

**DE MICROBIOS A ROCAS: LA
BIOMINERALIZACIÓN
COMO HERRAMIENTA
CONTRA EL CAMBIO
CLIMÁTICO.**

Dr. Héctor Ferral Perez

Dr. Felipe Adrián Vázquez Gálvez

Centro de Ciencias Atmosféricas y Tecnologías Verdes,
Instituto de Ingeniería y Tecnología de la Universidad
Autónoma de Ciudad Juárez

Dra. Edith Flores Tavizon

Dra. Marisela Yadira Soto Padilla

Dr. Luis Gerardo Bernadac Villegas

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Instituto de
Ingeniería y Tecnología en la Universidad Autónoma de
Ciudad Juárez.

Abstract

Microbial biomineralization represents a promising and innovative approach to reducing atmospheric carbon dioxide (CO_2) levels. This natural process is widely observed in various organisms capable of utilizing environmental CO_2 to mineralize it into carbonates, forming biominerals such as shells, spicules, and, in the case of microbes, structures like stromatolites. In this context, microbially induced biomineralization has emerged as a biotechnological strategy for CO_2 capture and storage. This method offers an energy-efficient alternative to physicochemical technologies, using bacterial enzymatic and metabolic activities to convert CO_2 into stable minerals that can be applied in various engineering solutions, including self-healing concrete, heavy metal removal, and soil stabilization. These applications highlight the versatility of biomineralizing microbes in promoting carbon neutrality and mitigating emissions. This promising biotechnology addresses climate change, supports net-zero emissions targets, and fosters community sustainability.

Keywords: Biomineralization, climate change, CO_2 capture, environmental biotechnology

Resumen

La biomineralización microbiana representa un enfoque prometedor e innovador para reducir los niveles de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico. Este proceso natural es ampliamente observado en diversos organismos, los cuales son capaces de utilizar el CO_2 del entorno para mineralizarlo en carbonatos, formando biominerales como conchas, espículas y, en el caso de los microbios, estructuras como los estromatolitos. En este contexto,

la biomineralización inducida por microorganismos ha surgido como una estrategia biotecnológica para la captura y almacenamiento de CO_2 . Este método ofrece una alternativa eficiente en términos energéticos a las tecnologías fisicoquímicas, utilizando las actividades enzimáticas y metabólicas de las bacterias para convertir el CO_2 en minerales estables que pueden ser utilizados en distintas aplicaciones ingenieriles, como el concreto autorreparable, la remoción de metales pesados y la estabilización de suelos. Estas aplicaciones demuestran la versatilidad de los microbios biomineralizantes para promover la neutralidad de carbono y mitigar las emisiones, lo cual representa una biotecnología prometedora para enfrentar el cambio climático, alcanzar el balance cero de emisiones y fomentar la sostenibilidad de las comunidades.

Palabras clave: Biomineralización, cambio climático, captura de CO_2 , biotecnología ambiental

Introducción

Las rocas suelen asociarse con la ausencia de vida y la inmutabilidad ante el paso del tiempo. Históricamente, han sido el principal material de construcción, incluyendo el concreto, que permite usar estos materiales de origen mineral de forma artificial y moldearlos según las necesidades del proyecto. En el contexto de la actual crisis climática, las rocas podrían ofrecer una solución al aumento del dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera, ayudando a reducir su concentración.

Aunque normalmente se asume que el origen de las rocas está ligado a procesos geológicos, como la formación de rocas metamórficas e ígneas, las rocas sedimentarias esconden un origen

biológico dentro de sus duras capas. Uno de los minerales más abundantes en este tipo de rocas son los de la familia de los carbonatos, que se generan a partir de la interacción del CO_2 disuelto en el agua con diferentes metales, como el calcio, que es el 3er elemento más abundante en el suelo y en los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

Para que estos minerales se formen, se requiere diversas condiciones ambientales como una alta concentración de metales y CO_2 disuelto en forma de carbonatos y un pH alcalino ($pH > 7$). Sin embargo, este proceso no es completamente fisicoquímico ya que existe una gran diversidad de organismos capaces de formar minerales, que los llamaremos biominerales. Los biominerales más comunes que se conocen son los huesos y dientes, pero también muchos otros como los esqueletos de los corales, las conchas de los moluscos, las espículas de foraminíferos y otras estructuras similares a las piedras como los estromatolitos y microbialitos.

