Capacidad de almacenamiento mineral de CO_2 en la Metaharzburgita de Medellín basada en modelamiento termodinámico

*Sergio Molina Valenzuela[1]; David Santiago Avellaneda-Jiménez[2]

[1]Escuela de Geología, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. smolinav2@eafit.edu.co

[2]Área de Sistemas Naturales y Sostenibilidad, Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia. dsavellanj@eafit.edu.co

*Autor de correspondencia: Sergio Molina smolinav2@eafit.edu.co

Resumen. El contenido de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera registrado para el año 2024 fue de 37,8 Gt, lo que supera en más del 50% los niveles preindustriales, acentuando la crisis climática global. El almacenamiento de CO_2 en fases minerales forma parte de las alternativas para contrarrestar el impacto de las emisiones de CO_2 antropogénico. En este estudio se presentan estimaciones del potencial de almacenamiento de CO_2 en carbonatos en la Metaharzburgita de Medellín, Colombia, mediante modelamiento termodinámico (equilibrio de fases) para el rango 50-300 bares y 30-100 °C. Los resultados indican que hasta un ~10,5 vol.% de carbonatos podrían teóricamente equilibrarse, almacenando entre 0,1251-0,1971 tCO_2/m^3 con máximos teóricos entre 5,3-8,4 $GtCO_2$. Al emplear un enfoque más conservador, el cual considera un 10% del volumen de la unidad disponible para almacenamiento, el total desciende a 533-840 $MtCO_2$. Esto implica que bastaría un volumen del 0,121% para contrarrestar las emisiones anuales del Valle de Aburrá, lo cual demuestra que la Metaharzburgita de Medellín es un reservorio con potencial de almacenamiento de CO_2 para Colombia.

Palabras clave: Metaharzburgita de Medellín, CO_2, secuestro de carbono, cambio climático.

IN PRESS

Abstract. CO_2 mineral storage capacity in the Medellín Metaharzburgite based on thermodynamic modeling. The atmospheric carbon dioxide (CO_2) content recorded for 2024 was 37.8 Gt, exceeding pre-industrial levels by more than 50% and accelerating the global climate crisis. CO_2 storage in mineral phases is one of the alternatives to counteract the impact of anthropogenic CO_2 emissions. This study estimates the potential for CO_2 storage in carbonates in the Metaharzburgite of Medellín, Colombia, through thermodynamic modeling (phase equilibrium) in the range 50-300 bar and 30-100 °C. Our results demonstrate that up to ~10.5 vol.% of carbonates could theoretically equilibrate, storing between 0.1251 and 0.1971 tCO_2/m^3, with a theoretical maximum of 5.3-8.4 $GtCO_2$. By adopting a more conservative approach (maximum of 10% of the unit's storage volume), the total storage is 533-840 $MtCO_2$. This means that a volume of 0.121% would suffice to compensate the annual emissions of the Aburrá Valley, demonstrating that the Metaharzburgite of Medellín is a reservoir with CO_2 storage potential for Colombia.

Key words: Metaharzburgite of Medellín, CO_2, carbon sequestration, climate change.

1. Introducción

En 2024, las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono (CO_2), alcanzaron los 37,8 Gt, sobrepasando en un 50% los niveles preindustriales (United Nations Environment Programme [UNEP], 2023, 2024; Friedlingstein et al., 2025; International Energy Agency [IEA], 2025). El CO_2 atmosférico es una de las causas fundamentales de la contaminación del aire, acidificación de los océanos, calentamiento global y cambio climático. Su exceso desencadena un desequilibrio en los patrones climáticos, reflejados mediante eventos meteorológicos súbitos, inminentes y extremos (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2014, 2021, 2022; Boehm et al., 2023). Actividades antropogénicas, como la quema de

IN PRESS

combustibles fósiles, deforestación y producción industrial, aumentan las emisiones globales de CO_2, contribuyendo significativamente al cambio climático (Boehm et al., 2023; UNEP, 2023; IEA, 2025).

La transición energética prevista globalmente (i.e., incorporación significativa de energías renovables a la matriz energética) tiene un impacto significativo en la disminución de las emisiones de CO_2 asociadas al uso de combustibles fósiles (Chavarry Vallejos et al., 2023; IEA, 2025; Jiménez Cazar et al., 2025). Asimismo, alternativas como el secuestro de carbono se han incentivado para contrarrestar el impacto de gases de efecto invernadero durante dicha transición (IPCC, 2005; Boyd et al., 2017; Samaniego et al., 2021). La Captura y Almacenamiento de CO_2 (CCS) se fundamenta en atrapar el dióxido de carbono y almacenarlo de forma segura y prolongada en el tiempo (Bachu, 2000; IPCC, 2005). Una de las formas más seguras de almacenamiento consiste en secuestrar CO_2 en el subsuelo, es decir, en unidades geológicas. Estas unidades pueden corresponder a rocas cristalinas (basaltos o peridotitas, por ejemplo), en las que mediante reacciones de carbonatación el carbono se fija en minerales carbonatados como calcita o magnesita (Keppler et al., 2003; Kelemen y Matter, 2008; Matter et al., 2016; Nisbet et al., 2024), o bien a rocas sedimentarias de alta porosidad/permeabilidad, como las presentes en campos agotados de petróleo y gas, sistemas acuíferos salinos o secuencias con capas de carbón no explotables (De Silva et al., 2011; Preston et al., 2018; Equinor, 2025; Fang et al., 2025).

Las tecnologías de almacenamiento en unidades geológicas son pioneras a nivel internacional. Proyectos como Petra Nova en Estados Unidos, Project Hajar en Omán, Carbix en Islandia, Boundary Dam en Canadá, demuestran la viabilidad de almacenar CO_2 en rocas cristalinas y sedimentarias (Jenkins, 2015; Preston et al., 2018; Nisbet et al., 2024; Equinor, 2025). Para el caso colombiano, esta alternativa es altamente atractiva por su contexto geológico. Por ejemplo, el

IN PRESS

basamento de la Cordillera Occidental, el flanco occidental de la Cordillera Central, y áreas en los sectores de los márgenes Pacífico y Caribe, cuentan con grandes acumulaciones de basaltos, así como múltiples unidades de composición ultramáfica (Fig. 1), por lo que representan unidades con potencial para secuestrar CO_2. Además, secuencias sedimentarias aptas para almacenar CO_2 se encuentran distribuidas a lo largo de todo el país, particularmente en sectores de la Cordillera Oriental, las cuencas de Los Llanos y Magdalena, y el margen Caribe (Fig. 1).

El gobierno colombiano está incorporando una regulación para la aplicación de este tipo de estrategias de transición energética mediante la Ley 2.099 del año 2021 (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2021). En paralelo, trabajos de investigación están contribuyendo a estimar la aplicabilidad teórica del almacenamiento mineral de CO_2 en rocas máficas, ultramáficas y sedimentarias (e.g., Agencia Nacional de Hidrocarburos [ANH], 2024; Gómez-Ruiz et al., 2025). Sin embargo, para el caso de secuestro en fase mineral, no existe actualmente una evaluación termodinámica que defina cuánto CO_2 pueden atrapar los carbonatos ante las condiciones de presión y temperatura típicas de las unidades cristalinas de interés (e.g., rocas ultramáficas en Colombia). Esto último ha imposibilitado estimar la capacidad total de almacenamiento de carbono en unidades geológicas en Colombia y ha limitado la aplicabilidad de esta alternativa estratégica para el territorio nacional.

