

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

ESCUELA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

Aplicación de microorganismos y sus productos en la industria

de la construcción

Monografía previa a la obtención del título de Licenciado en

Microbiología

Gabriel Alejandro Rivadeneira Ortega

Quito, 2025

CERTIFICACIÓN

Certifico que la Monografía de Microbiología del Sr. Gabriel Alejandro Rivadeneira Ortega ha sido concluida de conformidad con las normas establecidas; por lo tanto, puede ser presentada para la calificación correspondiente.

Dr. Martín Sebastián Marcial Coba

Quito, 25 de Junio de 2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, con profunda gratitud, a mi familia, quienes, con su amor incondicional, apoyo constante y confianza en mí, han sido el pilar fundamental a lo largo de este camino académico.

A mis docentes y mentores, por compartir sus conocimientos y sembrar en mí la curiosidad científica.

A mi profesor y tutor de monografía, Martín Marcial, por su paciencia, dedicación y compromiso en guiarme con esmero a lo largo de este proceso, fomentando en todo momento la mejora continua y el rigor académico.

A mis amigos y compañeros de carrera, con quienes compartí este camino. A pesar de los altibajos, supimos enfrentar juntos los desafíos, apoyándonos mutuamente y creciendo en el proceso.

TABLA DE CONTENIDOS

1. RESUMEN.....	1
2. ABSTRACT.....	2
3. INTRODUCCIÓN.....	3
4. OBJETIVOS.....	10
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	10
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
5. MARCO TEÓRICO	11
5.1 MICROORGANISMOS USADOS EN CONSTRUCCIÓN.....	11
5.1.1 MICELIO FÚNGICO	11
5.1.2 BACTERIAS AUTORREPARADORAS DE CONCRETO	13
5.1.3 CONSORCIOS MICROBIANOS.....	17
5.2 METABOLITOS MICROBIANOS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN.....	18
5.3 INCORPORACIÓN DE MICROORGANISMOS EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	21
5.3.1 ENCAPSULACIÓN.....	21
5.4 MICROORGANISMOS GENÉTICAMENTE MODIFICADOS	23
6. CONCLUSIONES	27
7. RECOMENDACIONES.....	29
8. REFERENCIAS	30
9. TABLAS.....	42

1. RESUMEN

La creciente expansión de la industria de la construcción y su consecuente demanda de recursos ha generado un notable impacto ambiental, especialmente por la producción de cemento y las emisiones de gases de efecto invernadero. Ante esta problemática, el uso de microorganismos y sus productos para implementarlos como materiales de construcción vivos (LBM) han emergido como una alternativa innovadora. El objetivo de esta monografía fue analizar el estado actual del arte referente a la aplicación de materiales de construcción vivos y sus productos metabólicos en la producción de materiales de construcción sostenibles, considerando sus ventajas, desafíos y perspectivas futuras. Por este motivo, se revisaron aspectos, como los principales microorganismos al igual que el uso de metabolitos como los exopolisacáridos y consorcios microbianos aplicados en el sector. Asimismo, se abordaron métodos de incorporación microbiana en materiales de construcción, destacando la encapsulación como estrategia clave para preservar su viabilidad. Finalmente se exploraron los avances en ingeniería genética para optimizar funciones específicas en microorganismos. La información recopilada destacó que estos biomateriales presentan beneficios significativos en términos de sostenibilidad, debido a la reducción en el consumo energético, aprovechamiento de desechos orgánicos y la mejora de propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y la capacidad de autorreparación por la precipitación de carbonato de calcio. Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la viabilidad a largo plazo, la estandarización de procesos y la evaluación del impacto ambiental por lo que es primordial continuar con investigaciones que permitan su aplicación segura y eficiente a escala industrial a largo plazo.

Palabras clave: biomateriales, biomineralización, impacto ambiental, microorganismos, sostenibilidad.

2. ABSTRACT

The growing expansion of the construction industry and its consequent demand for resources has generated a notable environmental impact, especially due to the production of cement and the emissions of greenhouse gases. In response to this problem, the use of microorganisms and their products to implement them as living building materials (LBM) has emerged as an innovative alternative. The objective of this monograph was to analyze the current state of the art regarding the application of living building materials and their metabolic products in the production of sustainable construction materials, considering their advantages, challenges, and future perspectives. For this reason, aspects such as the main microorganisms, as well as the use of metabolites such as exopolysaccharides and microbial consortia applied in the sector were reviewed. Likewise, microbial incorporation methods in construction materials were addressed, highlighting encapsulation as a key strategy to preserve their viability. Finally, advances in genetic engineering were explored to optimize specific functions in microorganisms. The collected information highlighted that these biomaterials present significant benefits in terms of sustainability, due to the reduction in energy consumption, the use of organic waste, and the improvement of mechanical properties such as compressive strength and the self-healing capacity through calcium carbonate precipitation. However, challenges related to long-term viability, process standardization, and environmental impact assessment persist, which is why it is essential to continue with research that allows their safe and efficient application at industrial scale in the long term.

