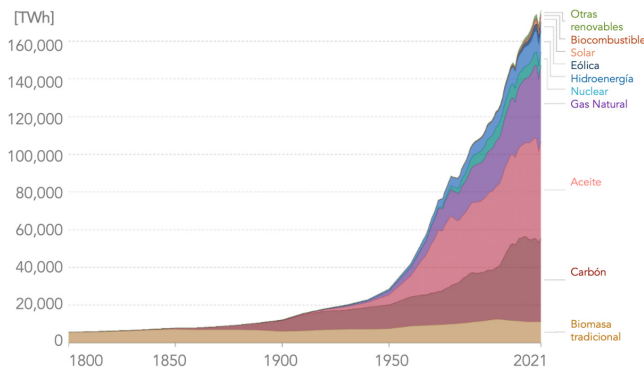


Figura 1. Consumo de energía mundial proveniente de fuentes distintas. Un terawatt-hora (TWh) equivale a la energía necesaria para mantener la potencia de un Watt durante una hora y equivale a 3600 Julios (el Watt no pertenece al Sistema Internacional de Unidades). Tomada de Ritchie et al., 2022 con datos de BP Statistical Review of World Energy.

Según cifras de la Agencia Internacional de Energía (IEA, por sus siglas en inglés), en el 2020 las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera se redujeron en un 8 % con respecto al 2019, debido a la pandemia por COVID. Sin embargo, en el 2022 se restableció la tendencia pre-pandémica y se emitieron 36.8 gigatoneladas (Gt) de CO₂ a la atmósfera, alcanzando un nuevo índice histórico. El sector con mayores emisiones de CO₂ fue el de energía, seguido del industrial (ej. industria cementera, industria siderúrgica, refinación y petroquímica). Figura 2, IEA, 2022.

Lo anterior es consecuencia, en gran parte, del incremento global de la población; según proyecciones de la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), en el 2050 habrá cerca de 10 mil millones de habitantes, lo que resultará en mayor demanda de energía, agua y alimentos y, por lo tanto, en más emisiones de CO₂. (Macías, 2020) Una de las acciones para reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera es la implementación de la tecnología CCUS (Captura, Uso y Almacenamiento de CO₂, por sus siglas en inglés). En el 2014, la Secretaría de Energía de México conformó y oficializó el mapa de la ruta tecnológica CCUS, en el cual se plantea el ordenamiento de los esfuerzos dirigidos a la articulación de actividades de investigación en captura, transporte, uso y almacenamiento de CO₂ con la intención de impulsar su desarrollo

y la implementación de dicha tecnología en el país; su actualización se publicó en el 2018 (Figura 3). Por lo tanto, el desarrollo de proyectos de investigación que atiendan las necesidades de esta ruta es sumamente deseable (Secretaría de Energía, 2018; MeCCS, s.f.; Enerdata, 2023).

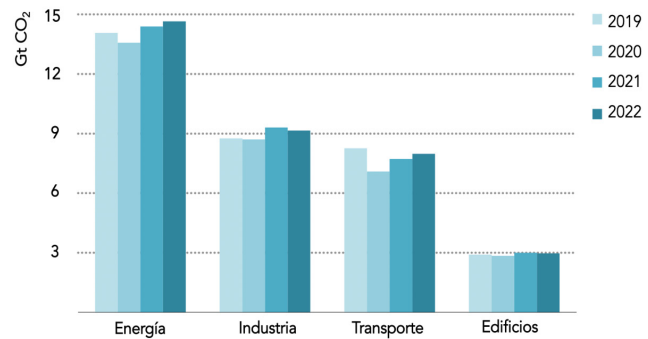


Figura 2. Emisiones globales de CO₂ por sector, 2019 – 2022 en gigatoneladas (Gt) de CO₂ equivalente. El transporte incluye barcos de carga (international bunkers, IEA, 2022). Gt es una unidad de medida que no pertenece al Sistema Internacional de Unidades. Sirve para medir masa o energía. Como medida de masa equivale a 1.000.000.000 (mil millones) de toneladas.

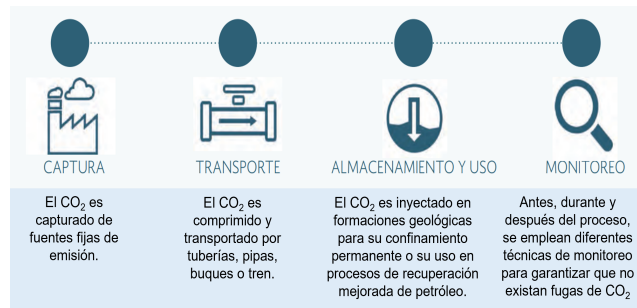


Figura 3. Cadena CCUS, incluye el monitoreo. Modificado de Secretaría de Energía, 2018.

Almacenamiento geológico de CO₂

Existen diferentes opciones para el almacenamiento geológico que se considera como la disposición final del CO₂. La capacidad global para el secuestro geológico se estima en más de 4,000 billones de toneladas de CO₂, lo cual incluye yacimientos de petróleo y gas exhaustos, formaciones salinas y vetas de carbón. Por lo tanto, los proyectos CCUS pueden jugar un papel importante en la mitigación de emisiones. (Global CCS Institute, 2020). En la Tabla 1 se muestra un resumen de algunas formas de almacenamiento del dióxido de carbono en diferentes sistemas. (Gómora-Figueroa, comunicación personal).

Para las diferentes opciones o métodos de almacenamiento disponibles, existen cuatro mecanismos de entrapamiento a través de los cuales el CO₂ queda contenido en el medio poroso: estructural, residual, disolución y mineralización. La Figura 4 muestra una representación gráfica de cada uno de los mecanismos mencionados, los cuales pueden ocurrir simultáneamente en el espacio poroso de un yacimiento tras la inyección de dióxido de carbono (Shukla, 2010).