Este estudio presenta estimaciones teóricas del potencial de almacenamiento de CO_2 en carbonatos de la unidad geológica Metaharzburgita de Medellín desde una perspectiva de equilibrio termodinámico. Después de modelar el almacenamiento en fase mineral, se discute la capacidad de almacenamiento por unidad de volumen (tCO_2/m^3) y total ($MtCO_2$) para esta unidad. Los resultados muestran valores prometedores, donde un máximo del 10% en volumen de la unidad bastaría para atrapar entre 533 y 840 $MtCO_2$. Asimismo, un volumen de solo 0,121% sería

IN PRESS

suficiente para contrarrestar las emisiones anuales del Valle de Aburrá, concluyendo que la Metaharzburgita de Medellín corresponde a un reservorio con potencial de almacenamiento de CO_2 para Colombia**.**

2. Zona de estudio

La Metaharzburgita de Medellín se ubica en el flanco occidental de la Cordillera Central de Colombia (Fig. 1). Corresponde a un cuerpo alargado latitudinalmente, de edad Triásica y compuesto por al menos 3 subunidades independientes, las que conjuntamente cubren un área total de ~71 km^2 (Botero, 1963; Naciones Unidas, 1976; Álvarez, 1987; Restrepo, 2008; García-Casco et al., 2020). Esta unidad ha tenido varios nombres; originalmente se la conocía como dunita tectónica (Botero, 1963; Alvares, 1982, 1987), mientras que estudios posteriores la denominaron dunita serpentinizada y metadunita de Medellín debido a la presencia de minerales metamórficos (e.g., Rodríguez et al., 2005; Restrepo, 2008). El nombre Unidad Metaharzburgítica de Medellín fue introducido por García-Casco et al. (2020), derivado de un análisis mineralógico y geoquímico de detalle. En este trabajo, y por simplicidad, se usará el nombre Metaharzburgita de Medellín.

Desde un punto de vista mineralógico, la unidad está mayormente constituida por olivino y serpentina, aunque también se ha reportado presencia de piroxeno, tremolita, talco, clorita, espinela y carbonato (Rodríguez et al., 2005; García-Casco et al., 2020). Para este estudio es de alto interés el reporte de venillas de carbonato (calcita, dolomita y magnesita) que aparecen ocasionalmente, aunque sin superar el ~1% del volumen de la roca (e.g., Rodríguez et al., 2005; García-Casco et al., 2020). La presencia de estos minerales sugiere el potencial de la unidad para cristalizar carbonatos bajo las condiciones adecuadas, viabilizando el secuestro de carbono.

IN PRESS

Estructuralmente, la unidad presenta un alto grado de fracturamiento, posiblemente asociado a fallas regionales como la Falla de Rodas, lo que favorecería la circulación de fluidos. La disposición preferencial del diaclasamiento es ~N-S con buzamientos tanto NO como SE, y está posiblemente relacionado con el desarrollo de un sistema pseudokarstico (Patiño-Rojas et al., 2021). Aunque en este estudio no se aborda la permeabilidad de la unidad, es un factor muy importante en la transmisividad, acumulación e incorporación en fase mineral de CO_2.

3. Metodología

El modelamiento termodinámico se realizó mediante el programa Perple_X (Connolly, 2005), el cual permite modelar el equilibrio de fases minerales en un sistema químico específico de una roca (pseudosección). El modelo se construyó para un rango de presiones de 50 a 300 bares, lo cual equivale a ~154-926 m de profundidad si se considera una densidad promedio para la Metaharzburgita de 3,3 t/m^3. Se asumió un espesor promedio para la roca de ~0,6 km (Casas y Monsalve, 2017) y un gradiente geotérmico de 35 °C/km (Mejía-Fragoso et al., 2024), lo que condicionó un rango de temperatura de 30-100 °C como dominio exploratorio dentro del modelo. Se seleccionó un sistema químico representativo de composiciones ultramáficas, con participación de SiO_2, Al_2O_3, FeO, MgO, CaO y CO_2. La base termodinámica, así como los modelos de solución para olivino, clinopiroxeno, ortopiroxeno y espinela, se determinaron a partir de Holland y Powell (1996, 1998, 2003).

La estabilidad de los carbonatos se determinó mediante el uso de 3 modelos de solución distintos: Do(HP), M(HP), oCcM(HP). La química general de cada modelo de carbonato es (Holland y Powell, 1998, 2003):

IN PRESS

Do(HP) – dolomita (Ca-Mg-Fe) → $Ca(Mg_xFe_{1-x})(CO_3)_2$

M(HP) – magnesita-siderita (Mg-Fe) → $(Mg_xFe_{1-x})CO_3$

oCcM(HP) – calcita-magnesita (Ca-Mg) → $(Ca_{1-x}Mg_x)CO_3$

La composición química de las rocas a modelar se basó en una recopilación de 48 análisis reportados para la Metaharzburgita (Botero, 1963; Álvarez, 1987; Rodríguez et al., 2005; Pereira et al., 2006; Restrepo, 2008; Hernández-González, 2014; González-Ospina, 2016; García-Casco et al., 2020). Estos datos fueron normalizados al sistema químico definido arriba y se calculó una composición química promedio (Tabla 1). Posteriormente, se seleccionaron las 13 composiciones que presentaran mayor variabilidad, medida como la distancia composicional de la norma L1 con respecto a la composición química promedio. Las muestras escogidas fueron AC35A, AL-166960, AL-166961, AL-166971, RO-705731, RO-705535, RO-705603, JJ1422-B, LP-1, AL-174567, AL-174569, 665-A y LP-7, las cuales abarcan las variaciones composicionales típicas presentes en las reacciones de carbonatación (Tabla 1).

Las composiciones químicas fueron normalizadas para incluir un 5% de CO_2 (porcentaje en peso) como componente puro en un sistema cerrado. Esta elección se sustenta en pruebas preliminares de sensibilidad y estudios como los de Wyllie y Huang (1975), quienes mostraron que un 5% de CO_2 favorece el equilibrio y la estabilización de las asociaciones carbonatadas en rocas ultramáficas. Debido a que el programa Perple_X estima la cantidad de carbonato en volumen porcentual (vol.%) para un rango de presión y temperatura determinados, los cálculos de almacenamiento de CO_2 por unidad de volumen (tCO_2/m^3) y almacenamiento total ($MtCO_2$) se estimaron como:

$$tCO_2/m^3 = \frac{V_c}{100} \times \rho_c \times \frac{M_{CO_2}}{M_c} \quad \textbf{(1)}$$

IN PRESS

$$MtCO_2 = A \times h \times tCO_2/m^3 \quad \textbf{(2)}$$

En la Ecuación 1, V_c es el volumen porcentual de carbonato en la roca (vol.%), ρ_c es la densidad del carbonato (t/m^3), M_{CO_2} es la masa molar del CO_2 (44,01 g/mol) y M_c es la masa molar del carbonato, las cuales fueron definidas como constantes para calcita (2,71 t/m^3), magnesita (3,02 t/m^3) y dolomita (2,85 t/m^3). En la ecuación 2, A es el área superficial del cuerpo (m^2) y h su espesor (m). De estudios anteriores se estimó un área total de ~71 km^2 y un espesor máximo de ~0,6 km, lo cual implica un volumen de ~42,6 km^3 (Casas y Monsalve, 2017; García-Casco et al., 2020; Patiño-Rojas et al, 2021).

4. Resultados

4.1 Selección de muestras

La composición promedio, resultante de la normalización de las 48 muestras, es: SiO_2 42,68%, Al_2O_3 1,67%, FeO 8,96%, MgO 45,11% y CaO 1,04% (porcentajes en peso). Las 13 muestras con mayor variabilidad con respecto al promedio (norma L1) se agruparon en dos conjuntos de datos. El primero comprende 9 ejemplares con composiciones típicas del cuerpo ultramáfico sin aparente metasomatismo (AC35A, AL-166960, AL-166961, AL-166971, RO-705731, RO-705535, RO-705603, JJ1422-B y LP-1) (cf. García-Casco et al., 2020). El segundo conjunto de muestras (AL-174567, AL-174569, 665-A y LP-7) contrasta químicamente con las demás debido a su alteración (Botero, 1963; Álvarez, 1987; Hernández-González, 2014; García-Casco et al., 2020). Al comparar estos valores con las composiciones de las muestras alteradas, se observan valores de SiO_2 en su mayoría bajos (~37%), valores mayores de Al_2O_3 (<10,46%), valores de CaO hasta 5 veces superiores (~5,54%), valores de FeO hasta 15,23%, y valores de MgO hasta 32,65%.