Keywords: biomaterials, biomineralization, environmental impact, microorganisms, sustainability.

3. INTRODUCCIÓN

A nivel global, el aumento poblacional sostenido ha tenido como resultado un auge en la industria de la construcción. Debido a esto, se ha requerido de una mayor cantidad de insumos y energía en la producción de material para la construcción, entre los cuales destacan el hormigón, mortero de cemento, ladrillo de arcilla cocida, entre otros. En conexión con esto, se estima que 4 billones de toneladas de cemento son producidos al año, llegando a ser este el segundo material más utilizado en la Tierra después del agua (Iqbal et al., 2021). De igual forma, una gran cantidad de recursos económicos y energéticos se invierten en la reparación y mantenimiento de estructuras. Por ejemplo, Reino Unido utiliza entre el 35-45% del presupuesto de infraestructuras en reparaciones, mantenimiento y reemplazo de estructuras existentes y nuevas, mientras que ese rubro alcanza el 50% en Estados Unidos (Gardner et al., 2018). Consecuentemente, se ha observado un aumento considerable en la emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂, siendo las actividades relacionadas a la construcción responsables de aproximadamente entre el 6-8% del total de emisiones por causas antropogénicas (Martuscelli, Soares, Camões, y Lima, 2020).

Con base en los antecedentes arriba descritos, surge la necesidad de buscar alternativas que permitan mitigar el impacto medioambiental asociado a la industria de la construcción. Entre estas, se puede mencionar el uso de materiales ecológicos, que han sido fabricados a partir de materiales reutilizados, biodegradables o no degradables (Villao y Llangarí, 2024). Por ejemplo, el bambú, en función de su rápido crecimiento, gran captación de CO₂ y propiedades estructurales que igualan al acero en concreto; es un material prometedor, aunque su durabilidad es menor en comparación con el hormigón armado (Bello y Villacreses, 2021). En la misma línea, se destaca el hempcrete u hormigón sostenible el cual posee una baja conductividad térmica, por lo que actúa como un gran aislante (Kore y Sudarsan, 2021). No obstante, Villao y Llangarí

(2024), argumentan que debido a la pobre resistencia a la compresión y flexión del hempcrete, este no es apto para algunas aplicaciones estructurales; además, su uso se ve reducido en climas cálidos y húmedos, debido a que absorbe fácilmente la humedad lo cual genera que alcance temperaturas excesivamente altas.

Además de los materiales anteriormente mencionados, desde la Microbiología, se han buscado alternativas basadas en el uso de microorganismos y sus productos para implementarse en la construcción. Su utilización se sustenta en el potencial para reducir considerablemente la contaminación ambiental asociada a la construcción, ya que su manufactura necesita de un menor consumo energético, pueden fabricarse a partir de desechos orgánicos e incluso algunos consumen CO_2 para realizar procesos metabólicos (Gardner et al., 2018). Por consiguiente, ha surgido un campo de investigación, relativamente nuevo, enfocado en el desarrollo de materiales de construcción vivos (LBM). Dentro de estos, los microorganismos mayormente estudiados son las bacterias, hongos filamentosos y cianobacterias con la habilidad de precipitar el carbonato de calcio (CaCO_3) (Amran et al., 2022). El carbonato de calcio es uno de los materiales más abundantes en la corteza terrestre, presente principalmente en rocas sedimentarias como la caliza (Niu et al., 2022). Su formación está estrechamente vinculada a la concentración de bicarbonato (HCO_3^-) en solución (Sharma et al., 2022). A nivel biológico, los microorganismos desempeñan un papel clave al catalizar la conversión de dióxido de carbono (CO_2) y agua en bicarbonato a través de la acción de la enzima anhidrasa carbónica, lo que acelera significativamente este proceso y facilita la posterior precipitación de carbonato de calcio (Al Omari et al., 2016). En el ámbito industrial, el ser humano ha aprovechado el carbonato de calcio en la construcción, ya sea como agregado en forma de piedra caliza o como componente del cemento, debido a las propiedades que aporta al material final, entre ellas su alta resistencia a la compresión (Macías y Ortiz, 2022). Asimismo, se ha demostrado que la biomineralización del CaCO_3 producido por los microorganismos permite sellar grietas

