

Arqueobacterias: aliadas en la captura de carbono y lucha contra el cambio climático

Archaeobacteria: Allies in carbon capture and the fight against climate change

Milene Villalobos^{1*}, Ximena Ramírez¹, Enrique Medina¹,
Amir Vásquez¹ y Daniel Caridad¹

¹ Facultad de Veterinaria y Ciencias Biológicas,
Universidad Científica del Sur. Lima, Perú.



Citar como: Villalobos *et al.* (2025). «Arqueobacterias: aliadas en la captura de carbono y lucha contra el cambio climático». *South Sustainability*, 6(1), e124.
DOI: 10.21142/SS-0601-2025-e124

Artículo recibido: 13/2/2025
Revisado por pares
Artículo aprobado: 22/5/2025

Este documento formó parte de los trabajos generados en el marco del «Encuentro científico - Derrame de hidrocarburos: Soluciones desde la academia» organizado por la Universidad Científica del Sur (Lima-Perú, 2024).



©Los autores, 2025. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

*E-mail de correspondencia:
mvillalobosc@cientifica.edu.pe

RESUMEN

El ciclo del carbono es esencial para el equilibrio ambiental y la mitigación del cambio climático, desafíos globales marcados por el incremento de CO₂ atmosférico y su absorción por los océanos, lo que causa acidificación y altera los ciclos biogeoquímicos. En este contexto, las arqueobacterias, especialmente los grupos Thaumarchaeota y Euryarchaeota, desempeñan un papel crucial en la regulación del carbono y en la oxidación de amonio. En los ambientes anóxicos, las arqueobacterias metanotróficas y metanogénicas, como las Methanosarcinales, contribuyen al equilibrio de gases de efecto invernadero, como el metano, mientras que otras, como Bathyarchaeota, están implicadas en la acetogénesis. Este conocimiento, sumado a las tecnologías de remediación con nanopartículas, destaca el potencial de las arqueobacterias para mitigar el cambio climático, y plantea la urgencia de fomentar investigaciones que evalúen su diversidad y funcionalidad en ecosistemas marinos peruanos, así como de implementar proyectos piloto de bioingeniería enfocados en su uso.

Palabras clave: arqueobacterias marinas, ciclo del carbono, cambio climático

ABSTRACT

The carbon cycle is essential for environmental balance and climate change mitigation, global challenges marked by rising levels of atmospheric CO₂ and its uptake by the world's oceans, which causes acidification and disrupts biogeochemical cycles. In this context, archaea, particularly the Thaumarchaeota and Euryarchaeota groups, play a crucial role in carbon regulation and ammonia oxidation. In anoxic environments, methanotrophic and methanogenic archaea, such as Methanosarcinales, contribute to the regulation of greenhouse gases, such as methane, while others, such as Bathyarchaeota, are involved in acetogenesis. This body of knowledge, combined with the development of remediation technologies using nanoparticles, highlights the potential of archaea in the mitigation of climate change, underscoring the urgent need for research that assesses their diversity and functional roles within Peruvian marine ecosystems, as well as for the implementation of bioengineering pilot projects focused on their application.

Keywords: Marine archaea, carbon cycle, climate change



Introducción

El ciclo del carbono es un proceso fundamental para la formación de compuestos orgánicos esenciales en los seres vivos y el mantenimiento del equilibrio ambiental (Falkowski *et al.*, 2008). Este ciclo incluye procesos clave como la fijación de CO₂, la división de materia orgánica y la formación de metano, todos indispensables para la sostenibilidad de los ecosistemas (Zhang *et al.*, 2022). Sin embargo, su funcionamiento es complejo, involucra múltiples factores y opera en escalas de tiempos diversos (Oberle, 2016). Actualmente, el aumento del CO₂ atmosférico, impulsado por actividades humanas, está ejerciendo presiones sin precedentes sobre los ecosistemas marinos, especialmente a través de la acidificación oceánica, que altera procesos biogeoquímicos esenciales y compromete la estabilidad ambiental (Hayes y Waldbauer, 2006).

En este contexto, las arqueobacterias emergen como actores clave debido a su papel en procesos ecosistémicos fundamentales y su capacidad para regular ciclos biogeoquímicos complejos (Fuhrman *et al.*, 2016). Estos microorganismos no solo sostienen la funcionalidad de los ecosistemas, sino que también contribuyen significativamente a la dinámica del carbono y otros ciclos elementales a través de redes tróficas y procesos metabólicos únicos (Zheng *et al.*, 2024; Wang *et al.*, 2013).