IN PRESS

4.2 Modelamiento termodinámico

En los tres modelos de solución: Do(HP), M(HP) y oCcM(HP), los carbonatos se generan a presiones y temperaturas típicas de profundidades someras (<1 km). Para rocas carentes de metasomatismo, el carbonato capaz de equilibrarse varía entre 10,49 y 10,55 vol.% (Fig. 2A-C). Por otra parte, al considerar las muestras metasomáticas, se obtiene un mayor porcentaje de carbonatos en equilibrio (12,5 vol.%; Fig. 2D-F). Con estos valores se calculó la cantidad de CO_2 si se mineralizara calcita para un 1-100% de la unidad empleando un 10.5 vol.% como caso conservador y un 12.5 vol.% para un caso optimista (Fig. 3). Este aumento porcentual se relaciona con el enriquecimiento en CaO y FeO, lo cual propicia la estabilidad de los carbonatos que se observan en las rocas alteradas, donde el Ca favorece la cristalización de calcita y dolomita, mientras que el Fe puede incorporarse como ankerita o siderita. Colectivamente, este enriquecimiento aumenta la capacidad de almacenamiento mineral. Al analizar las muestras sin alteración, se evidencia una dispersión alta, con coeficientes de correlación generalmente bajos (Fig. 4A). Para todas las muestras, en cambio, estos coeficientes son más elevados, observándose tendencias positivas para Al_2O_3, FeO y CaO, y negativas para SiO_2 y MgO (Fig. 4B), repitiéndose esta tendencia para todos los modelos de solución.

Por otro lado, si bien los modelos de solución mostraron una zona de estabilidad y asociaciones minerales similares (Fig. 5), se seleccionó la muestra promedio del conjunto de datos y se utilizó el modelo Do(HP) para prefigurar las interacciones entre el Ca, Mg y Fe en las fases carbonatadas.

4.3 Cálculo del atrapamiento del CO_2

Para los principales modelos de solución, los minerales formados son especialmente calcita, magnesita y dolomita. Para una muestra típica, la calcita presenta una diferencia de ~0,04 tCO_2/m^3

IN PRESS

con respecto a la magnesita y ~0,02 tCO_2/m^3 con respecto a la dolomita, mientras que la diferencia entre la magnesita y la dolomita es de ~0,02 tCO_2/m^3 (Tabla 2). La magnesita es la fase con mayor capacidad de almacenamiento de CO_2 por unidad de volumen.

Con respecto al almacenamiento total ($MtCO_2$), al utilizar el modelo de calcita con el menor porcentaje de carbonato equilibrado (0,1251 tCO_2/m^3; Tabla 2), el cual representa un escenario conservador, la capacidad máxima de la Metaharzburgita alcanza los 5.329 $MtCO_2$. No obstante, al considerar almacenamientos más realistas para volúmenes entre 1 y 10% de la unidad, se obtienen valores entre ~53 y ~533 $MtCO_2$, respectivamente (Fig. 2A). Por otra parte, estimaciones entre ~63 y ~634 $MtCO_2$ se obtienen para el modelo de calcita con el mayor porcentaje de carbono equilibrado (0,1489 tCO_2/m^3; Tabla 2) a volúmenes de roca entre 1 y 10%, respectivamente (Fig. 2B). El mismo cálculo realizado para el modelo de magnesita ante un 12,5 vol.% de carbonatos en equilibrio entrega estimaciones entre ~84 y ~840 $MtCO_2$ para volúmenes entre 1 y 10%. El almacenamiento total teórico en este último caso asciende a ~8.396 $MtCO_2$.

5. Discusión

Los resultados obtenidos para la Metaharzburgita de Medellín muestran que se pueden equilibrar entre 10,5-12,5 vol.% de carbonatos, siendo mayor en aquellas rocas con metasomatismo intenso, es decir, rocas caracterizadas por contenidos elevados de Al_2O_3, FeO y CaO. La cristalización de la fase carbonatada es indistinta del modelo de solución, comportándose de manera similar dentro de los rangos de presión y temperatura estudiados. En consecuencia, dentro de la Metaharzburgita, las zonas más intensamente metasomatizadas corresponderían a aquellas con mayor potencial de secuestro de CO_2.

IN PRESS

La estimación del potencial de almacenamiento de CO_2 en carbonatos indica que la Metaharzburgita puede secuestrar entre 0,1251 y 0,1971 tCO_2/m^3 y entre 5,3 y 8,4 $GtCO_2$ como almacenamiento teórico máximo bajo condiciones de equilibrio termodinámico usando los modelos de calcita y magnesita. Estos valores son realistas si se comparan con aquellos reportados en otros lugares del mundo. En Omán, por ejemplo, se han calculado hasta ~2 tCO_2/m^3 de carbonatos en peridotitas (Kelemen y Matter, 2008), mientras que en Islandia se han logrado capturar hasta ~0,1 tCO_2/m^3 en basaltos porosos (Matter et al., 2016). Estos rangos muestran que la carbonatación depende de la mineralogía y permeabilidad de las rocas estudiadas (Shcheka et al., 2006; Kelemen y Matter, 2008; Falk y Kelemen, 2015). Aunque la peridotita de Omán y los basaltos de Islandia corresponden a contextos geológicos/operativos diferentes, ambos indican que el equilibrio termodinámico de carbonatación para un sistema somero se explica por la composición/alteración del cuerpo ultramáfico y por las condiciones termodinámicas modeladas.

Estudios anteriores en la zona, los cuales emplearon una formulación volumétrica simplificada, estimaron una capacidad teórica de ~670 $MtCO_2$ para la Metaharzburgita asumiendo un 10% de porosidad y un 0,5% de eficiencia de reacción (ANH, 2024). A pesar de que en esas estimaciones no se consideraron variaciones mineralógicas ni termodinámicas, corresponden a valores complementarios y comparables con los obtenidos en el presente trabajo, ya que, para el modelo de calcita, se obtiene un almacenamiento total de ~533 $MtCO_2$ para las zonas sin metasomatismo y ~634 $MtCO_2$ para las zonas con metasomatismo al considerar un 10% del volumen de la unidad.

En rocas ultramáficas, el fracturamiento intenso y la presencia de un sistema pseudokárstico pueden incrementar el área de interacción entre los fluidos circulantes y la roca, contribuyendo a la generación de reacciones de carbonatación (Kelemen y Matter, 2008; Matter et al., 2016). Asimismo, la reactividad de las fases carbonatadas del Mg, Fe y Ca es mayor en las zonas más

IN PRESS

metasomatizadas, lo cual puede crear microfracturas que permiten la nucleación de carbonatos, tal como se ha reconocido en peridotitas carbonatadas (Rudge et al., 2010). El almacenamiento de CO_2, en consecuencia, no solo depende del grado de fracturamiento de la roca, sino de factores cinéticos, circulación de fluidos y de cómo el sistema evoluciona en el tiempo (Beinlich et al., 2010; Kelemen et al., 2020).

Desde una perspectiva de implementación, el desarrollo de un proyecto de CCS se alinea con las estrategias globales de mitigación climática (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2015), así como con la estrategia de carbono neutralidad de Colombia para el 2050 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2024). Además de los beneficios ambientales y socioeconómicos, la carbonatación del CO_2 se considera como uno de los métodos más seguros, ya que fija el carbonato a escalas de tiempo de millones de años (Matter et al., 2016). Puede, por ende, reconocerse como una herramienta para descarbonizar sectores industriales (McLaughlin et al., 2023).

El almacenamiento de CO_2 abre puertas a mercados internacionales al generar créditos de carbono de alta permanencia, debido a que se agrupa dentro de las tecnologías de Carbon Dioxide Removal (CDR) al permitir la supresión de CO_2 mediante la trasformación a carbonatos estables (IPCC, 2024). En comparación con las alternativas naturales, la carbonatación se posiciona como una oportunidad para el mercado de bonos de carbono duraderos con altos estándares de seguridad, ya que se garantiza una permanencia superior al 99% sin riesgo de reversión (IPCC, 2024). La carbonatación es incluso más segura que el almacenamiento en campos de petróleo o acuíferos salinos (Oldenburg et al., 2011; Ringrose et al., 2013).

Finalmente, con respecto a su impacto directo, la Metaharzburgita podría utilizarse para contrarrestar las emisiones del Valle de Aburrá, que comprende todos los municipios circundantes

IN PRESS

a la unidad y que para el año 2019 fueron del orden de 6.432.119 tCO_2 (MDDS, 2021). Estas emisiones equivalen al almacenamiento teórico en un 0,121% del volumen de la Metaharzburgita al considerar el modelo de calcita más conservador.

6. Conclusiones

La unidad Metaharzburgita de Medellín posee un alto potencial para el almacenamiento mineral de CO_2, pudiendo almacenar hasta ~5,3-8,4 $GtCO_2$. Desde una perspectiva realista, al considerar solamente el 10% del volumen total de la unidad, se obtiene un almacenamiento entre ~533 y 840 $MtCO_2$. Esto significa que un volumen de un 0,121% bastaría para contrarrestar las emisiones anuales del Valle de Aburrá. Los resultados muestran que las rocas metasomáticas dentro de la unidad son las que más carbonato podrían equilibrar. Se recomienda integrar modelos geológicos tridimensionales para incorporar simulaciones de trasporte reactivo e hidrológicos; esto permitiría evaluar la cinética de la carbonatación bajo condiciones naturales y delimitar las zonas de alteraciones dentro de la unidad.