¿Qué es la Biomineralización?

La capacidad de los organismos para formar minerales se conoce como biomineralización, donde éstos promueven que ocurra la formación de minerales, este proceso puede ser controlado por el organismo o también puede inducirlo. La biomineralización controlada es realizada por aquellos, que como dice su nombre, que controlan la

formación de los biominerales gracias a que poseen enzimas, proteínas, metabolismos y genes específicos para crear biominerales (Weiner y Dove, 2003), un ejemplo son las proteínas SOM, que se traduce como matriz orgánica esquelética. Estas proteínas atrapan el CO_2 disuelto en el agua (Carbón Inorgánico Disuelto, CID) y lo mineralizan con el calcio del medio, dando lugar a estructuras minerales ordenadas para los fines del organismo. Algunos ejemplos son los biominerales que forman los corales, las esponjas, protozoarios conocidos como foraminíferos, crustáceos, moluscos y todos los vertebrados (Figura 1a).

Por otro lado, la biomineralización inducida ocurre en los organismos que no cuentan con proteínas o genes especializados para mineralización, dando como resultado biominerales con crecimientos aleatorios; la mineralización inducida se genera como un subproducto de su metabolismo, ya que los desechos de los microorganismos, como el CO_2 de la respiración, aniones alcalinos, proteínas y otras moléculas en la membrana de sus células, generan un ambiente propicio para la mineralización (Dupraz y col. 2009).

Un ejemplo son los estromatolitos, microbialitos y espeleotemas bacterianos (Figura 1b), estructuras rocosas biológicas creadas por comunidades bacterianas y cianobacterias.