producidas en construcciones, concediendo a estos materiales la capacidad de autorrepararse (Chuo et al., 2020). En este sentido, la presencia de LBM y fuentes de calcio en grietas, estimula la producción de carbonato de calcio, reparando así la grieta producida (Amran et al., 2022). Además, la precipitación de CaCO_3 no se remite únicamente a la reparación de grietas, sino también a la producción de biocemento. En la misma línea, la implementación de microalgas para la producción de biocemento específicamente en el proceso de horneado permitiría reducir entre un 50-85% el uso de energía, es decir, menor producción de CO_2 por manufactura (Barberán et al., 2020). Lo mencionado anteriormente se lleva a cabo ya que, contrario a la producción convencional de cemento que necesita llegar a temperaturas de hasta 1450°C para la calcinación de la piedra caliza, las microalgas logran precipitar de forma biológica el CaCO_3 reduciendo así la energía implementada para el mismo fin (Barberán et al., 2020).

En la actualidad, las bacterias son uno de los microorganismos más estudiados dentro de los LBM. De esta forma, las bacterias de mayor interés son las que cuentan con la capacidad de precipitar el CaCO_3 mediante enzimas, como por ejemplo la ureasa (Ma et al., 2020). Esta, es una enzima que cataliza la hidrólisis de la urea, reacción que genera amonio y ácido carbónico (Heveran et al., 2019). Al final de una cadena de reacciones químicas se producirán iones carbonato, los cuales, en presencia de iones de calcio, formarán cristales de carbonato de calcio (Iqbal et al., 2021). En este sentido, las bacterias tienen un rol importante en la autorreparación en construcciones. Entre las más estudiadas en este campo se encuentran *Sporosarcina pasteurii* y especies de *Bacillus* (Chuo et al., 2020). Al ser implementadas en construcciones y en condiciones que permitan el desarrollo de estructuras vegetativas como por ejemplo la humedad, oxígeno y disponibilidad de nutrientes, las bacterias precipitan CaCO_3 , sellando las grietas (Kaushal y Saeed, 2024). En conexión con este fundamento, algunos estudios han sugerido la potencial aplicación de estos microorganismos con el propósito de

autorreparar concreto. Por ejemplo, la incorporación de esporas de *Bacillus pseudofirmus* junto con gránulos de lactato de calcio hace posible que, cuando se agrieta la estructura, estos microorganismos pasen a su forma vegetativa como respuesta a la humedad y exposición al oxígeno, para así formar piedra de cal, sellando las grietas (Barberán et al., 2020).

Al igual que las bacterias, algunos hongos pueden precipitar carbonato de calcio (CaCO_3) mediante enzimas como la ureasa, logrando así reparar grietas en las estructuras. En cuanto a estos, se ha puesto mayor interés debido a su capacidad de producir una mayor cantidad de biomasa en forma de hifas, lo que podría mejorar las propiedades mecánicas del material en contraste con las bacterias (Martuscelli, Soares, Camões, y Lima, 2020).

Paralelamente, las hifas de los hongos pueden aplicarse en otros campos. Por ejemplo, se pueden producir materiales compuestos a base de micelio, los cuales llegan a ser similares a aquellas de poliestireno expandido en términos de sus propiedades mecánicas de tracción e impacto, estabilidad a altas temperaturas y a la radiación ultravioleta (Vivas et al., 2021). Asimismo, las hifas de los hongos, debido a sus propiedades anisotrópicas y gran flexibilidad han permitido la creación de aerogeles, mismos que son materiales ligeros y porosos utilizados generalmente como material de aislamiento térmico (Tong et al., 2023). Por ejemplo, *Pleurotus eryngii* ha sido utilizado para este fin, mejorando características en cuanto a compresibilidad y resiliencia mecánica en la fabricación de aerogeles con hifas (Tong et al., 2023).

Además de lo arriba descrito, la conformación de consorcios microbianos podría potenciar la efectividad de los LBM. En la misma línea, los consorcios microbianos son asociaciones entre distintos microorganismos que buscan mejorar las propiedades de los materiales (Xu y Yu, 2021). Los consorcios microbianos tienen un mayor potencial

que los cultivos puros debido a su versatilidad para realizar tareas más complejas y sobrevivir en entornos más cambiantes (Xu y Yu, 2021). Por ejemplo, un estudio realizado para evaluar el desempeño de consorcios bacterianos con metabolismos aeróbicos, anaeróbicos y aeróbicos facultativos pre cultivados previamente aislados para reparar concreto, demostró que su capacidad para reparar el concreto fue consistente con la reparación mediada por cultivos puros, además de una supervivencia incrementada en ambientes adversos y la precipitación de CaCO_3 en condiciones anaeróbicas mediante procesos de desnitrificación (Zhang et al., 2017).