La mineralización ocurre cuando algunos minerales liberan iones a partir de interacciones con el CO₂ y se forman especies sólidas estables, generalmente carbonatos o bicarbonatos. La

Tabla 1. Algunas opciones de almacenamiento geológico de dióxido de carbono. Adaptado de Gómora-Figueroa (comunicación personal).	
Yacimientos de petróleo y gas	La infraestructura existente podría reutilizarse; sin embargo, es necesario evaluar el riesgo asociado por fugas. La inyección de CO ₂ para la movilización del petróleo residual en los yacimientos (CO ₂ -EOR) por sus siglas en inglés, recuperación mejorada de hidrocarburos— ha resultado ser eficaz. Las pérdidas de CO ₂ a la atmósfera son cercanas a cero en CO ₂ -EOR. Sin embargo, el objetivo principal es maximizar la producción de petróleo, no inyectar la máxima cantidad de CO ₂ . La industria del petróleo continua siendo reacia a almacenar CO ₂ en yacimientos de hidrocarburos exhaustos, ya que es posible que en el futuro se desarrollen tecnologías para producir los hidrocarburos restantes.
Formaciones salinas profundas	Son estratos de roca porosa y permeable en los que los espacios porosos están saturados de agua altamente salina. Los acuíferos salinos profundos tienen la capacidad potencial más alta a nivel mundial para el almacenamiento de CO ₂ . La cinética de los mecanismos de captura y su impacto a largo plazo sobre las características del yacimiento, en particular la captura geoquímica, necesitan más investigación. Las propiedades de las formaciones salinas profundas no son tan conocidas como las formaciones de petróleo y gas, ya que es difícil y costoso caracterizarlas.
Vetas de carbón	El CO ₂ se puede utilizar para mejorar la recuperación del metano en capas de carbón (CBM) por medio de adsorción. Esta tecnología es usada en varias cuencas alrededor del mundo ya que por cada molécula de gas producida se absorben al menos dos moléculas de CO ₂ en la matriz de las vetas. Uno de los principales problemas asociados con el desarrollo de este tipo de recuperación es la baja permeabilidad de las capas de carbón. La inyección continua de CO ₂ provoca la disminución de la permeabilidad cercana al área de inyección.
Profundidades oceánicas	Es fundamental considerar el impacto ambiental sobre el calentamiento del océano, la acidificación y la pérdida de oxígeno debido a la adsorción del CO ₂ atmosférico que ha aumentado en las últimas décadas. Aún existen brechas respecto a los procesos físicos, biogeoquímicos y biológicos para comprender las consecuencias, límites y capacidad de los ecosistemas y organismos debido al almacenamiento de CO ₂ .
Mineralización	La mineralización <i>ex-situ</i> se lleva a cabo en zonas cercanas a minas con desechos bajo condiciones de temperatura y presión diversas. El CO ₂ reacciona exotérmicamente con silicatos de Mg o Ca para formar carbonatos. Suelen usarse aditivos para acelerar la reacción. Los costos pueden reducirse si los carbonatos producidos tienen aplicaciones industriales. La mineralización <i>in-situ</i> consiste en inyectar CO ₂ en el subsuelo, rico en silicatos de Ca, Mg y Fe para formar carbonatos. Los productos son estables durante millones de años.

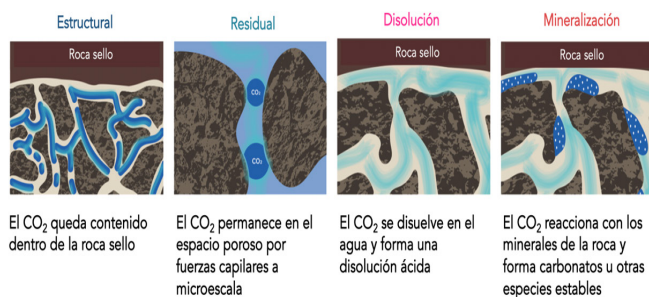


Figura 4. Mecanismos de entrapamiento durante el almacenamiento de CO₂. Modificado de Staib *et al.*, 2021.

mineralización en rocas se puede dividir en dos categorías: *in-situ* y *ex-situ*. La mineralización *in-situ* consiste en la inyección de CO₂ en el subsuelo bajo condiciones optimizadas con el fin de acelerar el proceso natural de carbonatación mineral. Este proceso puede darse en presencia o ausencia de agua y en condiciones supercríticas del CO₂ (31 °C y 7295.4 kPa). En cambio, la mineralización *ex-situ* se produce en la superficie y suele ser un proceso industrial; usualmente se emplea pedacería de rocas, imitando la meteorización natural donde los silicatos de magnesio o calcio se transforman en carbonatos mediante la reacción con CO₂; sin embargo, el proceso se acelera con el empleo de reactores, catalizadores, ácidos y bases.

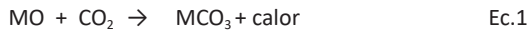
La mineralización natural requiere cientos o miles de años; sin embargo, recientemente se ha demostrado que la mineralización *in-situ* puede ocurrir mucho más rápidamente en basaltos. Un ejemplo es el proyecto Carbfix en Islandia, donde se probó de manera efectiva la mineralización de 90 % de dos toneladas de dióxido de carbono inyectado en aproximadamente dos años. El CO₂ proviene de una central eléctrica y es inyectado simultáneamente con agua en

rocas máficas a una profundidad cercana a los 800 m. A la fecha de elaboración de este trabajo, Carbfix ha inyectado 90 521.9 toneladas de CO₂ (Carbfix, 2023; Staib *et al.*, 2021). La siguiente etapa del proyecto consiste en capturar dióxido de carbono de la atmósfera. Este proyecto ha recibido premios y distinciones múltiples y aunque aún no se considera como un proyecto comercial, otros países (por ejemplo, Suecia) han firmado convenios de colaboración para implementar la tecnología en el corto plazo.

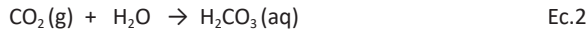
Otro ejemplo es el proyecto Wallula, que se encuentra en el área industrial de Atlatia, en el condado de Walla Washington, Estados Unidos. Este proyecto comenzó en el año 2009 y hasta el año 2013 el Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico llevó a cabo una prueba piloto de almacenamiento en la que se inyectaron cerca de 1000 Mt de CO₂ en basaltos del río Columbia, cerca de Wallula. En junio del 2015 se realizó la caracterización detallada de muestras de roca, encontrando la presencia de carbonatos en el yacimiento, lo que reveló que el CO₂ inyectado se había mineralizado dos años después de su inyección. Según cálculos, el 65 % (650 Mt) del CO₂ inyectado quedó entrapado a través de la mineralización y los carbonatos resultantes ocuparon sólo el 4.3 % del espacio poroso disponible en el yacimiento (McGrail *et al.*, 2017; White *et al.*, 2020).

Proceso de mineralización de CO₂ en rocas

El proceso de retención de CO₂ en rocas (ya sea *in-situ* o *ex-situ*) ocurre cuando el CO₂ reacciona con óxidos metálicos presentes en las rocas ígneas, MO, donde M puede ser calcio, magnesio o hierro, para generar el carbonato correspondiente (MCO₃) con la liberación de calor.



La cantidad de calor liberado dependerá de M y del material de partida que contiene el óxido metálico. La reacción química comienza con la disolución del CO₂ para formar ácido carbónico (Ecuación 2), el cual se disocia en pasos, liberando primero iones bicarbonato y protones (Ecuación 3) y posteriormente iones carbonato y protones (Ecuación 4).