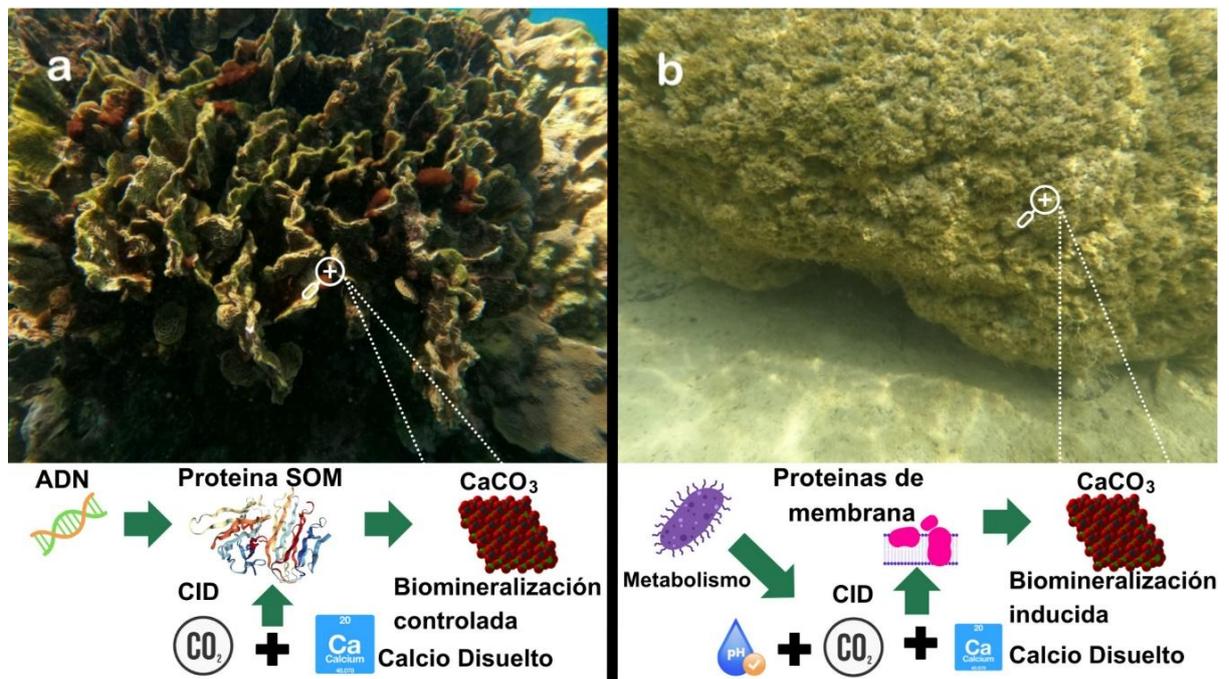


Figura 1: Ejemplos de biomineralización de carbonato de calcio ($CaCO_3$). a. Biomineralización controlada: Los biominerales son ordenados por proteínas SOM (Skeletal Organic Matrix) que están codificadas en el ADN de los organismos y le dan forma a los biominerales, por ejemplo, los corales. b. Biomineralización inducida: Los microorganismos cuyo metabolismo aumentan el pH y la concentración de Carbón Inorgánico Disuelto (CID) más el calcio, inducen la nucleación y precipitaciones del $CaCO_3$ en las estructuras protéicas que forman parte de la membrana, por ejemplo, los estromatolitos.

Biominales y ciclo del CO_2

De igual forma que las cianobacterias, muchos otros también son capaces de formar biominerales mediante el proceso de biomineralización inducida y son responsables de la formación de una parte de las rocas sedimentarias en ríos, lagos, océanos, suelos y cavernas (Jawar y col. 2022). Estos microorganismos juegan un papel fundamental en el ciclo biogeoquímico del carbono, al contribuir al equilibrio del CO_2 en la atmósfera, junto con organismos fotosintéticos (la vegetación y la biota marina) que capturan CO_2 en forma de biomasa (Figura 2). Las concentraciones de CO_2 en la atmósfera varían en función del

balance de los flujos naturales (como la respiración de los organismos y los procesos de descomposición) y las fuentes antropogénicas (principalmente la quema de combustibles fósiles y la producción de cemento). Estos flujos interactúan con los principales sumideros de CO_2 que capturan y fijan el gas, regulando así la temperatura y el clima.

Esto se debe a que el CO_2 en la atmósfera atrapa la radiación infrarroja del sol, fenómeno conocido como calentamiento global.