Entre otras aplicaciones de los LBM, se puede destacar la facultad de bacterias para poder formar biopelículas. Las biopelículas son estructuras heterogéneas complejas que contienen diferentes poblaciones de microorganismos, los cuales se adhieren sobre superficies mediante la formación de exopolisacáridos (EPS), proteínas y ácidos nucleicos en la matriz extracelular (Schilcher y Horswill, 2020). Estas estructuras le confieren propiedades como barrera física contra la desecación, integridad estructural, comunicación entre las células y la adquisición de nutrientes (Rumbaugh y Sauer, 2020). De esta forma, las biopelículas podrían tener aplicaciones biotecnológicas en la industria de la construcción. Con respecto a eso, el estudio de Dade (2017) sugiere que la modificación de la expresión de EPS permitiría manipular la estructura de los cristales de calcio e incluso controlar la unión de iones de calcio y carbonato, promoviendo una mineralización más eficiente.

Por otra parte, no solo los atributos naturales de algunos microorganismos pueden aprovecharse, sino que también la ingeniería genética ha abierto nuevas posibilidades para el diseño de biomateriales con características específicas. En conexión con esto, la modificación genética de los microorganismos ofrece la posibilidad de optimizar las propiedades y funciones de materiales vivos diseñados (ELMs) para controlar la producción de compuestos específicos, mejorar la resistencia a condiciones

ambientales adversas y facilitar la interacción entre diferentes microorganismos (Salifu et al., 2021). Consecuentemente, la manipulación genética es un tema relevante para obtener microorganismos mejorados con características específicas que sean de interés. Estudios recientes han descrito la inserción de genes codificantes de productos asociados a la producción de ureasa proveniente de *Sporosarcina pasteurii* en *Escherichia coli*, confiriéndole la capacidad de precipitar carbonato de calcio (Qiu et al., 2021). En la misma línea, según Nguyen et al. (2014) la fusión de dominios peptídicos funcionales a la proteína CsgA, clave en la producción de biopelículas en *E. coli*, hizo posible controlar propiedades de esta comunidad como la adhesión selectiva, resistencia mecánica o actividad enzimática.

Por todo lo anteriormente mencionado, los materiales de construcción vivos (LBM) surgen como una opción prometedora a la alta contaminación proveniente de la industria de la construcción convencional. Lamentablemente, este es un tema relativamente nuevo, y a pesar de los avances logrados, aún existen desafíos que deben superarse, por lo que es necesario realizar investigaciones profundas que involucren la caracterización de microorganismos útiles para este propósito, la optimización de las condiciones de propagación a gran escala de estos, la incorporación de los microorganismos en los materiales de construcción, el incremento de su viabilidad a largo plazo y el desarrollo de modelos matemáticos que permitan predecir el comportamiento de los biomateriales.

De esta forma, en el siguiente trabajo se presentan los principales avances y resultados obtenidos en los últimos años respecto a este tema. Asimismo, se abordará los microorganismos más relevantes en este campo y la utilización de los metabolitos de estos en la construcción. También se explicará la forma en que los microorganismos y sus metabolitos son implementados en materiales de construcción. Finalmente se

explicará el impacto de la modificación genética en estos microorganismos y sus posibles aplicaciones en la construcción.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar el estado actual, las ventajas, desafíos y perspectivas futuras de la aplicación de microorganismos y sus productos metabólicos en la producción de materiales de construcción sostenibles.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar los microorganismos más relevantes, con base en sus capacidades metabólicas potencialmente utilizados a gran escala en la industria de la construcción.
2. Reconocer las propiedades mecánicas y ambientales de los LBMs, junto con las metodologías de producción, en comparación con los materiales de construcción tradicionales.
3. Examinar el papel de la ingeniería genética y los consorcios microbianos en la optimización de biomateriales con propiedades específicas para aplicaciones prácticas en la construcción.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 MICROORGANISMOS USADOS EN CONSTRUCCIÓN

5.1.1 MICELIO FÚNGICO

Los hongos filamentosos exhiben un crecimiento vegetativo característico, en el cual desarrollan una red tridimensional de hifas interconectadas que se expanden mediante el *Spitzenkörper* para formar micelio (Buff et al., 2023). Bajo condiciones de cultivo controladas, esta red micelial se expande de forma densa y cohesiva, estableciendo una fuerte adhesión con partículas lignocelulósicas presentes en el sustrato, tales como madera, caña de azúcar o cascarilla de arroz (Lanza et al., 2024). Esta capacidad de formar una matriz biológica compacta y mecánicamente estable es una de las bases para su aprovechamiento en el desarrollo de biocompuestos para su implementación en la industria de la construcción sostenible (Kuribayashi et al., 2022).