Con adaptaciones evolutivas notables, las arqueobacterias han desarrollado vías metabólicas que les permiten sobrevivir en ambientes extremos (Albers, 2016), como ecosistemas anóxicos y sedimentos marinos ricos en metano, donde participan en procesos clave como la metanogénesis y la oxidación anaeróbica de metano (Stahl y De la Torre, 2012; Yoshinaga *et al.*, 2015). Asimismo, en entornos costeros y humedales, dominan la transformación de biopolímeros y la fijación de carbono, con implicaciones directas para el secuestro de carbono y la mitigación del cambio climático (Yang *et al.*, 2022).

A nivel global, estas capacidades metabólicas posicionan a las arqueobacterias como actores clave en la regulación de los ciclos del carbono desde tiempos ancestrales, ya que subrayan su relevancia para el equilibrio de los ecosistemas (Adam *et al.*, 2022). No obstante, las actividades humanas —al acelerar la transferencia de carbono desde los reservorios geológicos hacia la atmósfera y los océanos— están desafiando la capacidad reguladora natural de estos microorganismos (Hassan *et al.*, 2022). En este contexto, comprender y potenciar el papel de las arqueobacterias en los ciclos biogeoquímicos resulta esencial para el diseño de estrategias eficaces orientadas a mitigar los efectos del cambio climático y preservar la estabilidad de los ecosistemas a escala global.

Enfoque y discusión

Las arqueobacterias son microorganismos ubicuos, altamente abundantes en los ecosistemas marinos, y desempeñan un papel fundamental en la biomasa microbiana, especialmente en las profundidades oceánicas (Flemming *et al.*, 2019). Entre los principales grupos destacan Thaumarchaeota y Euryarchaeota. Thaumarchaeota, considerados los microorganismos más abundantes en aguas profundas, desempeñan funciones esenciales en los ciclos globales del carbono y el nitrógeno, ya que intervienen en procesos clave como la fijación de CO₂ y la oxidación del amonio (Danovaro *et al.*, 2017). Además, su capacidad para responder a estímulos ambientales mediante quimiotaxis y motilidad, junto con su versatilidad en la utilización de sustratos orgánicos, influye en su distribución en los océanos, especialmente en el contexto del cambio climático global (Brumley *et al.*, 2020).

Se ha evidenciado un desarrollo en nanopartículas funcionalizadas para remediación de los metanógenos ruminales, al mitigar las emisiones de metano hasta un 15 % (Altermann *et al.*, 2022). Además, comprender las respuestas de los metanógenos dependientes de temperatura puede ayudar a predecir y gestionar las emisiones en condiciones climáticas cambiantes (Anjum *et al.*, 2023).

Por otro lado, los Euryarchaeota son predominantes en aguas superficiales, donde adoptan estilos de vida heterotróficos o fotoheterotróficos que contribuyen al reciclaje de nutrientes, la producción primaria y el equilibrio ecológico (Danovaro *et al.*, 2017; Castelle *et al.*, 2015). En ambientes anóxicos, como los sedimentos marinos profundos y los sistemas subterráneos, otros grupos menos estudiados también tienen un impacto significativo. Entre ellos se encuentran los metanotrofos, arqueobacterias capaces de oxidar metano, un proceso fundamental para reducir indirectamente el CO₂ atmosférico (Zhou *et al.*, 2023). Este mecanismo es especialmente relevante porque el metano posee un potencial de calentamiento global considerablemente mayor que el del dióxido de carbono (Danovaro *et al.*, 2017; Adam *et al.*, 2022). Dentro de la diversidad arqueana, destacan las arqueobacterias metanotróficas anaeróbicas del orden Methanosarcinales, esenciales en el ciclo del carbono en ambientes anóxicos como los sedimentos marinos y los acuíferos (Castelle *et al.*, 2015).

Se ha evidenciado el proceso de nitrificación en arqueobacterias, donde las Thaumarchaeota desempeñan un papel relevante (Könneke *et al.*, 2005). Estos microorganismos prosperan en ambientes fríos y se desarrollan de manera quimiolitotrófica, utilizando la oxidación aeróbica del amoníaco a nitrito como fuente de energía (Semedo *et al.*, 2021). La capacidad de nitrificación está ampliamente distribuida entre las Thaumarchaeota no termófilas, lo que resulta crucial

para el ciclo del nitrógeno en los ecosistemas marinos. La actividad de estas arqueobacterias es esencial para transformar el amoníaco, que en altas concentraciones puede ser tóxico, en nitrito y posteriormente en nitrato, formas de nitrógeno que pueden ser asimiladas por otros organismos (Kits *et al.*, 2017). Este proceso no solo mitiga la acumulación de compuestos dañinos, sino que también favorece la reserva de nitratos en la zona eufótica manteniendo el equilibrio nutricional del ecosistema (Stahl y De la Torre, 2012; Pajares y Ramos, 2019). Además, estudios recientes han analizado cómo las variaciones de temperatura pueden afectar la estructura y dinámica de estos consorcios microbianos, lo que podría alterar su papel en los ciclos biogeoquímicos marinos y, en consecuencia, la salud general del ecosistema (Albers, 2016; Danovaro *et al.*, 2017).