El agua con CO₂ disuelto puede alcanzar un valor de pH = 4, dependiendo de la presión parcial de CO₂, composición del agua y temperatura del sistema, lo cual promueve la disolución de silicatos, principalmente de los grupos del olivino $-(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_4-$ y los piroxenos $-\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})\text{Si}_2\text{O}_6-$, resultando en la mineralización de CO₂ en dos pasos: primero, se lleva a cabo la disolución de los minerales, durante la cual se consumen protones (Ecuaciones 3 y 4) y aumenta el pH del agua; posteriormente, los iones metálicos disueltos reaccionan con los iones carbonato y bicarbonato para formar especies carbonatadas sólidas y estables como la calcita (CaCO₃), la magnesita (MgCO₃), la dolomita (MgCa(CO₃)₂) o la siderita (FeCO₃). (Rara vez se observa esta última: Figura 5; Snæbjörnsdóttir et al., 2020). La Ecuación 5 muestra una reacción de meteorización química de un típico clinopiroxeno, durante la cual se consumen protones y se liberan iones Ca²⁺, Mg²⁺ y Fe²⁺ en la disolución.

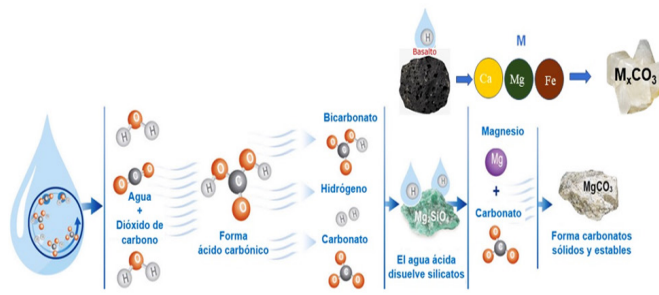


Figura 5. Proceso de retención de CO₂ en minerales. Modificado de Raza et al. 2022.

Los carbonatos formados ocupan el espacio poroso de la roca y por lo general suelen tener un volumen mayor al que ocupaban los minerales originales. Esto provoca que los poros se "taponen" y se obstruya el paso del agua con CO₂ disuelto. Sin embargo, la expansión del volumen durante la precipitación puede promover el agrietamiento y fracturamiento de la roca, lo que aumenta la porosidad, la permeabilidad y expone nuevas superficies. También hay que señalar que, debido a la acidez del agua, los minerales se disuelven durante la inyección, lo que puede abrir espacios porosos y caminos por donde fluya el agua (Snæbjörnsdóttir et al., 2020). Otros factores que afectan la mineralización del CO₂ son la permeabilidad y porosidad efectiva de las rocas. Los poros y fracturas proporcionan vías para la migración de fluidos y el acceso a superficies minerales.

En este trabajo se presentan algunos experimentos para llevar a cabo en el laboratorio con rocas ígneas de México y CO₂ disuelto en agua a presión elevada, con el objetivo de evaluar los cambios que

resulten de esta exposición en diferentes condiciones y periodos de tiempo para encontrar aquellas más favorables para la mineralización de CO₂ y la formación de otros minerales secundarios, tales como arcillas, zeolitas y anhidritas en las rocas ígneas estudiadas y aportar conocimiento sobre el potencial de almacenamiento de CO₂ en el país. Estas experiencias pueden ser muy enriquecedoras para las y los alumnos de las carreras de Ciencias de la Tierra debido al creciente interés en relación a la transición energética, la captura y almacenamiento de CO₂ y el desarrollo de proyectos para mitigar las emisiones de dióxido de carbono de la industria del petróleo y el gas.

Desarrollo experimental

Se emplearon muestras de rocas ígneas, por su contenido de SiO₂, Na₂O y K₂O (en porcentaje de masa) pueden denominarse basaltos o andesita (Zanettin, 1984), los cuales contienen plagioclasas de composición intermedia, sanidina, augita, enstatita y olivino tipo forsterita. Las muestras fueron recolectadas anteriormente por nuestro equipo para el desarrollo de la tesis "Análisis de la factibilidad para la eliminación de dióxido de carbono mediante la formación de carbonatos a través de basaltos", donde se reporta la recolección de siete muestras de rocas ígneas superficiales e intemperizadas (T01, T02, T03, T03a, T04, T05 y T06), correspondientes a edades de rocas volcánicas máficas del Plioceno Tardío-Cuaternario (<3 Ma) y rocas andesíticas del Mioceno (~19-10 Ma). Estas formaciones se encuentran entre los estados de Puebla, Tlaxcala e Hidalgo. Las muestras de roca seleccionadas para este estudio fueron T01 y T05, recuperadas en las coordenadas Longitud -98° 13'36.3" W, Latitud 19°25'54.0" N y Longitud -98°05'13.8" W y Latitud 19°41'24.4" N, respectivamente, (Figura 6, Cantú-Apodaca, 2018).

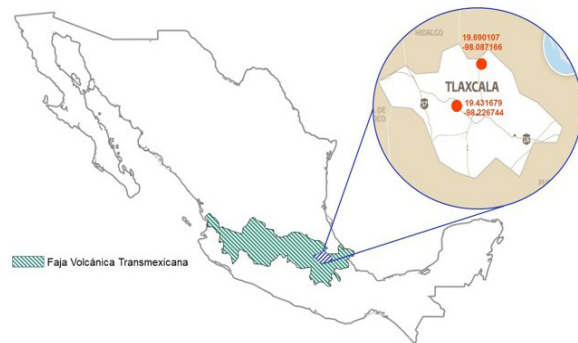


Figura 6. Mapa regional de México con ubicación de las muestras de roca T01 y T05 utilizadas para el desarrollo de este trabajo. Modificado de Cantú-Apodaca, 2018.

Además, se utilizó olivino como muestra control, debido a que este mineral comúnmente está presente en las rocas ígneas y existen diversos reportes en la literatura sobre su capacidad para reaccionar con el dióxido de carbono y fijarlo en forma de carbonatos estables (Kwon et al., 2011; Gadikota et al., 2020). La muestra se adquirió de Minerales Silvita. En la Figura 7 se presenta la metodología para el desarrollo de este trabajo.