Dentro de los LBM, el micelio fúngico surge como un biomaterial prometedor debido a sus excelentes propiedades mecánicas y por ser ambientalmente amigable (Xia, 2024). En la misma línea, las propiedades mecánicas e hidrofobicidad del micelio son atribuidas a la pared celular circundante a la membrana plasmática (Ibe y Munro, 2021). En este sentido, la pared celular de los hongos está compuesta en su mayoría por quitina y β -glucanos (Zhao et al., 2020). Dentro de estos últimos, los glucanos β -1,3 y β -1,6 se unen mediante enlaces glicosídicos para formar una red ramificada de polímeros que confieren elasticidad a la pared celular (Feijóo et al., 2021). Asimismo, la formación de matrices antiparalelas entre moléculas de quitina unidas por puentes de hidrógeno le confiere gran resistencia a la tracción y le permite eliminar el agua (Ruiz y Ortiz, 2019). De esta forma, las propiedades mecánicas del micelio lo hacen un biomaterial idóneo para ser utilizado como espuma aislante, absorbente acústico, como revestimientos y paneles (Jones et al., 2020).

Con base en lo anteriormente mencionado, Al-Qahtani et al. (2025) en un estudio simulado con ayuda del software “DesignBuilder” calibrado con las condiciones ambientales de la capital de Qatar, evaluó la eficacia del aislamiento térmico del micelio respecto al concreto, poliestireno extruido y poliestireno expandido con el objetivo de valorar su implementación para reducir las emisiones de CO₂ emitidas por el uso de aire acondicionado. Esta simulación obtuvo como resultado que la implementación de micelio aplicado en el techo y las superficies internas y externas de las paredes permitió reducir un 39% las emisiones de CO₂ en los meses más calurosos de verano (Al-Qahtani et al., 2025). Asimismo, el poliestireno expandido y el poliestireno extruido redujeron similarmente el 30% y finalmente el concreto redujo un 17% (Al-Qahtani et al., 2025). Este estudio abre la puerta para realizar experimentos enfocados en evaluar su aplicación en lugares calurosos y fríos para reducir el gasto energético debido al uso de aire acondicionado o calefactores.

Por otro lado, un experimento realizado por Thangavel et al. (2024) permitió evaluar la influencia de sustratos como paja, fibra de coco y madera aserrada en el crecimiento de *Pleurotus ostreatus* y propiedades como la densidad, la resistividad térmica, la resistencia a la compresión y la resistencia al fuego en bloques hechos a base de micelio. Consecuentemente, se encontró que una combinación entre paja y fibra de coco fue el mejor en la mayoría de los casos teniendo una absorción de agua menor, además, respecto a la resistencia a la compresión logró alcanzar una resistencia de 6 MPa y finalmente, tuvo la mayor resistencia al fuego con tan solo 2 cm de área carbonizada (Thangavel et al., 2024a). Igualmente, se evidenció que la combinación de paja y fibra de coco tuvo una resistencia térmica baja, de aproximadamente 25 mK/W, mientras que la madera aserrada en combinación con paja, fibra de coco e individualmente tuvieron una mayor resistencia térmica (Thangavel et al., 2024b). Cabe destacar la influencia del tipo de sustrato utilizado para el crecimiento del micelio en la conformación de bloques, lo cual abre un campo de investigación orientado a evaluar el

desarrollo y la optimización de biomateriales a base de micelio, así como el mejoramiento de sus propiedades físicas relevantes para su aplicación en la industria de la construcción.

Contrariamente a la implementación única de micelio fúngico dentro de la construcción, existe la posibilidad de implementar este junto con otros materiales. Así lo demuestra Alima (2024) quien en un experimento denominado BioForms implementó el micelio de *Pleurotus ostreatus* y junto con la ayuda de impresoras 3D creó materiales compuestos de plástico de madera (WPC) creados con base en algoritmos basados en la morfogénesis de Turing para crear paneles de pared biodegradables. En este sentido, la implementación de dicho algoritmo generó estructuras orgánicas complejas que crearon surcos intrincados y trayectorias texturizadas por donde las hifas se filtraron y extendieron permitiendo controlar su crecimiento y su adherencia a los paneles de WPC; de esta forma, el micelio actuó como un adherente natural de las capas de WPC formando un panel de pared tipo sándwich unificado (Alima, 2024).