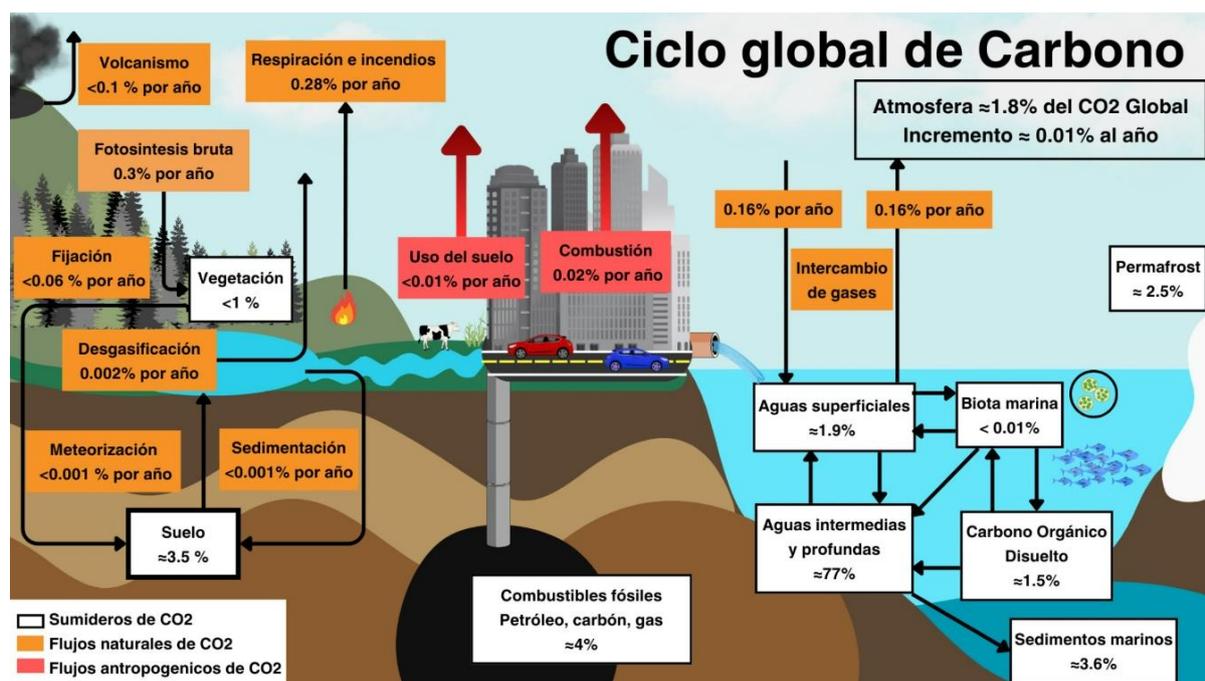


Figura 2: Ciclo del carbono que ejemplifica los principales sumideros y flujos globales del CO_2 en la atmósfera. En la atmósfera se estima que hay 870 ± 5 Gigatoneladas de CO_2 que representa el 1.8% de CO_2 total, este se distribuye en los distintos sumideros de CO_2 , siendo el océano en sus aguas profundas donde se absorbe el 77% de este, seguido del suelo y los sedimentos marinos (7.1%), las reservas de combustibles fósiles (4%), y el permafrost (2.5%). El CO_2 se distribuye entre los diferentes sumideros por diferentes procesos bioquímicos como la fotosíntesis y la respiración, y físicoquímicos como el intercambio de gases y la mineralización de sedimentos, que permite que se mantenga un equilibrio entre ellos. Sin embargo, la liberación de CO_2 antropogénica principalmente por la quema de combustibles está modificando el equilibrio del ciclo.

Desde la Revolución Industrial, el uso intensivo de combustibles fósiles ha liberado grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera lo que ha provocado aumento en sus concentraciones, en el periodo del 2010 – 2019 se estima que el incremento es aproximadamente de 5 Gigatoneladas anuales. Ha pesar de que este incremento representa únicamente el 0.01% del CO_2 total del planeta, de acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial en el 2020 se alcanzó una concentración en la atmósfera de 149% más de los niveles preindustriales. Este aumento tiene como consecuencia un desbalance en

el ciclo del carbono debido a la acidificación en el océano reduciendo significativamente su capacidad de captura de CO_2 y provocando la muerte de la biota marina, además de que sumado con el efecto invernadero incrementa la frecuencia de incendios, la deforestación y erosión, muerte de la vegetación y el derretimiento del permafrost, liberando aún más CO_2 a la atmósfera.

El calentamiento global también altera la dinámica atmosférica y los niveles oceánicos, afectando el clima de los ecosistemas y aumentando la frecuencia e intensidad de fenómenos naturales

extremos como sequías, inundaciones, huracanes y tormentas.

Captura de CO_2 por micro-organismos

En la 21^a Conferencia del Cambio Climático de las Naciones Unidas en la Conferencia de las Partes (COP21) del 2015, conocida como el Acuerdo de París, los países se comprometieron a realizar esfuerzos para limitar el incremento de la temperatura global a 1.5°C y reducir las emisiones de CO_2 hasta alcanzar un balance negativo para 2050. Asimismo, las Naciones Unidas adoptaron formalmente los Objetivos de Desarrollo Sostenible como parte de su agenda para 2030, donde la meta 13 establece la Acción Climática. Esta meta implica tomar medidas para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para alcanzar la neutralidad de emisiones, que quiere decir que la cantidad de gases de efecto invernadero que se genere sea igual a lo que se remueve de la atmosfera.