Una vez que las muestras fueron limpiadas y pulverizadas, se sometieron a una caracterización previa, como se indica en la Figura 7, la cual consistió en la determinación de elementos mayores por fluorescencia de rayos X. Con la información generada se hizo un análisis de la composición química de las muestras y para las

pruebas experimentales se seleccionó T05, con la cual se realizaron cuatro experimentos (Tabla 2); además, simultáneamente se realizó el análisis petrográfico de todas las muestras de roca, lo cual auxilió en la selección de T05. Se ocuparon 3 g de roca molida (tamaño de partícula <74 µm), 1 kg de hielo seco y 1 L de agua destilada que se cargaron en una celda de acero inoxidable que soporta hasta 12 564 kPa (1800 psi) de presión y tiene una capacidad de 4.55 L. El intervalo de presión utilizado durante los experimentos fue de 5860 y 6550 kPa (800 a 950 psi) y se trabajó a temperatura ambiente. Los tiempos de exposición al CO₂ para cada experimento se muestran en la Tabla 2.

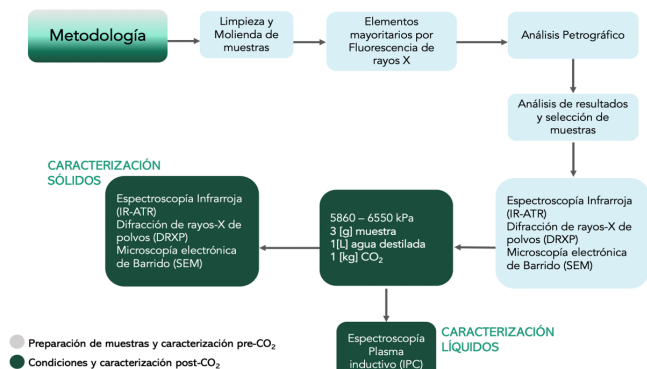


Figura 7. Diagrama de flujo indicando la metodología experimental seguida en este trabajo.

	Muestra	Tiempo de exposición (días)
1	Olivino	21
2		60
3	T05	21
4		30

Es importante señalar que, excluyendo el análisis petrográfico para el cual se usaron láminas delgadas de las rocas, en todos los experimentos se emplearon muestras pulverizadas para incrementar el área de contacto con CO₂ y reducir los tiempos de reacción para identificar evidencias de mineralización, además de facilitar el manejo y caracterización de las muestras.

Al concluir el tiempo de exposición, se abrió la celda para recuperar los sólidos y el agua. El sólido se filtró y se puso a secar en un horno a 40 °C por 24 h. El agua residual es recuperada y filtrada utilizando una membrana de la marca Corning de 0.20 µm y se caracteriza por espectroscopía de plasma inductivo (ICP por sus siglas en inglés). El sólido se analiza nuevamente por difracción de rayos X de polvos (DRXP), espectroscopía infrarroja (IR-ATR) y microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés). A continuación se presentan y discuten los resultados obtenidos.

Los equipos empleados para la caracterización de las muestras antes y después de los experimentos se enlistan a continuación (Almazán-Mendoza, J. 2022):

- Difracción de rayos X de polvos (PXR); equipo RX Bruker AX5 D8 Advance, 1°/min, potencia 30 kv, 30 mA, Instituto de Materiales UNAM.

- Fluorescencia de rayos X; con espectrómetro secuencial de rayos X (Rigaku Primus II) equipado con un tubo de rodio y ventana de berilio de 30 micras, Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM).

- Espectroscopía infrarroja (IR-ATR); *Agilent Instruments FTIR Cary 630* – ATR, Laboratorio de Interacción Roca-Fluido, Fluido-Fluido, Facultad de Ingeniería UNAM.

- Microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectrómetro de energía dispersiva (EDS) acoplado; Microscopio Electrónico de Barrido de ultra-alta resolución JSM-7800F, Instituto de Física de la UNAM.

- Espectroscopía de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES) utilizando el equipo espectrómetro de masas con plasma inductivamente acoplado. Marca *Agilent Technologies*; Modelo: 7500ce LANGEM.

RESULTADOS

Caracterización pre-CO₂ y selección de muestras

La determinación de los elementos mayores (Tabla 3) por fluorescencia de rayos X y el análisis petrográfico de las muestras fueron esenciales para la selección de T05. De acuerdo con reportes en la literatura, al ser menos estables en condiciones ambientales respecto a los productos ígneos félsicos, las rocas máficas tienen mayor probabilidad de reaccionar con el CO₂ acuoso (H₂CO₃) mediante una reacción de meteorización de tipo ácido-base. Otra característica importante es la mayor concentración de iones calcio, magnesio y hierro que caracteriza las rocas máficas, los cuales forman carbonatos sólidos estables con el dióxido de carbono. Algunos minerales que presentan estas características son los olivinos y piroxenos que se encuentran típicamente en las rocas máficas. Por lo tanto, también se determinaron los elementos mayores en la muestra de referencia, el olivino. En la Tabla 3 se aprecian los resultados del análisis y resalta T05 como uno de los candidatos con menor contenido de SiO₂ (más máfico) y mayor contenido de MgO, CaO y Fe₂O₃t, y presenta menores pérdidas por calcinación.

De manera simultánea se llevó a cabo el análisis petrográfico de todas las muestras de rocas. Por practicidad, en este trabajo sólo se presenta el análisis para T05; el análisis del resto de las muestras puede consultarse en la liga:

<https://drive.google.com/file/d/1OjoL1FFNTJRBZ5OUiT9FW6egomBTRTj/view?usp=sharing>

La muestra T05 es una roca volcánica porfídica con fenocristales de olivino y plagioclasa embebidos en una matriz holocristalina de plagioclasa, clinopiroxeno, olivino y óxidos. Los fenocristales de olivino (Figura 8) son incoloros y de alto relieve en nicols paralelos, presentan formas subhedrales-anhedrales y exhiben una textura seriada con tamaños que varían desde finos hasta un máximo de 1.5 mm. Algunos cristales se encuentran típicamente fracturados, mientras que otros presentan alteración iddingsítica a lo largo de sus bordes. Algunos fenocristales están organizados en agregados glomerofídicos.

Tabla 3. Análisis de elementos mayores para las muestras de roca ígnea y olivino.