7. Agradecimientos

A mi familia y amigos por su apoyo y soporte incondicional durante mi proceso académico, el cual me ha permitido alcanzar metas y superar desafíos. A Roxana López, Ana María Mendoza, Daniel Bertin y a cada revisor anónimo expreso mis mas sinceros agradecimientos, cuyos aportes, sugerencias y observaciones al manuscrito permitieron fortalecer su contenido y presentación.

Referencias

Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2024). *Atlas de almacenamiento de CO_2*. https://www.anh.gov.co/documents/29509/Atlas_CO2_Espanol_Interactivo.pdf

IN PRESS

Álvarez, A. J. (1987). Tectonitas dunitas de Medellín, departamento de Antioquia, Colombia. *Boletín Geológico*, 28(3), 9–44. https://doi.org/10.32685/0120-1425/boletingeo.28.3.1987.172

Bachu, S. (2000). Sequestration of CO_2 in geological media: Criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion and Management*, 41(9), 953–970. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00149-1

Beinlich, A., Austrheim, H., Glodny, J., Erambert, M., & Andersen, T. B. (2010). CO_2 sequestration and extreme Mg depletion in serpentinized peridotite clasts from the Devonian Solund Basin, SW-Norway. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74(24), 6935–6964. https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.07.027

Boehm, S., Jeffery, L., Hecke, J., Schumer, C., Jaeger, J., Fyson, C., Levin, K., Nilsson, A., Naimoli, S., Daly, E., Thwaites, J., Lebling, K., Waite, R., Collis, J., Sims, M., Singh, N., Grier, E., Lamb, W., Castellanos, S., … Masterson, M. (2023). *State of climate action 2023*. Bezos Earth Fund, Climate Action Tracker, Climate Analytics, ClimateWorks Foundation, NewClimate Institute, United Nations Climate Change High-Level Champions, & World Resources Institute. https://doi.org/10.46830/wrirpt.23.00010

Botero, G. (1963). Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales de la Facultad de Minas*, 57, 1–101. Universidad Nacional de Colombia.

Boyd, A. D., Liu, Y., Stephens, J. C., Wilson, E. J., Pollak, M., Peterson, T. R., Meadowcroft, J., & Languelle, J. (2017). Public perceptions of carbon capture and storage in Canada: Results of a national survey. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 67, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.10.010

IN PRESS

Casas, J. D. H., & Monsalve, G. (2017). Geological inferences about the upper crustal configuration of the Medellin – Aburra Valley (Colombia) using strong motion seismic records. *Geodesy and Geodynamics*, 9(1), 67–76. https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.06.005

Chavarry Vallejos, C. M., Zavala Loria, J. del C., & Rojo Gutierrez, M. A. (2023). Decarbonization technologies for the reduction of CO_2 emissions in multifamily buildings. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 27(119), 52–62. https://doi.org/10.47460/uct.v27i119.706

Connolly, J. A. D. (2005). Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. *Earth and Planetary Science Letters*, 236(1–2), 524–541. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.04.033

De Silva, P. N. K., Ranjith, P. G., & Choi, S. K. (2011). A study of methodologies for CO_2 storage capacity estimation of coal. *Fuel*, 91(1), 1–15. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.07.010

Departamento Administrativo de la Función Pública. (2021). *Ley 2099 de 2021: Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y otras disposiciones*. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=166326

Equinor. (2025, 28 de marzo). *Investing NOK 7.5 billion in expansion of the groundbreaking Northern Lights CCS-project*. https://www.equinor.com/news/20250327-northern-lights-phase-2

Falk, E. S., & Kelemen, P. B. (2015). Geochemistry and petrology of listvenite in the Samail ophiolite, Sultanate of Oman: Complete carbonation of peridotite during ophiolite emplacement. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 160, 70–90. https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.03.014

IN PRESS

Fang, Z., Yang, C., & Wang, R. (2025). Monitoring technologies for CO_2 storage in coal seams and enhanced coalbed methane recovery: A review of field applications. *Fuel Processing Technology*, 276, Artículo 108274. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2025.108274

Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Landschützer, P., Quéré, C. L., Li, H., Luijkx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., … Zeng, J. (2025). Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*, 17(3), 965–1039. https://doi.org/10.5194/essd-17-965-2025

García-Casco, A., Restrepo, J. J., Correa-Martínez, A. M., Blanco-Quintero, I. F., Proenza, J. A., Weber, M., & Butjosa, L. (2020). The petrologic nature of the "Medellín Dunite" revisited: An algebraic approach and proposal of a new definition of the geological body. En J. Gómez & A. O. Pinilla-Pachón (Eds.), *The Geology of Colombia* (Vol. 2: Mesozoic, pp. 45–75). Servicio Geológico Colombiano. https://doi.org/10.32685/pub.esp.36.2019.02

Gómez, J., Montes, N. E., & Marín, E. (Comps.). (2023). *Mapa geológico de Colombia 2023* (Escala 1:1 500 000). Servicio Geológico Colombiano.

Gómez-Ruiz, J. D., Vargas-Jiménez, C. A., & Cómbita-Quigua, J. F. (2025). Modelamiento geológico para la estimación del potencial de almacenamiento de CO_2 en un área ubicada al sur de la cuenca del Valle Inferior del Magdalena, Colombia. *Boletín de Geología*, 47(1), 93–103. https://doi.org/10.18273/revbol.v47n1-2025005

González-Ospina, L. J. (2016). *Petrogénesis de los complejos ultramáficos de Heliconia–Angelópolis y del oriente de Medellín, Antioquia, Colombia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL.

IN PRESS

Hernández-González, J. S. (2014). *Mineralizaciones de Cr y elementos del grupo del platino (EGP) asociadas a las Metaperidotitas de Medellín, Colombia* [Tesis de maestría, Universidad de Barcelona y Universidad Autónoma de Barcelona].

Holland, T., & Powell, R. (1996). Thermodynamics of order-disorder in minerals. 2. Symmetric formalism applied to solid solutions. *American Mineralogist*, 81(11–12), 1425–1437. https://doi.org/10.2138/am-1996-11-1215

Holland, T. J. B., & Powell, R. (1998). An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3), 309–343. https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1998.00140.x

Holland, T., & Powell, R. (2003). Activity-composition relations for phases in petrological calculations: An asymmetric multicomponent formulation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145(4), 492–501. https://doi.org/10.1007/s00410-003-0464-z

International Energy Agency. (2025). *Global energy review 2025*. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2005). *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono* (Informe del Grupo de Trabajo III del IPCC). https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (R. K. Pachauri & L. A. Meyer, Eds.). IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang,

IN PRESS

K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Eds.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Summary for policymakers. En P. R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley (Eds.), *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1–48). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157926.001

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2024). Carbon dioxide removal & geological storage: Background for policymakers. En *Background paper to the Expert Meeting on Carbon Dioxide Removal Technologies*. IPCC. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/mtdocs/pdfiles/2407_Background_CDR_CCUS.pdf

Jenkins, J. (2015). *Financing mega-scale energy projects: A case study of the Petra Nova carbon capture project* (Case Study). CEO Council for Sustainable Urbanization. https://www.paulsoninstitute.org/wp-content/uploads/2015/10/CS-Petra-Nova-EN.pdf

Jiménez Cazar, B. N., Gómez Moyano, J. A., Ramírez Ruiz, J. L., & Vera García, J. A. (2025). Impacto de las tecnologías de energía renovable en la mitigación del cambio climático: Una revisión de literatura de los últimos 5 años. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(3), 1504–1523. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i3.17760

Kelemen, P. B., & Matter, J. (2008). In situ carbonation of peridotite for CO_2 storage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(45), 17295–17300. https://doi.org/10.1073/pnas.0805794105

IN PRESS

Kelemen, P. B., McQueen, N., Wilcox, J., Renforth, P., Dipple, G., & Vankeuren, A. P. (2020). Engineered carbon mineralization in ultramafic rocks for CO_2 removal from air: Review and new insights. *Chemical Geology*, 550, Artículo 119628. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119628