5.1.2 BACTERIAS AUTORREPARADORAS DE CONCRETO

Los microorganismos, como las bacterias requieren de condiciones específicas como pH, temperatura, disponibilidad de nutrientes y presencia o ausencia de oxígeno para poder desarrollarse (López et al., 2021). No obstante, existen bacterias que han desarrollado mecanismos de resistencia que les han permitido sobrevivir a ambientes hostiles (Laventie y Jenal, 2020). En este contexto, el hormigón ejemplifica estas condiciones adversas, caracterizándose por escasez de oxígeno, agua y nutrientes, junto con un pH extremadamente alcalino (12.5–13.5) lo cual limita significativamente el crecimiento y desarrollo de numerosas bacterias. (Iglesias et al., 2020). A pesar de estas condiciones hostiles, algunas cepas bacterianas formadoras de estructuras de resistencia han exhibido un potencial para sobrevivir y reparar fisuras del hormigón al ser incorporadas en la mezcla de este material (Manzanares, 2017). Dentro de las

bacterias utilizadas como LBM y específicamente como autorreparadoras de concreto destacan en su mayoría las del género *Bacillus*, debido a su capacidad de formar esporas. Entre algunas de ellas se puede mencionar el uso de *B. pasteurii*, *B. sphaericus*, *B. cohnii*, *B. pseudofirmus*, *B. subtilis* y *B. halodurans* (Manvith et al., 2020a). Las bacterias de este género son caracterizadas por ser Gram positivas, aerobias o facultativas, morfología en forma de bacilo y en su mayoría mesófilas (González et al., 2024). Las células esporuladas de *Bacillus* spp. se forman como respuesta a condiciones ambientales adversas, estas tienen un bajo contenido de agua, mismo que puede llegar a ser un 35% de su peso húmedo, lo que les permite permanecer en estado de latencia y ser metabólicamente inactivas (Zhang et al., 2020). Las esporas están formadas por varias capas las cuales cubren el núcleo central, en donde se encuentra el ADN, ribosomas, enzimas metabólicas y biosintéticas (Cho y Chung, 2020). Así como las condiciones adversas desencadenaron la esporulación, cuando las condiciones ambientales sean óptimas para el desarrollo, la misma volverá a su forma vegetativa (Sri et al., 2021). De esta forma, la estructura única y la inactividad metabólica confieren una resistencia que hace posible la supervivencia de la célula a ambientes adversos.

Para la implementación de las bacterias en el hormigón es necesario que las mismas puedan generar ion carbonato mediante procesos metabólicos y posteriormente precipitar el carbonato de calcio (Muñoz et al., 2023). Con relación a esto, existen algunas formas en las que las bacterias pueden realizar un proceso de biomineralización; entre ellas se encuentra la reducción de sulfato en condiciones anóxicas, metabolismo de aminoácidos en presencia de oxígeno para liberar amonio, reducción de nitratos en condiciones anaeróbicas (desnitrificación), desaminación del ácido úrico por bacterias ureolíticas en presencia de oxígeno y finalmente la transformación metabólica aeróbica de sales de calcio (Manvith et al., 2020b). Es importante destacar que también existen vías autotróficas capaces de inducir la

precipitación de carbonato de calcio como se resume en la [Tabla 1](#). Sin embargo, la mayoría de estas no se implementan comúnmente debido a las condiciones ambientales específicas que requieren para llevarse a cabo (Bandyopadhyay et al., 2023). Aunque la mayoría de estos procesos ocurren comúnmente en la naturaleza, actualmente por su simplicidad se implementa la hidrólisis de la urea mediante la enzima ureasa en un ambiente rico en calcio para promover la formación de carbonato de calcio (Cardoso et al., 2020). Por consiguiente, para promover la precipitación de carbonato de calcio mediante la hidrólisis de la urea mediada por la cepa bacteriana se requiere añadir fuentes de calcio como lactato de calcio, acetato de calcio, glutamato de calcio o cloruro de calcio y urea en el cemento (Rauf et al., 2020).

Al formarse grietas en la estructura las esporas de *Bacillus* spp. entran en contacto con oxígeno y agua, lo que desencadena una serie de procesos bioquímicos que permiten que la espora pase a un estado vegetativo (Feng et al., 2021). A continuación, la urea presente en el medio penetra en la célula a través de la membrana celular; en donde, la ureasa producida por la bacteria hidroliza este sustrato en amoníaco y ácido carbónico, que se equilibrará para formar bicarbonato (Xu y Yu, 2021). Posteriormente, el amoníaco capta protones del agua aumentando así el pH por la producción de iones hidroxilo, los cuales desprotonan una parte del bicarbonato convirtiéndolo en carbonato (Omoriegbe et al., 2021). Finalmente, el carbonato es transportado al exterior directamente por la membrana celular e interactúa con los iones calcio que se concentran en la célula debido a interacciones de polaridad con estructuras extracelulares como ácidos teicoicos y lipoteicoicos, mismos que proporcionan una carga negativa (Carter et al., 2023). En consecuencia, el calcio interactuará con el carbonato para formar carbonato de calcio, provocando que la bacteria quede encapsulada y que de esta forma vuelva a su forma esporulada o, por el contrario, ocurra muerte celular (J. Zhang et al., 2021).