Componente	T01	T02	T03a	T03b	T04	T05	T06	Olivino
[%] masa								
SiO ₂	49.4	51.6	55	55	55.1	49.9	54.1	42.468
TiO ₂	1.96	1.58	1.01	1.01	1.1	1.68	0.95	0.064
Al ₂ O ₃	16.8	16.3	17.8	17.7	17.8	17.9	17.2	0.791
Fe ₂ O _{3t}	11.1	9.32	7.02	6.98	7.22	10.1	8.22	9.197
MnO	0.11	0.13	0.08	0.08	0.08	0.12	0.08	0.106
MgO	5.76	6.12	5.58	5.52	5.08	6.87	5.94	46.977
CaO	8.65	8.1	8.31	8.28	7.82	8.67	7.86	0.482
Na ₂ O	3.46	3.53	3.6	3.61	3.59	3.52	3.71	0.007
K ₂ O	0.97	1.46	1.11	1.2	1.2	0.69	1.07	0.035
P ₂ O ₅	0.42	0.49	0.21	0.21	0.23	0.31	0.23	0.013
PXC	1.34	1.38	0.31	0.22	0.7	0.21	0.62	-0.14
Suma	100	100	100	99.8	100	100	100	100

Los escasos fenocristales de plagioclasa tienen formas anhedrales, tamaño fino (< 1 mm) y presentan evidencias de desequilibrio, como texturas de tamiz en el núcleo (Figura 9) o maclado cuneiforme. En la matriz se observan microlitos alargados de plagioclasa, clinopiroxeno verde pálido en nicols paralelos, microlitos de olivino parcial o completamente iddingsitizados, así como minerales opacos representados por magnetita y cristales alargados de ilmenita. En la matriz se reconocen dominios intergranulares y subófticos (cristales más grandes de clinopiroxeno engloban parcialmente a microlitos de plagioclasa; Figura 10).

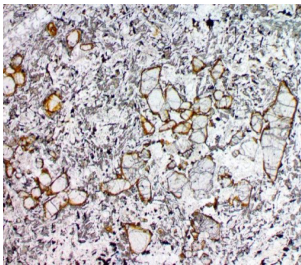


Figura 8.

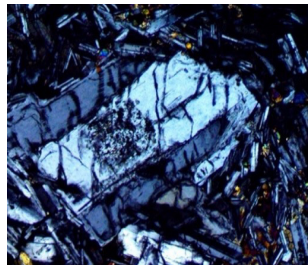


Figura 9.

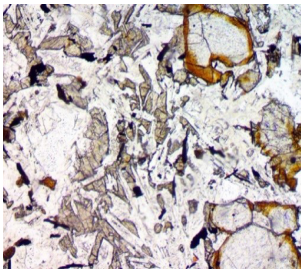


Figura 10.

Figura 8. La fotomicrografía, tomada en nicols paralelos, muestra fenocristales de olivino con textura seriata, los cuales están organizados en agregados glomerófidicos. Los olivinos se presentan típicamente fracturados y con bordes iddingsitizados. El lado largo de la imagen mide 4.2 mm.

Figura 9. La fotomicrografía, tomada en nicols cruzados, muestra un fenocristal de plagioclasa con textura de tamiz en su interior. El lado largo de la imagen mide 1 mm.

Figura 10. La fotomicrografía, tomada en nicols paralelos, muestra cristales de olivino con bordes iddingsitizados, así como cristales de clinopiroxeno y plagioclasa que forman una textura subóftica. El lado largo de la imagen mide 1 mm.

La caracterización del olivino y de T05 mediante DRXP, IR-ATR y SEM antes de llevar a cabo los experimentos, tiene como finalidad contar con una referencia del estado de las muestras previo a su exposición al dióxido de carbono. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4. Para la muestra de olivino se identificaron las fases forsterita y fayalita, lo cual coincide con los análisis por fluorescencia de rayos X y difracción de rayos X de polvos (Figura 11). Cabe destacar que la fase mayoritaria es la forsterita. Es importante señalar que la muestra de olivino se adquirió en pedacería y el análisis más detallado reveló la presencia de enstatita, lo que dificultó la cuantificación de las fases del olivino, mientras que por microscopía electrónica de barrido (SEM) se encontró que el olivino presenta protuberancias o incrustaciones. En el caso de T05, se identificaron vibraciones que se asocian a la augita y andesina (Tabla 4) por el análisis de espectroscopía infrarroja.

El análisis por difracción de rayos X reveló que la composición de T05 presentaba minerales tipo olivino, ortopiroxenos (enstatita), piroxenos (augita) y plagioclasas (andesina). Como se mencionó anteriormente, en la literatura se ha reportado que los minerales con mayor potencial para la mineralización de CO₂ son los olivinos, seguidos de los piroxenos, y anfíboles. En el orden mencionado se incrementa la estabilidad de los minerales en condiciones ambientales y, por lo tanto, disminuye su capacidad para meteorizarse y reaccionar con el dióxido de carbono (Snæbjörnsdóttir *et al.*, 2020). En este sentido, las muestras seleccionadas para el desarrollo de este trabajo cuentan, teóricamente, con el potencial para reaccionar con dióxido de carbono disuelto en agua y formar sólidos estables como los carbonatos.

Tabla 4. Vibraciones obtenidas por espectroscopía infrarroja para el olivino y T05 antes de exponerlas a CO₂ (Lafuente *et al.*, 2015; Lazarev, 1972; Ortiz, 2020; Universidad del País Vasco, 2022; Johnson, 2012).

Vibración	Referencias Número de onda (cm ⁻¹)	Muestras utilizadas Número de onda (cm ⁻¹)
Olivino		
Fayalita; Fe ₂ (SiO ₄)	1400, 860, 740, 400	836, 410
Forsterita; Mg ₂ (SiO ₄)	980, 880, 610, 500, 410	950, 881, 605, 500, 410
T05		
Aluminosilicatos	1200, 1180, 960, 913, 888, 820, 751, 692	1160, 913, 744
Augita	1060, 950, 860, 630, 460	1095, 636, 422
Andesina	1007, 580, 536, 450, 366	1000, 573, 538, 420

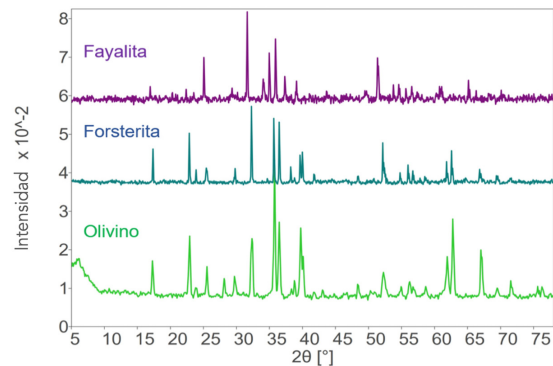


Figura 11. Gráfica comparativa de espectros de fayalita, forsterita y muestra de olivino sin exposición al CO₂ acuoso.