Keppler, H., Wiedenbeck, M., & Shcheka, S. S. (2003). Carbon solubility in olivine and the mode of carbon storage in the Earth's mantle. *Nature*, 424(6947), 414–416. https://doi.org/10.1038/nature01828

Matter, J. M., Stute, M., Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Oelkers, E. H., Gíslason, S. R., Aradóttir, E. S., Sigfússon, B., Gunnarsson, I., Sigurðardóttir, H., Gunnlaugsson, E., Axelsson, G., Alfredsson, H. A., Wolff-Boenisch, D., Mesfin, K., Taya, D. F. D. L. R., Hall, J., Dideriksen, K., & Broecker, W. S. (2016). Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*, 352(6291), 1312–1314. https://doi.org/10.1126/science.aad8132

McLaughlin, H., et al. (2023). *Carbon capture, utilisation & storage in the energy transition*. Energy Transitions Commission. https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2022/08/ETC-CCUS-Report-V1.9.pdf

Mejía-Fragoso, J. C., Flórez, M. A., & Bernal-Olaya, R. (2024). Predicting the geothermal gradient in Colombia: A machine learning approach. *Geothermics, 122*, 103074. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103074

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Cambio climático: Valle de Aburrá cuenta con diagnóstico de emisiones de gases*. https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/4990-cambio-climatico-valle-de-aburra-cuenta-con-diagnostico-emisiones-de-gases

IN PRESS

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). *Estrategia Climática de Largo Plazo de Colombia E2050*. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2024/12/2.-Estrategia-Climatica-de-Largo-Plazo-de-Colombia-E2050.pdf

Naciones Unidas. (1976). *Evaluaciones de lateritas niquelíferas en los departamentos de Córdoba y Antioquia. Investigación detallada de los cuerpos ultrabásicos de Medellín (Departamento de Antioquia)* (Informe Técnico DP/UN/COL-72-005/8 I-1721).

Nisbet, H., Buscarnera, G., Carey, J. W., Chen, M. A., Detournay, E., Huang, H., & Kelemen, P. B. (2024). Carbon mineralization in fractured mafic and ultramafic rocks: A review. *Reviews of Geophysics*, 62(2), Artículo e2023RG000815. https://doi.org/10.1029/2023RG000815

Oldenburg, C. M., Jordan, P. D., Nicot, J. P., Mazzoldi, A., Gupta, A. K., & Bryant, S. L. (2011). Leakage risk assessment of the In Salah CO_2 storage project: Applying the certification framework in a dynamic context. *Energy Procedia*, 4, 4154–4161. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.360

Patiño-Rojas, S. M., Jaramillo, M., Espinosa-Espinosa, C., & Arias-López, M. F. (2021). Preferential groundwater flow directions in a pseudokarst system in Colombia, South America. *Journal of South American Earth Sciences*, 112, Artículo 103572. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103572

Pereira, E., Ortiz, F., & Prichard, H. (2006). Contribución al conocimiento de las Anfibolitas y Dunitas de Medellín (Complejo Ofiolítico de Aburrá). *DYNA*, 73(149), 17–30.

Preston, C., Bruce, C., & Monea, M. (2018). *An update on the integrated CCS project at SaskPower's Boundary Dam Power Station* [Presentación en conferencia]. 14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference (GHGT-14), Melbourne, Australia. https://doi.org/10.2139/ssrn.3365632

IN PRESS

Restrepo, J. J. (2008). Obducción y metamorfismo de ofiolitas triásicas en el flanco occidental del Terreno Tahamí, cordillera Central de Colombia. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 22, 49–100.

Ringrose, P., Mathieson, A., Wright, I., Selama, F., Hansen, O., Bissell, R., Saoula, N., & Midgley, J. (2013). The In Salah CO_2 storage project: Lessons learned and knowledge transfer. *Energy Procedia*, 37, 6226–6236. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.551

Rodríguez, G., González, H., & Zapata, G. (2005). *Memoria explicativa: Geología de la plancha 147 Medellín Oriental* (Escala 1:100 000). Ingeominas.

Rudge, J. F., Kelemen, P. B., & Spiegelman, M. (2010). A simple model of reaction-induced cracking applied to serpentinization and carbonation of peridotite. *Earth and Planetary Science Letters, 291*(1–4), 215–227. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.01.016

Samaniego, J., Schmidt, A., & Carlino, H. (2021). *Impacto de las medidas y/o tecnologías de Remoción de Dióxido de Carbono sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe: Resumen para responsables de políticas*. Iniciativa de Gobernanza Climática Carnegie (C2G) / Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).

Servicio Geológico Colombiano. (2025). *Informe de rendición de cuentas 2025*. https://www2.sgc.gov.co/ControlYRendicion/Rendicion-de-cuentas/Documentos%20rendicin%20de%20cuentas/Informe-de-Rendicion-de-cuentas-SGC-2025.pdf

Shcheka, S. S., Wiedenbeck, M., Frost, D. J., & Keppler, H. (2006). Carbon solubility in mantle minerals. *Earth and Planetary Science Letters*, 245(3–4), 730–742. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.03.036

IN PRESS

UNFCCC. (2015). *Paris Agreement*. United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf

United Nations Environment Programme. (2023). *Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again)*. UNEP. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922

United Nations Environment Programme. (2024). *Emissions Gap Report 2024: No more hot air … please! With a massive gap between rhetoric and reality, countries draft new climate commitments*. UNEP. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404

Wyllie, P. J., & Huang, W.-L. (1975). Peridotite, kimberlite, and carbonatite explained in the system CaO–MgO–SiO_2–CO_2. *Geology*, 3(11), 621–624. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1975)3%3C621:PKACEI%3E2.0.CO;2

IN PRESS

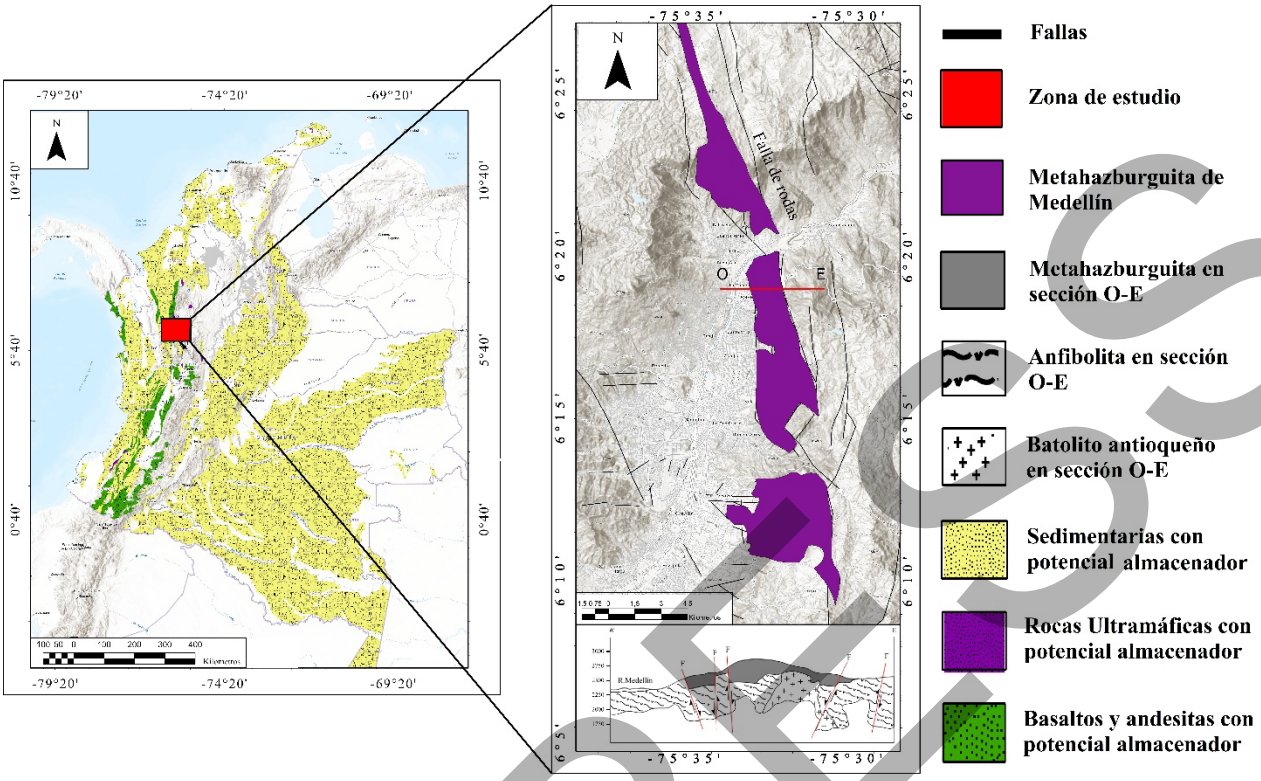


Fig. 1. Unidades geológicas con potencial de almacenamiento de CO_2 en Colombia. Zona ampliada muestra la Metaharzburgita de Medellín y un perfil esquemático O-E según Rodríguez et al. (2005). Figura con base en el Mapa Geológico de Colombia (Gómez et al., 2023).