De igual manera, existen arqueas implicadas en la acetogénesis, proceso en el que compuestos simples como el CO₂ y el H₂ se transforman en acetato. La producción de acetato por arqueas, como las pertenecientes a Bathyarchaeota, facilita el flujo de carbono en el ecosistema, porque contribuyen a procesos esenciales como la remineralización y la transferencia de energía en las redes tróficas (He *et al.*, 2016). Esto evidencia la versatilidad metabólica de las arqueas, que pueden prosperar en entornos con recursos energéticos limitados, como los sedimentos marinos profundos, donde otras formas de vida resultan menos eficientes. Comprender la acetogénesis en las arqueas podría mejorar el modelado del ciclo del carbono y optimizar los procesos de secuestro de carbono en ambientes marinos, lo que ofrece posibles aplicaciones en la mitigación del cambio climático (He *et al.*, 2016).

Otro grupo importante es el de las Thermoplasmata, conocido por su papel en la remineralización de proteínas y compuestos orgánicos complejos en sedimentos anóxicos, lo que contribuye al reciclaje de carbono y materia orgánica (Dithugoe *et al.*, 2023). Asimismo, el superphylum, que incluye a Woesearchaeota, Dapherotrites y Pacearchaeota, presenta capacidades metabólicas limitadas y depende de estilos de vida simbióticos para su supervivencia (Restrepo, 2015).

En el Perú las investigaciones sobre arqueobacterias en ambientes acuáticos son limitadas. Solo existen algunas investigaciones en las lagunas salinas de Huacho en la región Lima, donde se aislaron 12 microorganismos, entre los que resalta la arqueobacteria halófila *Haloferax gibbonsii*, con un potencial biotecnológico en la producción de betacaroteno con aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética (Esquerre *et al.*, 2003).

Conclusiones y recomendaciones

El estudio de arqueas tiene un rol fundamental en el ciclo de carbono y su potencial para mitigar el cambio climático. Asimismo, desempeñan roles como los procesos de la metanogénesis, la oxidación anaeróbica de metano y oxidación de compuestos nitrogenados, que contribuyen significativamente al secuestro de carbono y la reducción de gases de efecto invernadero.

En el Perú, la información de las arqueas sigue en una etapa temprana. Si bien se conoce su rol en los ecosistemas, carece de estudios sistemáticos recientes. Por ello, este *policy brief* destaca la urgencia de investigar la diversidad y funcionalidad de las arqueobacterias en los ecosistemas marinos peruanos y de impulsar proyectos piloto que podrían enfocarse en el uso de arqueas para la biorremediación de ecosistemas marinos contaminados, su aplicación como bioindicadores ambientales o para monitorear la salud de zonas costeras, y su aprovechamiento en la generación de bioenergía a partir de residuos orgánicos.

Por otro lado, ante el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y el consecuente cambio climático, se hace un llamado a instituciones peruanas como el Instituto del Mar del Perú (Imarpe), el Ministerio del Ambiente (Minam), el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (Sernanp) y el Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (Concytec), para que implementen planes que fortalezcan la investigación y aprovechen el potencial de las arqueobacterias en la mitigación del cambio climático y la protección de los ecosistemas.

En el Perú, distintas instituciones como las universidades cuentan con laboratorios e infraestructura para la investigación de microbiología ambiental y captura de carbono. Por ejemplo, la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM) de Lima dispone del grupo de investigación especializado en genómica funcional de microorganismos y biorremediación denominado MICROGEN, así como el grupo de investigación BIOAQUA. De igual manera, la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSH) de Ayacucho cuenta con laboratorios de biología molecular y bioinformática, que facilitan estudios sobre microorganismos en diversos ambientes. A nivel internacional, universidades peruanas como la Universidad Católica de Santa María (UCSM) de Arequipa han establecido convenios con la Universidad de Varsovia para la instalación de laboratorios de datación de carbono-14, lo que podría ser beneficioso en los estudios futuros de este campo. Asimismo, la Universidad Científica del Sur (UCSUR) de Lima cuenta con grupos de investigación en comunidades acuáticas, cuya línea de investigación de microbiología de ambientes acuáticos está en proceso de consolidación. Por ello, este trabajo sería objeto de interés para investigaciones futuras en estos equipos de investigación.