Caracterización post-CO₂ de sólidos
Muestra de olivino

Después de 21 días de exposición a alta presión se encontraron vibraciones correspondientes a bicarbonatos en la muestra de olivino; sin embargo, su presencia no pudo confirmarse por ninguna otra técnica. Esto indica que la alteración de la muestra fue parcial, o bien, que los bicarbonatos no son un producto primario en la mineralización del CO₂. Es importante señalar que no se observó ninguna otra evidencia de mineralización de dióxido de carbono a los 21 días de exposición. Por lo tanto, se llevó a cabo una prueba a presión elevada 6178 kPa (896 psi) por 60 días, sin alcanzarse las condiciones críticas del CO₂. En este segundo experimento se observaron evidencias de carbonatos mediante espectroscopía infrarroja (Tabla 5) y no se observaron bicarbonatos a pesar de que se realizaron varias mediciones con distintas fracciones de la muestra. Lo anterior sugiere nuevamente que no toda la muestra expuesta al CO₂ reacciona al mismo tiempo y que hace falta homogeneizar el medio en el que está expuesto el olivino asegurando que el pH sea ácido, para que la roca se disuelva y posteriormente se formen carbonatos.

Otra posibilidad es que el medio no sea suficientemente ácido para llevar a cabo la mineralización de una mayor fracción de muestra. La presencia de carbonatos fue confirmada mediante el análisis de difracción de rayos X ya que se encontraron varias coincidencias con la magnesita (carbonato de magnesio), para los ángulos 2θ de 27°, 30°, 31°, 36°, 65° y 70°. (Figura 12). También se empleó microscopía electrónica de barrido (SEM) para identificar cambios en la textura y el crecimiento de incrustaciones minerales sobre la superficie de la muestra. Después de 21 días de exposición a dióxido de carbono se observó (Figura 13) que la muestra sufrió cambios en la superficie, es decir, las caras del mineral presentan

considerablemente menos incrustaciones después de la exposición de CO₂, lo cual puede deberse a la disolución parcial de la superficie de la muestra más lisa.

Para la muestra expuesta a CO₂ por 60 días se encontró un fragmento grisáceo de roca que llamó la atención por su forma y textura; al analizar detalladamente su composición por energía dispersiva se reveló que la roca estaba compuesta principalmente por átomos de C, O, Si y trazas de Ca y Fe, además presentaba incrustaciones de Mg. Esto permite confirmar la presencia de carbonatos de magnesio observados por medio de las otras técnicas utilizadas.

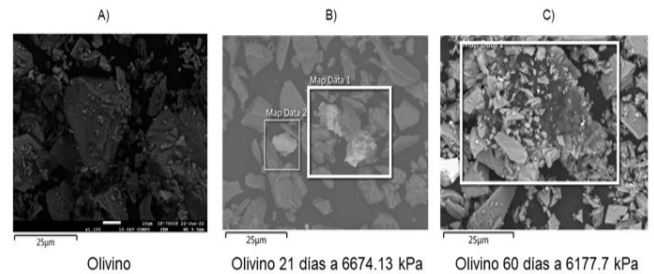


Figura 13. Imagen comparativa de las muestras de olivino después de ser expuestas a CO₂ en condiciones de alta presión. A) muestra de olivino sin exposición a dióxido de carbono. B) muestra de olivino expuesta a CO₂ acuoso (968 psi; 25 °C) por 21 días, C) olivino expuesto a CO₂ acuoso (896 psi; 25 °C) por 60 días. Los recuadros blancos indican la zona analizada por energía dispersiva para conocer la composición de la muestra.

Tabla 5. Vibraciones infrarrojo para las muestras de olivino antes de ser expuestas (Lafuente <i>et al.</i> , 2015; Lazarev, 1972; Ortiz, 2020; Universidad del País Vasco, 2022).			
Vibración	Referencia	Olivino, 21 días	Olivino, 60 días
Número de onda (cm⁻¹)			
Fayalita; Fe ₂ (SiO ₄)	1400,860, 740, 400	836, 410	836, 410
Forsterita; Mg ₂ (SiO ₄)	980,880, 610, 500, 410	950,881, 605, 500, 410	950,881, 605, 500, 410
Carbonatos	875-850, 1450-1400	-	836, 881, 1380
Bicarbonatos	650-665, 685-720, 820-850, 990-1015	660, 720, 836, 1034	-

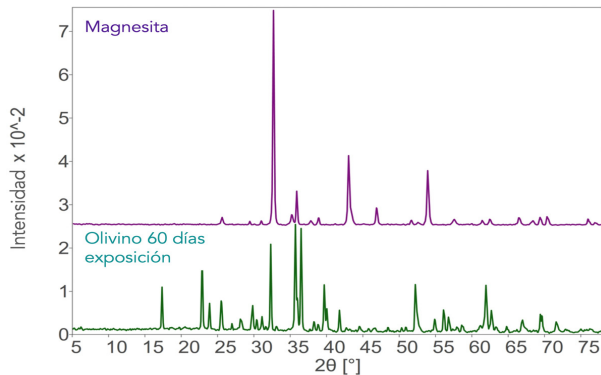


Figura 12. Gráfica comparativa de espectros DRXP del olivino expuesto a alta presión y magnesita (MgCO₃).

Muestra T05

El análisis de T05 expuesta a dióxido de carbono por 21 días no arrojó ninguna evidencia de cambio. Por lo tanto, se llevó a cabo una prueba por 30 días. Después de transcurrido el tiempo de reacción se observó la aparición de vibraciones de bicarbonato; sin embargo, no fue posible corroborar su presencia con otra técnica. La Tabla 6 presenta las señales más representativas para la muestra T05. A los treinta días de exposición la formación de carbonatos aún no es evidente y prevalece la formación de compuestos secundarios y menos estables que los carbonatos. Lo anterior indica que se requiere más tiempo de reacción para las rocas ígneas, como T05, en comparación con el mineral olivino, debido a que T05 se trata de un sistema mucho más complejo y la formación de carbonatos toma más tiempo que para muestras composicionalmente más sencillas como el olivino. En la literatura se ha reportado que la exposición de basaltos a CO₂ puede formar arcillas, zeolitas, wollastonita, hidróxidos de aluminio y hierro, por mencionar algunos minerales, lo cual hace mucho más complejo y lento el proceso de mineralización de CO₂ en rocas ígneas (Zhenxue *et al.*, 2020; Akono *et al.*, 2019; Young *et al.*, 2012).