IN PRESS

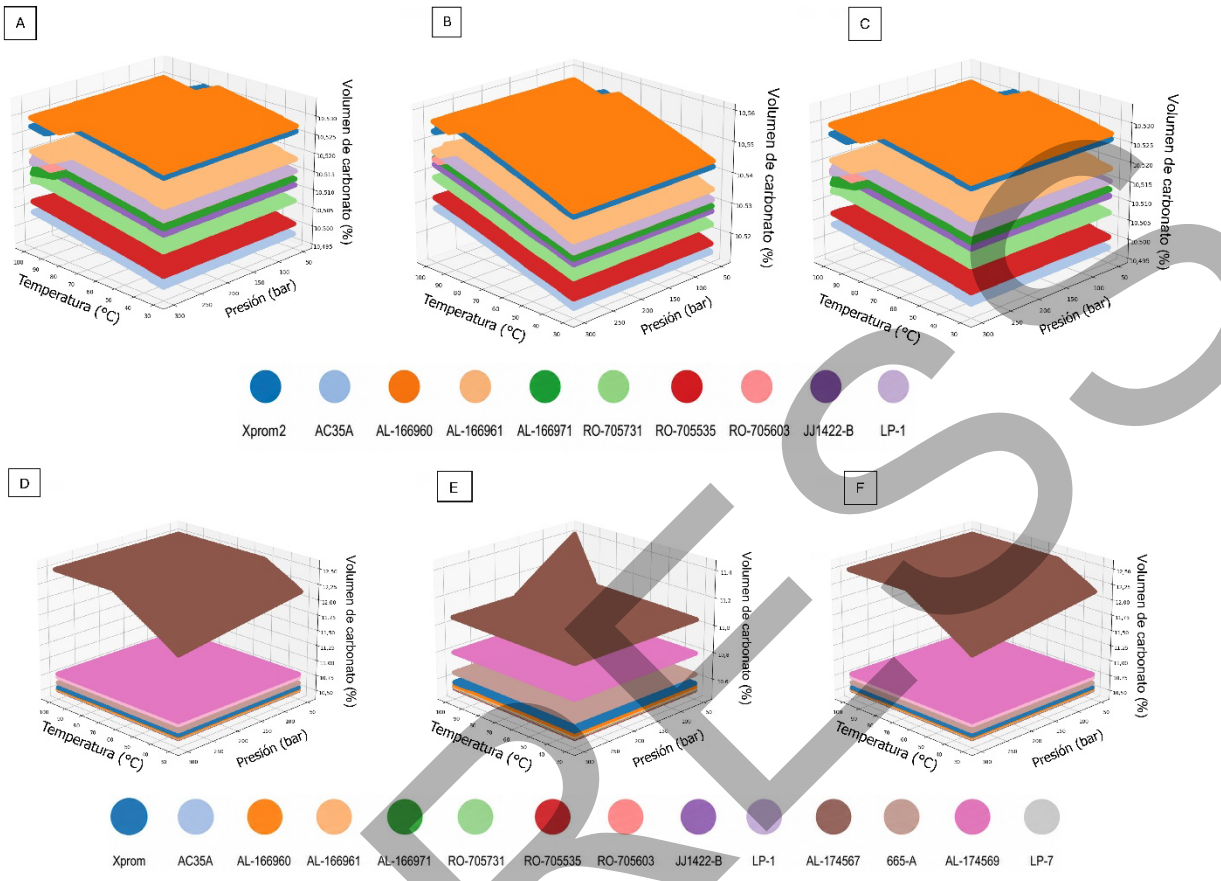
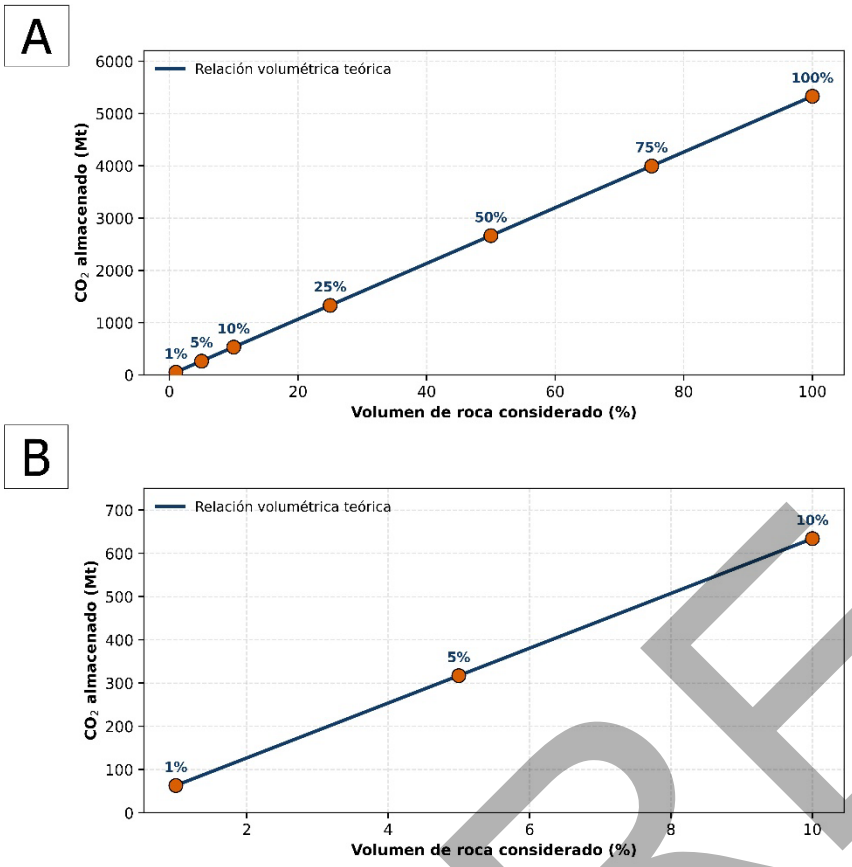


Fig. 2. A-C. Volumen porcentual de carbonato en la roca, en equilibrio, considerando muestras sin metasomatismo. **D-F.** Volumen porcentual de carbonato en la roca, en equilibrio, considerando muestras con y sin metasomatismo. De izquierda a derecha, modelos Do(HP), M(HP) y oCcM(HP). Xprom y Xprom2 corresponden a las composiciones promedio de las muestras modeladas.

IN PRESS



Volumen considerado (%)	CO_2 almacenado (Mt)
1	53
5	266
10	533
25	1332
50	2665
75	3997
100	5329

Volumen considerado (%)	CO_2 almacenado (Mt)
1	63
5	317
10	634

Fig. 3. Porcentaje de volumen de roca vs. cantidad de CO_2 secuestrado (en Mt). **A.** Cantidad de CO_2 si cristalizara calcita desde un 1% al 100% de la unidad asumiendo un 10,5 vol.% de equilibrio del carbonato. **B.** Cantidad de CO_2 si cristalizara calcita asumiendo un 12,5 vol.%.