Contribución de los autores

Todos los autores participaron de manera equitativa en la conceptualización, desarrollo, análisis y redacción del presente documento, y contribuyeron con sus conocimientos y experiencia en cada etapa del proceso.

Fuente de financiamiento

Autofinanciado.

Potenciales conflictos de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

Referencias bibliográficas

- Adam, P. S., Kolyfetis, G. E., Bornemann, T. L. V., Vorgias, C. E. y Probst, A. J. (2022). «Genomic remnants of ancestral methanogenesis and hydrogenotrophy in Archaea drive anaerobic carbon cycling». *Science Advances*, 8(44). Disponible en: <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abm9651>
- Albers, S. V. (2016). «Extremophiles: Life at the deep end». *Nature*, 538(457). Disponible en: <https://www.nature.com/articles/538457a>
- Altermann, E. et al. (2022). «Functionalized nanoparticles for ruminal methanogen remediation: A novel approach to mitigate methane emissions». *Journal of Environmental Biotechnology*, 15(3), pp. 210-220.
- Anjum, M. I. et al. (2023). «Temperature-dependent responses of ruminal methanogens: Implications for methane emissions under climate change scenarios». *Frontiers in Microbial Ecology*, 9(1), pp. 45-58.
- Brumley, D. R., Carrara, F., Hein, A. M., Hagstrom, G. I., Levin, S. A. y Stocker, R. (2020). «Cutting through the noise: Bacterial chemotaxis in marine microenvironments». *Frontiers in Marine Science*, 7(527). Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2020.00527/full>
- Castelle, C. J., Wrighton, K. C., Thomas, B. C., Hug, L. A., Brown, C. T., Wilkins, M. J., Frischkorn, K. R., Tringe, S. G., Singh, A., Markillie, L. M., Taylor, R. C., Williams, K. H. y Banfield, J. F. (2015). «Genomic expansion of domain archaea highlights roles for organisms from New Phyla in anaerobic carbon cycling». *Current Biology*, 25(6), pp. 690-701. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982215000160>
- Danovaro, R., Rastelli, E., Corinaldesi, C., Tangherlini, M. y Dell'Anno, A. (2017). «Marine archaea and archaeal virus under global change». *F1000Research*, 6(1241). Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29034077/>
- Dithugoe, C. D., Bezuidt, O. K. I., Cavan, E. L., Froneman, W. P., Thomalla, S. J. y Makhallanyane, T. P. (2023). «Bacteria and archaea regulate particulate organic matter export in suspended and sinking marine particle fractions». *mSphere*, 8(3), e00420-22. Disponible en: <https://journals.asm.org/doi/10.1128/msphere.00420-22>
- Esquerre, C. G., Maturrano, L. y Zavaleta, A.I. (2003). «Arqueas halófilas productoras de betacaroteno aisladas de las salinas solares de Huacho-Lima». *Ciencia e Investigación, Facultad de Farmacia y Bioquímica UNMSM*, 6(2), pp. 9-14. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/304895742.pdf>
- Falkowski, P. G., Fenchel, T. y DeLong, E. F. (2008). «The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles». *Science*, 320(5879), pp. 1034-1039. Disponible en: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.1153213>
- Flemming, H.-C. y Wuertz, S. (2019). «Bacteria and archaea on Earth and their abundance in biofilms». *Nature Reviews Microbiology*, 17(4), pp. 247-260. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41579-019-0158-9>
- Fuhrman, J. A. y Caron, D. A. (2016). «Heterotrophic planktonic microbes: Virus, bacteria, archaea, and protozoa». En: *Handbook of Environmental Microbiology* (4.ª ed.). American Society for Microbiology. Disponible en: <https://doi.org/10.1128/9781555818821.ch4.2.2>
- Hassan, M. B., Jovane, L., Cabral, A. D. S., Abreu, F., Bergo, N. M. y Pellizari, V. (2022). «Carbon sequestration assessment using varying concentrations of magnetotactic bacteria». *Environmental Advances*, 9, 100290. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666765722001259>
- Hayes, J. M. y Waldbauer, J. R. (2006). «The carbon cycle and associated redox processes through time». *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 361(1470), pp. 931-950. Disponible en: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1578725/>
- He, Y., Li, M., Perumal, V., Feng, M., Fang, J., Xie, J., Sievert, S. M. y Wang, F. (2016). «Genomic and enzymatic evidence for acetogenesis among multiple lineages of the archaeal phylum Bathyarchaeota widespread in marine sediments». *Nature Microbiology*, 1, 16035. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27572832/>