Tabla 6. Vibraciones infrarrojo para las muestras de roca ígnea antes de ser expuestas (Lafuente <i>et al.</i> , 2015; Lazarev, 1972; Ortiz, 2020; Universidad del País Vasco, 2022; Johnson, 2012).		
Vibración	Referencia	T05, 30 días
Número de onda (cm⁻¹)		
Aluminosilicatos	1200, 1180, 960, 913, 888, 820, 751, 692	1211, 948
Augita	1060, 950, 860, 630, 460	1080, 615, 450
Andesina	1007, 580, 536, 450, 366	1000, 573, 538, 420
Bicarbonatos	650-665, 685-720, 820-850, 990-1015	654, 715, 815, 1080

Tras 30 días de prueba, la muestra T05 se analizó por difracción de rayos X de polvos y se comparó con la muestra sin exponer a dióxido de carbono (Figura 14). Se encontraron pocas diferencias entre los patrones de difracción, como la disminución en la cristalinidad y tres señales en los ángulos 2θ correspondientes a 20°, 34° y 75°. El análisis detallado de esta técnica permitió identificar trazas de arcillas de tipo caolinítico, lo cual coincide con lo discutido previamente. Para esta prueba también se utilizó microscopía electrónica de barrido y los resultados se presentan en la Figura 15; se observaron zonas brillantes en las caras de T05 a 21 y 30 días en comparación con la muestra sin exposición a CO₂; en las zonas brillantes se acumula densidad electrónica alta, lo cual corresponde a elementos de masa molecular elevada, que es el caso de los metales, como el hierro.

Debido a que hubo una disolución de algunas especies minerales al entrar en contacto con el CO₂, éstas se precipitan nuevamente formando sólidos estables. Además, se observó un fragmento amorfo y oscuro, muy diferente a las imágenes vistas anteriormente, que puede estar relacionado con la formación de bicarbonatos. Un análisis más detallado de composición por energía dispersiva (EDS) reveló que el fragmento amorfo estaba compuesto principalmente por átomos de oxígeno, hierro, silicio, aluminio y carbono (38.78, 19.13, 17.36, 9.81 y 2.63 %, respectivamente), además de sodio, magnesio, potasio, calcio y titanio con concentración menor al 2 %.

Caracterización post-CO₂ de líquidos

El agua de los experimentos se recuperó al término de los mismos y fue analizada mediante espectroscopía de plasma inductivo (ICP). Esta técnica permite cuantificar los iones disueltos en el agua, los

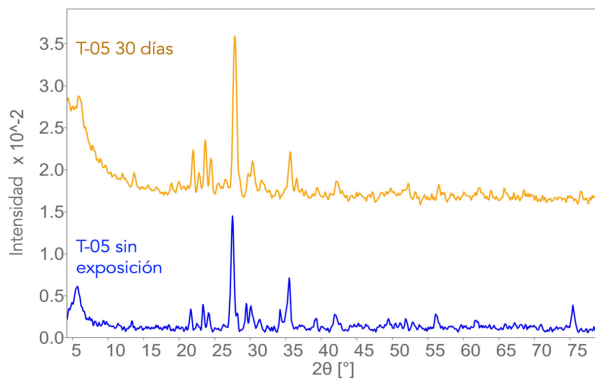


Figura 14. Comparación de espectros DRX de T05 antes y después de ser expuesta a CO₂.

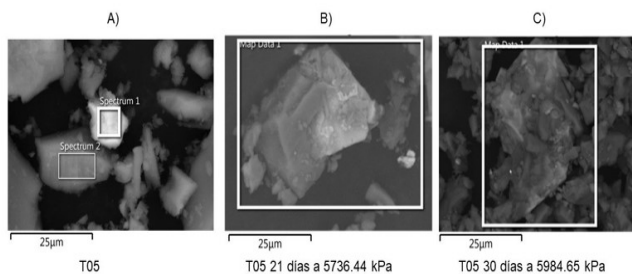


Figura 15. Comparativa de las muestras de roca ígnea después de ser expuestas a CO₂ a condiciones de alta presión. A) muestra T05 sin exposición a dióxido de carbono. B) muestra T05 expuesta a CO₂ acuoso (832 psia; 25 °C) por 21 días. C) muestra T05 expuesta a CO₂ acuoso (868 psia; 25 °C) por 30 días. Los recuadros blancos indican la zona analizada por energía dispersiva para conocer la composición de la muestra.

cuales son producto de la interacción entre las muestras de roca y el CO₂. A continuación se presentan los resultados obtenidos para los experimentos post-exposición a dióxido de carbono para el olivino y T05 a 60 y 30 días, respectivamente (Tabla 7).

Es evidente que la interacción entre el agua ácida y las muestras de roca promueve la liberación de diferentes iones que se solubilizan, lo que confirma que las muestras de roca ígnea empleadas son sensibles al dióxido de carbono acuoso. Algunos de los iones de interés son el Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺ y Si⁴⁺. Sin embargo, con estos datos no podemos conocer la concentración total de iones de interés que se disuelven al entrar en contacto con el CO₂ ni la concentración de iones que se combinan con otras especies en disolución y se reprecipitan en forma de carbonatos, bicarbonatos u otras especies minerales.

Cabe resaltar que la preservación de las muestras es importante para la cuantificación de los elementos; por ejemplo, en el caso del ion hierro, su determinación puede dificultarse, ya que éste se oxida con mucha facilidad produciendo óxidos de hierro (III) que forman sólidos rojizos muy finos. Al comparar los resultados obtenidos con los experimentos a presión elevada contra experimentos a condiciones de presión atmosférica se encontró que para alta presión hay una cantidad mucho menor de iones disueltos en agua. Es probable que las condiciones de alta presión promuevan la reprecipitación de otras especies en mucho menos tiempo, lo cual provoca las bajas concentraciones de hierro encontradas en el agua (Almazán-Mendoza, 2022).

Ion(mg/L)	Agua destilada	Olivino, 60 días	T-05, 30 días
Ca ²⁺	0.088	4.542	7.393
Fe ²⁺	<LPC*	9.106	2.482
Mg ²⁺	0.035	49.092	3.543
K ⁺	<LPC	2.520	0.990
Mn ²⁺	<LPC	0.204	1.278
Na ⁺	<LPC	1.444	2.734
Si ⁴⁺	<LPC	26.017	7.261

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo muestran que las rocas ígneas analizadas presentan propiedades prometedoras para mineralizar CO₂ de manera estable. La magnesita (MgCO₃) identificada en el mineral de referencia indica que es necesario exponer por lo menos 60 días las rocas ígneas, ya que al olivino le tomó este tiempo para mostrar evidencias de mineralización con CO₂. Muy probablemente, la muestra T05 tendrá que exponerse a más de 60 días para observar evidencias de carbonatos debido a su complejidad mineralógica y petrológica. Las muestras de rocas ígneas colectadas en este estudio contienen minerales necesarios para la mineralización de CO₂; sin embargo, son rocas en algunos casos intemperizadas, lo que puede complicar el estudio. Otra característica importante de este tipo de rocas es que son bastante cristalinas: posiblemente el uso de muestras vítreas o vesiculares podrían ser de mayor utilidad para este tipo de experimentos y la obtención de carbonatos y bicarbonatos.