IN PRESS

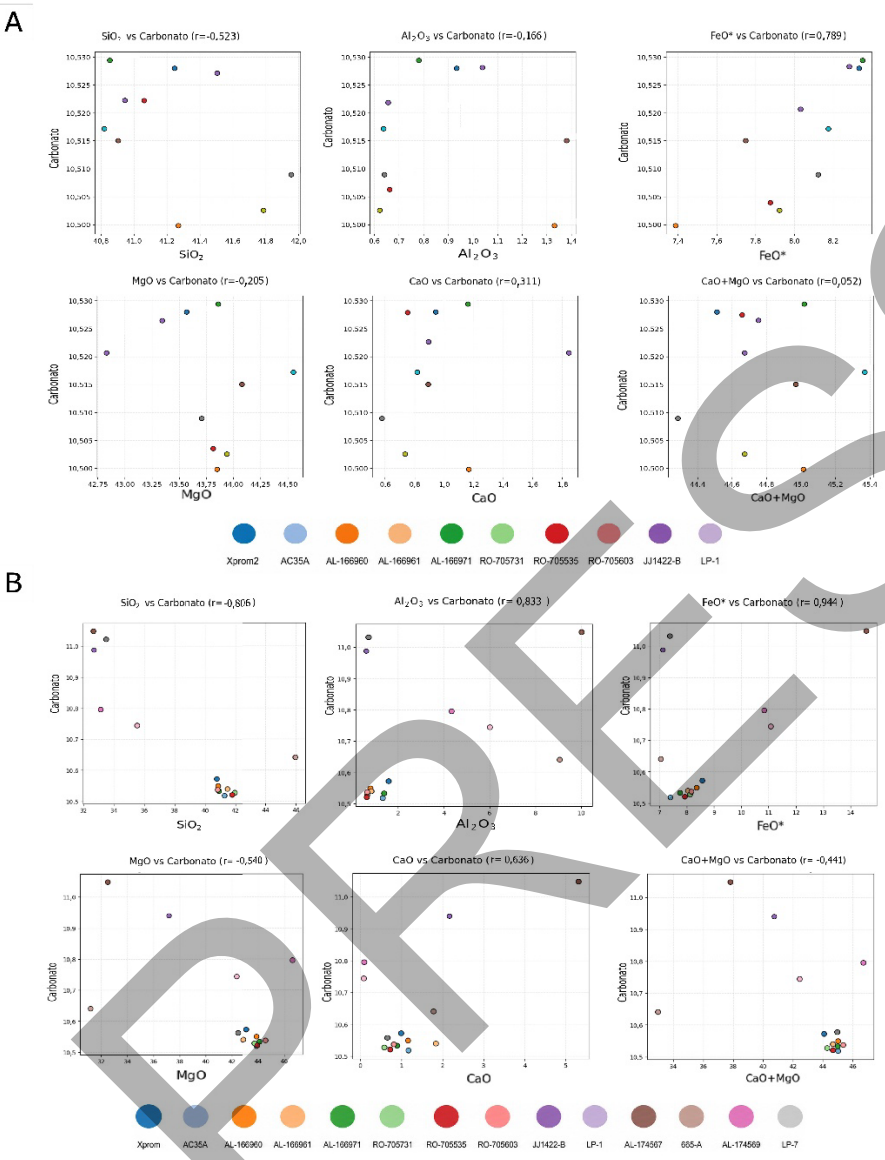


Fig. 4. A. Resultados del modelado termodinámico considerando muestras sin metasomatismo. **B.** Resultados del modelado termodinámico considerando muestras con y sin metasomatismo. Para ambos casos se utilizó el modelo de solución de carbonato Do(HP), seleccionado debido a que los modelos oCcM(HP) y M(HP) presentaron patrones de comportamiento equivalentes. Los coeficientes de correlación de indican en los títulos de cada panel. Xprom y Xprom2 corresponden a las composiciones promedio de las muestras modeladas. Óxidos mayores reportados en porcentaje en peso. Carbonatos reportados en porcentaje en volumen.

IN PRESS

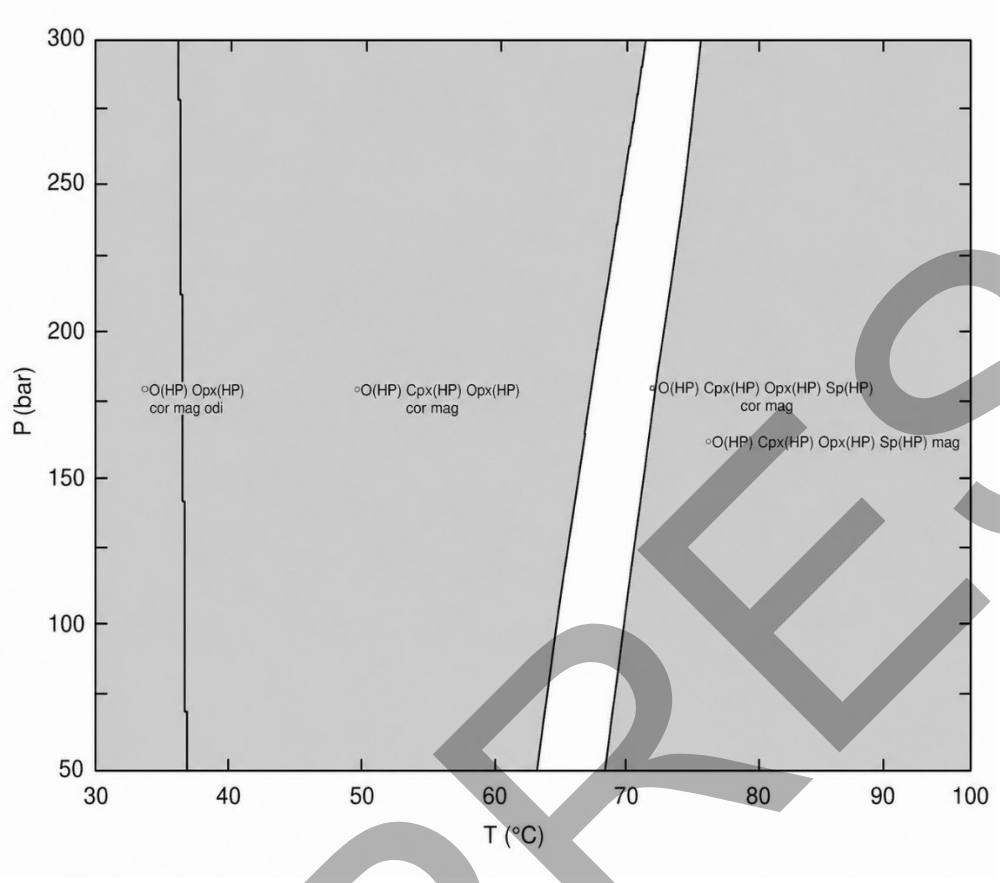


Fig. 5. Pseudosección P-T típica de la Metaharzburgita promedio obtenida para el modelo de solución Do(HP) en el intervalo 30-100 °C y 50-300 bares. Los campos representan asociaciones minerales estables. O(HP): olivino, Cpx(HP): clinopiroxeno, Opx(HP): ortopiroxeno, Sp(HP): espinela, cor: corindón, mag: magnesita.

IN PRESS

Tabla 1. Recopilación geoquímica normalizada de los óxidos mayores de la Metaharzburgita de Medellín. En gris se indican las 13 muestras utilizadas para el modelado termodinámico.