Las principales fuentes de emisión de GEI provienen de la producción de energía, seguido del transporte, donde la combustión de carbón, gas natural y productos derivados del petróleo produce un gas de salida compuesto principalmente por nitrógeno, vapor de agua y entre un 7-15% de CO_2 .

Una de las estrategias para reducir las emisiones provenientes de estos procesos es el uso de energías provenientes de

fuentes no dependientes de combustibles fósiles, como la energía solar y eólica, sin embargo, debido a la demanda energética todavía no podemos depender exclusivamente de ellas. En este panorama, se han desarrollado tecnologías que nos permiten capturar el CO_2 tanto en los procesos de combustión como el que ya está presente en la atmósfera que se conocen como de Captura y Secuestro de Carbono (Carbon Capture and Storage, CCS).

Existen diversas tecnologías CCS que están basadas en procesos fisicoquímicos, como la adsorción, el looping químico, la reducción electroquímica, separación por membranas, entre otras. Una de las tecnologías más estudiadas y utilizadas, destacan los "scrubbers", son dispositivos que permiten eliminar el CO_2 de un gas por medio de la absorción con sustancias químicas como las aminas y cal viva (Figura 3a) (Ashirov y Coskun, 2024). Sin embargo, estos sistemas purificar el CO_2 y grandes cantidades de energía térmica para regenerar los absorbentes, lo que limita su aplicabilidad. Una vez capturado, el CO_2 puede mineralizarse mediante un proceso químico o su inyección en basaltos a presiones supercríticas. No obstante, esta técnica presenta desventajas como la pérdida de capacidad adsorbente, alto coste energético, producción de subproductos no deseables y la ubicación geográfica de la planta CCS (De Oliveira y col. 2022).