- Kits, K. D., Sedlacek, C. J., Lebedeva, E. V., Han, P., Bulaev, A., Pjevac, P., Daebeler, A., Romano, S., Albertsen, M., Stein, L. Y., Daims, H. y Wagner, M. (2017). «Kinetic analysis of a complete nitrifier reveals an oligotrophic lifestyle». *Nature*, 549(7671), pp. 269-272. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28847001/>
- Könneke, M., Bernhard, A., De la Torre, J., Walker, C. B., Waterbury, J. B. y Stahl, D. A. (2005). «Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon». *Nature*, 437, pp. 543-546. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/16177789/>
- Anjum, S., Nazir, A., Farooq, B., Farooq, M. y Yousuf, S. (2023). «Methanogenesis and its role in climate-change alleviation». En: J. A. Parry (ed.), *Archaea: Evolution, physiology, and molecular biology* (pp. 267-285). Springer. Disponible en: <https://www.springerprofessional.de/methanogenesis-and-its-role-in-climate-change-alleviation/23873002>
- Niu, M., Liang, W. y Wang, F. (2018). «Methane biotransformation in the ocean and its effects on climate change: A review». *Science China Earth Sciences*, 61(12), pp. 1697-1713. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11430-017-9299-4>
- Oberle, B. (2016). «Carbon relations, the role in plant diversification of». En: R. M. Kliman (ed.), *Encyclopedia of Evolutionary Biology* (pp. 392-396). Waltham. Academic Press. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128000496002614>
- Pajares, S. y Ramos, R. (2019). «Processes and microorganisms involved in the marine nitrogen cycle: Knowledge and gaps». *Frontiers in Marine Science*, 6, 739. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2019.00739/full>
- Restrepo Ortiz, C. X. (2015). *Biología y ecología poblacional de Archaea no cultivadas en ambientes naturales analizadas mediante marcadores moleculares específicos de taxones*. [Tesis de Ph. D. Universitat de Barcelona]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/handle/10803/386392#page=1>
- Semedo, M., Lopes, E., Baptista, M. S., Oller-Ruiz, A., Gilabert, J., Tomasino, M. P. y Magalhães, C. (2021). «Depth profile of nitrifying archaeal and bacterial communities in the remote oligotrophic waters of the North Pacific». *Frontiers in Microbiology*, 12, 624071. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2021.624071/full>
- Stahl, D. A. y De la Torre, J. R. (2012). «Physiology and diversity of Ammonia-Oxidizing Archaea». *Annual Review of Microbiology*, 66(1). Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22994489/>
- Tiedje, J. M., Bruns, M. A., Casadevall, A., Criddle, C. S., Elie-Fadrosch, E., Karl, D. M., Nguyen, N. K. y Zhou, J. (2022). «Microbes and climate change: A research prospectus for the future». *mBio*, 13(3), e00800-22. Disponible en: <https://journals.asm.org/doi/10.1128/mbio.00800-22>
- Wang, F., Zhang, Y., Chen, Y., He, Y., Qi, J., Hinrichs, K., Zhang, X., Xiao, X. y Boon, N. (2013). «Methanotrophic archaea possessing diverging methane-oxidizing and electron-transporting pathways». *The ISME Journal*, 8(5), pp. 1069-1078. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/ismej2013212>



- Yang, M., Liu, N., Wang, B., Li, Y., Li, J. y Liu, C. (2022).** «Archaeal contribution to carbon-functional composition and abundance in China's coastal wetlands: Not to be underestimated». *Frontiers in Microbiology*, 13. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2022.1013408/full>
- Yoshinaga, M. Y., Lazar, C. S., Elvert, M., Lin, Y., Zhu, C., Heuer, V. B., Teske, A. P. y Hinrichs, K.-U. (2015).** «Possible roles of uncultured archaea in carbon cycling in methane-seep sediments». *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 164, pp. 35-52. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016703715002720>
- Zhang, X.-X., Zhang, C.-J., Liu, Y., Zhang, R.-R. y Li, M. (2022).** «Non-negligible roles of archaea in coastal carbon biogeochemical cycling». *Trends in Microbiology*, 31(6), pp. 586-600. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0966842X2200316X>
- Zhou, Y., Zhang, R., Tian, K., Zhao, S., Shi, H., Gong, W. y Lei, Q. (2023).** «Characteristics of the methanotroph used in coalbed methane emission reduction: Methane oxidation efficiency and coal wettability». *Fuel*, 349, 128596. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236123012097>