Muestras	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	PPC	Total	Mg#	Referencia
AC52B	39,09	0,00	0,62	0,14	8,69	0,12	51,27	0,06	0,01	0,00	0,00	12,40	100,00	0,86	García-Casco *et al.* (2020)
AC59B	45,88	0,00	0,93	0,10	8,15	0,13	43,97	0,80	0,02	0,00	0,00	12,70	100,00	0,84	García-Casco *et al.* (2020)
AC35A	43,33	0,02	1,40	0,09	7,76	0,12	46,04	1,22	0,02	0,00	0,00	6,10	100,00	0,86	García-Casco *et al.* (2020)
650-A	42,81	0,01	3,12	0,00	7,34	0,03	45,48	0,68	0,52	0,01	0,00	0,00	100,00	0,95	Botero (1963)
665-A	48,14	0,01	9,49	0,00	7,37	0,02	32,65	1,87	0,44	0,01	0,00	0,00	100,00	0,99	Botero (1963)
AL-166960	42,84	0,00	0,82	0,23	8,76	0,14	45,99	1,22	0,02	0,00	0,00	4,91	100,00	0,84	Álvarez (1987)
AL-166961	43,47	0,00	0,87	0,30	8,42	0,11	44,89	1,93	0,01	0,00	0,00	10,51	100,00	0,84	Álvarez (1987)
AL-166962	44,03	0,00	0,90	0,30	8,76	0,11	44,00	1,87	0,03	0,00	0,00	8,26	100,00	0,83	Álvarez (1987)
AL-166965	39,87	0,00	0,70	0,11	10,49	0,15	46,79	1,86	0,02	0,00	0,00	7,07	100,00	0,82	Álvarez (1987)
AL-166966	44,02	0,00	0,73	0,39	8,70	0,11	43,44	2,57	0,05	0,00	0,00	10,63	100,00	0,83	Álvarez (1987)
AL-166967	39,37	0,00	1,35	0,14	9,77	0,15	47,92	1,29	0,01	0,00	0,00	10,39	100,00	0,83	Álvarez (1987)
AL-166968	39,16	0,00	0,23	0,08	9,65	0,13	50,12	0,62	0,01	0,00	0,00	7,60	100,00	0,84	Álvarez (1987)
AL-166970	41,19	0,00	0,61	0,20	8,28	0,15	48,59	0,96	0,01	0,00	0,00	10,78	100,00	0,85	Álvarez (1987)
AL-166971	42,88	0,00	1,45	0,29	8,12	0,11	46,21	0,93	0,01	0,00	0,00	8,71	100,00	0,85	Álvarez (1987)
AL-166972	44,42	0,00	0,37	0,18	9,12	0,12	44,46	1,31	0,02	0,00	0,00	11,36	100,00	0,83	Álvarez (1987)
AL-166973	43,02	0,00	0,12	0,30	8,21	0,12	46,25	1,95	0,05	0,00	0,00	11,28	100,00	0,85	Álvarez (1987)
AL-174567	34,06	0,00	10,46	0,21	15,23	0,15	33,93	5,54	0,40	0,02	0,00	7,00	100,00	0,69	Álvarez (1987)
AL-174569	34,70	0,00	4,54	0,32	11,36	0,10	48,87	0,09	0,01	0,01	0,00	9,36	100,00	0,81	Álvarez (1987)
AL-174572	36,75	0,00	8,19	0,50	11,18	0,11	43,24	0,01	0,01	0,01	0,00	8,93	100,00	0,79	Álvarez (1987)
RO-705612	39,67	0,02	0,32	0,31	8,66	0,13	50,44	0,12	0,29	0,03	0,00	9,68	100,00	0,85	Rodríguez *et al.* (2005)
RO-705731	43,83	0,03	0,67	0,34	8,49	0,13	45,67	0,60	0,22	0,02	0,00	6,37	100,00	0,84	Rodríguez *et al.* (2005)
RO-705535	43,81	0,01	0,65	0,14	8,31	0,13	46,07	0,77	0,09	0,02	0,00	6,71	100,00	0,85	Rodríguez *et al.* (2005)
RO-705544	45,62	0,03	1,42	0,41	8,55	0,10	43,70	0,05	0,10	0,02	0,00	11,13	100,00	0,84	Rodríguez *et al.* (2005)
RO-705730	45,16	0,02	0,83	0,29	9,06	0,11	44,44	0,04	0,03	0,01	0,00	9,74	100,00	0,83	Rodríguez *et al.* (2005)
RO-705570	40,53	0,02	0,04	0,10	9,34	0,13	49,31	0,40	0,09	0,02	0,00	9,28	100,00	0,84	Rodríguez *et al.* (2005)
RO-705574	42,87	0,02	0,83	0,19	7,99	0,12	46,99	0,85	0,12	0,01	0,00	8,56	100,00	0,85	Rodríguez *et al.* (2005)
RO-705576	42,36	0,03	0,77	0,18	8,42	0,12	47,11	0,90	0,10	0,01	0,00	6,46	100,00	0,85	Rodríguez *et al.* (2005)
RO-705584	44,10	0,02	1,60	0,25	8,08	0,12	42,43	3,19	0,18	0,02	0,00	7,36	100,00	0,84	Rodríguez *et al.* (2005)
RO-705590	42,46	0,05	1,06	0,26	8,56	0,17	46,72	0,64	0,07	0,01	0,00	10,55	100,00	0,85	Rodríguez *et al.* (2005)
RO-705602	42,67	0,02	0,54	0,16	7,56	0,11	48,42	0,44	0,07	0,01	0,00	7,96	100,00	0,87	Rodríguez *et al.* (2005)
RO-705603	42,79	0,02	0,67	0,20	8,57	0,12	46,70	0,86	0,07	0,01	0,00	9,26	100,00	0,84	Rodríguez *et al.* (2005)
Of-10	39,02	0,09	2,50	0,38	10,37	0,17	47,13	0,09	0,22	0,03	0,00	9,92	100,00	0,82	Pereira *et al.* (2006)
Of-10[a]	40,64	0,04	0,87	0,12	9,94	0,14	47,63	0,35	0,22	0,03	0,00	8,60	100,00	0,83	Pereira *et al.* (2006)
JJ1296-B	45,19	0,02	1,33	0,39	7,26	0,12	43,02	2,44	0,15	0,08	0,00	9,24	100,00	0,86	Restrepo (2008)
JJ1422-B	43,75	0,02	1,19	0,33	8,23	0,12	45,19	1,07	0,08	0,02	0,00	11,20	100,00	0,85	Restrepo (2008)
SP-001	44,56	0,05	0,88	0,26	7,81	0,14	45,70	0,61	0,00	0,00	0,00	11,29	100,00	0,85	Hernández-González (2014)
LP-7	37,08	0,36	6,27	0,26	11,56	0,14	44,24	0,08	0,00	0,00	0,00	9,79	100,00	0,79	Hernández-González (2014)
LP-4	44,16	0,07	1,04	2,03	7,85	0,13	43,90	0,80	0,00	0,00	0,00	8,63	100,00	0,85	Hernández-González (2014)
LP-1	43,78	0,02	0,93	0,36	8,57	0,14	45,56	0,63	0,00	0,00	0,00	8,17	100,00	0,84	Hernández-González (2014)
B-1-A	47,62	0,00	1,30	0,32	12,02	0,16	37,39	1,14	0,04	0,00	0,00	8,77	100,00	0,76	González-Ospina (2016)
G-1-A	47,25	0,00	0,46	0,42	7,53	0,15	43,81	0,37	0,00	0,00	0,00	7,96	100,00	0,85	González-Ospina (2016)
G-1-C	44,24	0,00	1,02	0,45	7,54	0,12	45,13	1,50	0,00	0,00	0,00	3,10	100,00	0,86	González-Ospina (2016)
LP2-A	43,67	0,00	0,69	0,38	12,14	0,14	42,54	0,44	0,00	0,00	0,00	3,06	100,00	0,78	González-Ospina (2016)
SH-1-(A)-A	44,46	0,00	1,21	0,43	7,35	0,14	44,83	1,58	0,00	0,00	0,00	4,50	100,00	0,86	González-Ospina (2016)
SH-1-(A)-B	44,43	0,02	1,01	0,49	8,12	0,15	45,46	0,33	0,00	0,00	0,00	3,79	100,00	0,85	González-Ospina (2016)
SH-1-(B)-B	45,75	0,04	1,50	0,50	7,67	0,13	43,65	0,75	0,00	0,00	0,00	5,14	100,00	0,85	González-Ospina (2016)
SH-1-(B)-C	44,03	0,00	0,96	0,45	7,76	0,15	44,89	1,73	0,02	0,00	0,00	3,43	100,00	0,85	González-Ospina (2016)
SP-2-A	43,38	0,02	1,19	0,37	13,04	0,14	41,28	0,58	0,00	0,00	0,00	2,03	100,00	0,76	González-Ospina (2016)
Xprom	42,68	0,02	1,67	0,30	8,96	0,13	45,11	1,04	0,08	0,01	0,00	7,91	100,00	0,84	Este estudio

PPC: Pérdida por calcinación.

FeO*: Hierro total expresado como FeO; los valores reportados como Fe_2O_3 fueron normalizados a FeO equivalente (FeO = Fe_2O_3T × 0,8998).

IMPRESO

Tabla 2. Almacenamiento de CO_2 por unidad de volumen (tCO_2/m^3) para distintos minerales carbonatados y diferentes grados de alteración**.**

Tipo de muestra	Carbonatos (vol.%)	Calcita (tCO_2/m^3)	Magnesita (tCO_2/m^3)	Dolomita (tCO_2/m^3)
Sin metasomatismo	10,5	0,1251	0,1655	0,1428
Metasomatismo intermedio	11,5	0,1370	0,1813	0,1564
Con metasomatismo	12,5	0,1489	0,1971	0,1701

IN PRESS