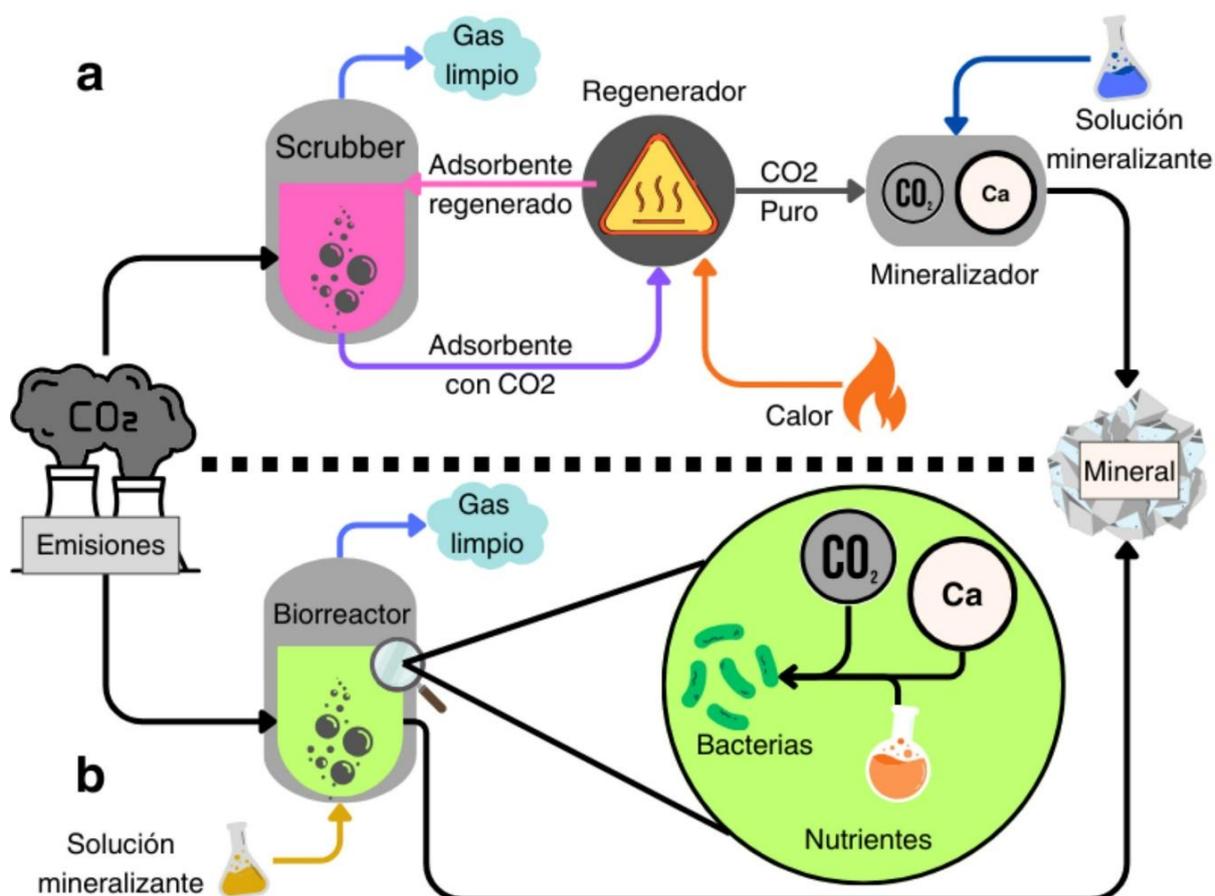


Figura 3: Esquema del proceso de captura de CO_2 utilizando (a) scrubbers químicos y un mineralizador y (b) biotecnología, en ambos casos el producto final son los minerales, pero en el proceso biotecnológico no requiere de calor, ya que las bacterias funcionan como adsorbentes y promueven la mineralización.

Por otro lado, las bacterias mineralizantes ofrecen una alternativa viable para las tecnologías CCS, ya que promueven la disolución del CO_2 en el agua y facilitan su mineralización a bajo costo energético y bajo condiciones de presión y temperatura normales (Figura 3b). Aunque la biomineralización es un fenómeno estudiado desde 1989 por Lowenstam y Weiner, quienes describieron este proceso en distintos organismos, no fue hasta la década de 2010 cuando Henk Jonkers y su grupo de investigación utilizaron bacterias como agentes reparadores del concreto. Estas bacterias podían tomar el CO_2 de la atmósfera y convertirlo en carbonato, sellando las grietas del concreto. Desde entonces, varios investigadores han propuesto distintas aplicaciones para este proceso biotecnológico, como la remoción de metales pesados mediante su inmovilización en matrices minerales, la estabilización de suelos, la producción de concreto autorreparable y la captura del carbono, siendo ésta última de particular interés para alcanzar la neutralidad en emisiones (Fang y Achal, 2024)

La aplicación tecnológica de la biomineralización inducida mediada por microbios se le conoce como Precipitación de Carbonatos Inducida por Microbios (MICP, por sus siglas en inglés, Microbial Induced Carbonate Precipitation). La MICP puede ser llevada a cabo por una gran diversidad de microorganismos con distintos tipos de metabolismo, como los fotosintéticos, sulfatoredutores, oxidadores de metano, desnitrificantes, productores de anhidrasa carbónica y ureolíticos, siendo estos dos últimos los más estudiados (Mwandira y col. 2023).

El factor de mayor influencia dentro de este bioproceso es el tipo de bacteria, ya que proporcionan los sitios de nucleación donde se forman los biominerales, producen las enzimas que aceleran las reacciones de precipitación y sobreviven a las condiciones de mineralización, que implican pH alcalino y altas concentraciones de sales. El pH y la temperatura tienen un impacto significativo en el crecimiento microbiano y la actividad enzimática, así como en la solubilidad del CO_2 y la cristalización de los biominerales. Finalmente, la concentración de CO_2 , la fuente de calcio y los nutrientes del medio de cultivo, afectan el metabolismo bacteriano y por consecuencia, velocidad de precipitación y forma de los biominerales.

Actualmente la investigación continúa para identificar posibles microorganismos más eficientes para la MICP que

se pueden aislar de condiciones extremas, como cuevas húmedas que presentan temperaturas mayores a $50^\circ C$, sedimentos de fuentes de agua con alta alcalinidad y salinidad, así como sedimentos marinos. Por otro lado, el diseño, control y desarrollo de biorreactores para manejar los parámetros de crecimiento microbiano, es un área de oportunidad para mejorar y escalar este proceso a nivel industrial.