En un estudio realizado por Mondal y Ghosh (2021) se encontró que la precipitación de carbonato de calcio por una cepa de *Bacillus subtilis* y otra de *Deinococcus radiodurans* no solo repararon grietas del cemento, sino también mejoraron algunas características mecánicas del material. Después de 7 días de curado, la cepa de *B. subtilis* había cubierto un 80% de la grieta a una concentración de 10^5 UFC/g mientras que *D. radiodurans* alcanzó un 70% de cobertura (Mondal y Ghosh, 2021). Adicionalmente, el tratamiento con ambas cepas mejoró considerablemente la resistencia a la compresión del material. El tratamiento con *B. subtilis* a una concentración de 10^5 UFC/g a los 28 días logró una compresión aproximada de 55 MPa, mientras que, *D. radiodurans* con los mismos parámetros alcanzó una resistencia a la compresión de 60 MPa (Mondal y Ghosh, 2021). Estos resultados demuestran la mejora del cemento respecto al tratamiento sin bacterias (cemento Portland y arena de río), ya que, este alcanzó una resistencia a la compresión menor a 45 MPa (Mondal y Ghosh, 2021).

En relación con el impacto ambiental, Akhtar et al. (2025) en un ensayo sustituyeron el 10% del cemento necesario por ceniza volante, un subproducto industrial para la producción de concreto. Además, implementaron tratamientos con meta caolín (MK) y micro sílice (MS) junto a una cepa de *Sporosarcina pasteurii* y *Bacillus megaterium* (Akhtar et al., 2025). En la misma línea uno de los resultados más importantes evidenció que, tanto *S. pasteurii* como *B. megaterium* con meta caolín presentaron los menores porcentajes de adsorción de agua a los 120 días con un 1.007% y 1.035 % respectivamente, mientras que, el control (concreto autocompactante) fue de 1.333 % (Akhtar et al., 2025). Asimismo, se encontró que la resistencia a la compresión por parte del control obtuvo el menor valor a los 120 días, siendo de 35.82 MPa, mientras que el tratamiento con meta caolín y *S. pasteurii*, fue el mejor de todos con aproximadamente 43 MPa en el mismo período de tiempo (Akhtar et al., 2025). Este estudio resalta la posibilidad de utilizar subproductos industriales para

substituir parte del uso de cemento, además, resalta el rol de la precipitación de carbonato de calcio por parte de bacterias para sellar grietas, proporcionando mejoras como disminuir la adsorción de agua y aumentar la resistencia a la compresión, alargando así la vida útil del material.

5.1.3 CONSORCIOS MICROBIANOS

Los consorcios microbianos se definen como la asociación mutua entre dos o más poblaciones de microorganismos que se diferencian funcionalmente y tienen un intercambio de metabolitos haciendo más eficaz al flujo de nutrientes, lo cual les da una mayor capacidad de resistencia en cuanto a optimización metabólica y adaptación ambiental (Benjamin et al., 2023). En este contexto, los consorcios microbianos presentan un potencial superior para su aplicación en la industria de la construcción, precisamente por las ventajas metabólicas y adaptativas que ofrecen en comparación con los cultivos puros.

Debido al creciente interés en los consorcios microbianos, se han diseñado consorcios artificiales, mismos que, mediante el estudio del *quorum sensing* (QS) y el uso de modelos computacionales, permiten regular las interacciones microbianas con el objetivo de maximizar la producción de compuestos de interés (Xu y Yu, 2021). En este contexto, la implementación de consorcios artificiales adquiere un valor significativo para la industria de la construcción, particularmente en aplicaciones como la incorporación de microorganismos previamente seleccionados; por ejemplo, en tecnologías de biomineralización como los LBM para potenciar la precipitación de carbonato de calcio en concreto.

En este sentido, Taha et al. (2022) realizaron un experimento donde se evaluó la cantidad de carbonato de calcio precipitada individualmente y en consorcio por 3 cepas: *Bacillus haynesii* (OP115674), *Bacillus piscis* (OP115673) y *Bacillus spizizenii*

(OP115669). Como resultado, se encontró que el peso seco obtenido a partir de la implementación individual de *B. piscis*, *B. haynesii* y *B. spizizenii* obtuvo 0.57g, 0.27g y 0.1g respectivamente, mientras que, el consorcio logró precipitar 0.73g de carbonato de calcio (Taha et al., 2022). En síntesis, el consorcio microbiano fue superior respecto a las cepas implementadas individualmente; esto realza la importancia del estudio de las interacciones entre diferentes microorganismos dentro de los consorcios microbianos para su posible uso en la industria de la construcción.