El desarrollo de este tipo de prácticas de laboratorio es altamente recomendable para alumnas y alumnos de servicio social y tesis de licenciatura y posgrado debido a que se requiere de una cantidad importante de horas para los experimentos. Actualmente, se trabaja en el desarrollo de otras propuestas de laboratorio que permitan reducir considerablemente los tiempos con el empleo de ácidos y bases para catalizar la mineralización del dióxido de carbono en el laboratorio, inclusive utilizando condiciones de presión atmosférica. Además, se trabaja en el análisis de las diferentes rocas ígneas del país para identificar localidades y muestras más prometedoras e incrementar las pruebas de laboratorio, con base en el trabajo de Gómez-Tuena *et al.*, (2018).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto PAPIIT IA105621 "Evaluación de rocas ígneas para almacenar dióxido de carbono a través de la formación de carbonatos", así como al Dr. Samuel Tehuacanero Cuapa (Instituto de Física, UNAM), a la Mtra. Adriana Tejada Cruz (Instituto de Ingeniería de Materiales, UNAM), al M. en C. Javier Tadeo León (Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, UNAM), al Q. Rufino Lozano Santa Cruz (Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía, UNAM) y a la Dra. Teresa Pi Puig (Instituto de Geología, UNAM) por el apoyo durante los análisis de las muestras. AMJH agradece el apoyo de Julieta Villegas González y Hugo Sandoval Colín. Se agradece a los revisores, especialmente a Moisés Dávila Serrano, por sus valiosos comentarios para mejorar este trabajo.

REFERENCIAS

- Akono, A.T., Druhan, J. L.; Davila, G.; Tsotsis, T.; Jessen, K.; Werth, C. J., (2019). A review of geochemical-mechanical impacts in geological carbon storage reservoirs. *Greenhouse Gases-Science and Technology*, 9 (3), 474-504. DOI: 10.1002/ghg.1870
- Almazán-Mendoza, J. (2022). Identificación de parámetros físicos para la mineralización de CO₂ en olivino y rocas ígneas. [Tesis de licenciatura, UNAM].
- Cantú-Apodaca, E. (2018). Análisis de la factibilidad para la eliminación de dióxido de carbono mediante la formación de carbonatos a través de basaltos. [Tesis de licenciatura, UNAM].
- Carbfix. (2023). How it works. Carbfix.Com. Enerdata. (2023). Producción energética total. Datos.enerdata. <https://datos.enerdata.net/energia-total/produccion-energetica-mundial.html>
- Gadikota, G., Matter, J., Kelemen, P., Brady, P. v., Park, A. H. A. (2020). Elucidating the differences in the carbon mineralization behaviors of calcium and magnesium bearing aluminosilicates and magnesium silicates for CO₂ storage. *Fuel*, 277, 0016-2361. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117900>
- Global CCS Institute (2020). Remove: Carbon Capture and Storage. globalccsinstitute.com.
- Gómez-Tuena, A., Mori, L. y Straub, S. M. (2018). Geochemical and petrological insights into the tectonic origin of the Transmexican Volcanic Belt. *Earth-Science Reviews*, 183, 153–181.
- IEA. (2022). CO₂ Capture and Utilisation. iea.org.
- Johnson, J. (2012). Thermal infrared spectra of experimentally shocked andesine anorthosite. *Icarus*, 221, 359-364. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.08.012>
- Kwon S., Fan M., DaCosta H. F. M., y Russell A. G. (2011). Factors affecting the direct mineralization of CO₂ with olivine. *Journal of Environmental Sciences*, 23(8), 1233–1239. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60555-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60555-4)
- Macías-Navarro L. (2020) *Revista México Actúa*. Número 1, 4 – 6.
- McGrail, B. P., Schaef, H. T., Spane, F. A., Horner, J. A., Owen, A. T., Cliff, J. B., Qafoku, O., Thompson, C. J., y Sullivan, E. C. (2017). Wallula Basalt Pilot Demonstration Project: Post-injection Results and Conclusions. *Energy Procedia*, 114, 5783–5790. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1716>
- MeCCS. (s.f.). CCS y sostenibilidad. Meccs.Org.Mx. Consultado el 10 de febrero de 2023.
- Naciones Unidas. (2023). COP26: Juntos por el planeta: un.org
- Raza, A., Glatz, G., Gholami, R., Mahmoud, M., y Alafnan, S. (2022). Carbon mineralization and geological storage of CO₂ in basalt: Mechanisms and technical challenges. *Earth-Science Reviews*, 229, 0012-8252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104036>
- Ritchie H., Roser M., y Rosado P. (2022)- "Energy". Ourworldindata.
- Secretaría de Energía. (2018). Mapa de Ruta Tecnológica, CCUS.
- Shukla, R., Rankith, P., Haque, A., Choi, X., (2010). A review of studies on CO₂ sequestration and caprock integrity. *Fuel*, 89, 2651-2664. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.05.012>
- Snæbjörnsdóttir, S., Sigfússon, B., Marieni, C., Goldberg, D., Gislason, S. R., y Oelkers, E. H. (2020). Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nature Reviews Earth and Environment*, 1(2), 90–102. <https://doi.org/10.1038/s43017-019-0011-8>
- Staib, C., Zhang, T., Burrows, J., Gillespie, A., Havercroft, I., Rassool, D., Consoli, C., Liu, H., Erikson, J., Loria, P., Nambo, H., Wu, Y., Judge, C., y Gebremedhin, R. (2021). Global Status of CCS 2021.
- White, S. K., Spane, F. A., Schaef, H. T., Miller, Q. R. S., White, M. D., Horner, J. A., y McGrail, B. P. (2020). Quantification of CO₂ Mineralization at the Wallula Basalt Pilot Project. *Environmental Science and Technology*, 54 (22), 14609–14616. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c05142>
- Young-Shin J., Giammar D., y C. J. Werth. (2012). Impacts of Geochemical Reactions on Geologic Carbon Sequestration. *Environmental Science and Technology* 47 (1), 3-8. <https://doi.org/10.1021/es3027133>
- Zanettin B. (1984). Proposed New Chemical Classification of Volcanic Rocks. *Journal of International Geoscience*, 7 (4), 19-19. <https://doi.org/10.18814/epiugs/1984/v7i4/003>
- Zhenxue D., L. Xu, T. Xiao, B. McPherson, X. Zhang, L. Zheng, S. Dong, Z. Yang, M. R. Soltanian, C. Yang, W. Ampomah, W. S. Yin, T. Xu, D. Bacon, H. Viswanathan. (2020). Reactive chemical transport simulations of geologic carbon sequestration: Methods and applications. *Earth-Science Reviews*, 208, 0012-8252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103265>

Manuscrito recibido: 18 de abril de 2023

Manuscrito corregido recibido: 18 de mayo de 2023

Manuscrito aceptado: 26 de mayo de 2023