Conclusiones

Las tecnologías CCS basadas en MICP son una alternativa potencial para alcanzar las metas de neutralidad de emisiones establecidas en el Acuerdo de París y alineados a los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Gracias a esto, se puede ver a futuro la construcción de granjas de rocas donde se capture el CO_2 , promoviendo una infraestructura ambiental innovadora. Estas granjas podrían convertirse en puntos clave de almacenamiento de carbono a gran escala y proporcionar oportunidades de empleo en sectores relacionados con la biotecnología y la construcción sostenible. Además, estas rocas biológicas podrían ser utilizadas para crear bioladrillos, con un impacto ambiental significativamente menor que los materiales de construcción tradicionales. Al reducir la dependencia de materiales como el cemento, que tiene una alta huella de carbono, se contribuye a la descarbonización de la industria de la construcción. El desarrollo de estos procesos biotecnológicos, no solo ofrecen una solución eficiente y sostenible para la captura de carbono, sino que también representan un avance en la mitigación del cambio climático, al integrar procesos naturales en la industria y la construcción. Asimismo, esta tecnología abre nuevas posibilidades

en la revalorización de residuos y subproductos industriales, fortaleciendo el enfoque hacia una economía circular. Por lo tanto, al aprovechar la capacidad de los microorganismos para mineralizar el CO_2 , se abren posibilidades nuevas para el manejo de emisiones, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono en sectores clave, como el energético y la construcción, apoyando así la transición hacia una economía verde y circular.

Referencias

- [1] Ashirov, T., and Coskun, A., Carbon Dioxide Capture: Current Status and Future Prospects, *Chimia*, 78[6], pp. 415–422, 2024.
- [2] De Oliveira Maciel, A.; Christakopoulos, P.; Rova, U.; Antonopoulou, I. Carbonic Anhydrase to Boost CO_2 Sequestration: Improving Carbon Capture Utilization and Storage (CCUS). *Chemosphere*, 299, p. 134419, 2022.
- [3] Dupraz, C.; Reid, R. P.; Braissant, O.; Decho, A. W.; Norman, R. S.; Visscher, P. T., Processes of Carbonate Precipitation in Modern Microbial Mats. *Earth-Science Reviews*, 96[3], pp. 141–162, 2009.
- [4] Fang, C., and Achal, V., Enhancing Carbon Neutrality: A Perspective on the Role of Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP), *Biogeotechnics*, 2[2], p. 100083, 2024.
- [5] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Global Carbon and Other Biogeochemical Cycles and Feedbacks, in Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 673–816, 2023.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Special Report on Global Warming of 1.5°C*, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018. Accessed: 2024-10-22. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- [7] Jarwar, M. A.; Dumontet, S.; Pasquale, V.; Chen, C. Microbial Induced Carbonate Precipitation: Environments, Applications, and Mechanisms. *Geomicrobiology Journal* 2022, 39 [10], pp. 833–851, 2022.
- [8] Jonkers, H. M.; Thijssen, A.; Muyzer, G.; Copuroglu, O.; Schlangen, E. Application of Bacteria as Self-Healing Agent for the Development of Sustainable Concrete. *Ecological Engineering*, 36, 230–235, 2010.
- [9] Lowenstam, H.A. and Weiner, S., *On biomineralization*. New York: Oxford University Press, 1989.
- [10] Mwandira, W.; Mavroulidou, M.; Gunn, M. J.; Purchase, D.; Garelick, H.; Garelick, J. Concurrent Carbon Capture and Biocementation through the Carbonic Anhydrase (CA) Activity of Microorganisms -a Review and Outlook. *Environ. Process.*, 10[4], 56, 2023.
- [11] Weiner, S. and Dove, P.M. An overview of biomineralization processes and the problem of the vital effect, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 54[1], pp. 1–29, 2003.