De igual manera, en un estudio realizado por Mahmoud et al. (2021) donde se evaluó la cantidad de carbonato de calcio precipitado en medio líquido por distintas cepas de *Bacillus* (Mk, Nw-1, Nw-9) implementadas individualmente y en consorcio microbiano se observó un mejor resultado por parte de los consorcios microbianos. En este contexto, la cepa Nw-1 fue la que precipitó la menor cantidad de carbonato de calcio, aproximadamente 1.5mg/ml, mientras que las cepas Mk y Nw-9 precipitaron aproximadamente 2mg/ml de carbonato de calcio individualmente. Por otro lado, la combinación de la cepa Mk y Nw-9 fue la que obtuvo mejores resultados, con aproximadamente 4.5mg/ml, contrario a la unión de las 3 cepas, el cual precipitó aproximadamente 3mg/ml, valor similar al que obtuvo el consorcio de Mk y Nw-1 (Mahmoud et al., 2021). Los resultados de este estudio refuerzan la idea de que los consorcios microbianos podrían ser más eficientes que los cultivos puros; aunque, cabe recalcar la importancia de la selección del mejor consorcio y realizar pruebas de compatibilidad, ya que, como se evidenció en este experimento, la unión de todas las cepas microbianas no terminó siendo mejor en términos de cantidad de carbonato de calcio precipitado.

5.2 METABOLITOS MICROBIANOS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN

Los biopolímeros microbianos son macromoléculas químicamente diversas compuestas por bloques repetitivos de monómeros que surgen como parte del

metabolismo de diversos microorganismos y pueden ser tanto intracelulares como extracelulares (Huamán et al., 2021). En la misma línea, entre los biopolímeros más estudiados destacan los exopolisacáridos (EPS), formados por la polimerización de unidades de monosacáridos (glucosa, galactosa y ramnosa), que pueden estar asociados a otras macromoléculas, como proteínas, enzimas y ácidos nucleicos (Ahuja et al., 2023). En este contexto, los EPS pueden clasificarse con base en su estructura química, funcionalidad y tipo de enlace glicosídico (J. Zhang et al., 2023). Desde el punto de vista químico, se pueden dividir en homoexopolisacáridos, constituidos por un único tipo de monómero, usualmente neutros, y heteroexopolisacáridos, formados por diversos tipos de monómeros y generalmente de naturaleza poli aniónica (Al-Nabulsi et al., 2022). En cuanto a los enlaces glicosídicos que conforman su estructura, estos pueden ser de tipo α o β , con posiciones frecuentes como 1,3; 1,4 o 1,6, lo que determina propiedades fisicoquímicas específicas del polímero (W. Wang et al., 2023). Finalmente, los EPS se agrupan en cuatro categorías de acuerdo a su funcionalidad: adsorbentes, cuyos polímeros cargados permiten la interacción con otras moléculas con carga, facilitando procesos de adhesión celular; estructurales, que intervienen en la organización de la matriz extracelular y favorecen la retención de agua y la protección celular; con actividad superficial, compuestos por moléculas de comportamiento anfifílico que pueden intervenir en procesos de formación de biopelículas; y redox-activos, que participan en la migración y transformación de compuestos redox-sensibles, incluyendo contaminantes orgánicos e inorgánicos (Rana y Upadhyay, 2020).

En concordancia con lo anteriormente mencionado, EPS como el xantano, dextrano y gelano, productos generados a partir de la fermentación bacteriana, surgen como biomateriales prometedores debido a sus propiedades biodegradables, adhesivas y mecánicas (Loaeza et al., 2023). De esta forma, estos EPS podrían ser implementados como estabilizadores, ya que, tienen la capacidad de formar hidrogeles, uniendo así partículas de suelo mediante enlaces de hidrógeno (Patel et al., 2020). Así lo demuestra

Muguda et al. (2020) en un estudio realizado para evaluar el comportamiento del xantano como un estabilizador alternativo al cemento en materiales de construcción de tierra, utilizando específicamente caolín Speswhite como suelo modelo. En este sentido, respecto a la amortiguación de humedad, el xantano superó al cemento, llegando casi a los $50\text{g}/\text{m}^2$ a una humedad relativa de casi el 80% a las 8h, mientras que, el cemento únicamente alcanzó una adsorción de humedad menor a $30\text{g}/\text{m}^2$ a una humedad relativa menor al 55% (Muguda et al., 2020). Respecto a la erosión, el xantano mostró un desempeño similar al cemento, en este caso, ambos presentaron un índice de erodabilidad de 2, es decir que ninguna de las dos superó 5mm de erosión (Muguda et al., 2020). Los resultados presentados por el estudio expusieron las propiedades del xantano como estabilizador, lo cual abre las puertas para futuras investigaciones y aplicaciones en la industria de la construcción.

Al mismo tiempo, un estudio realizado por Chang y Cho (2019) encontró que, en arcillas con baja plasticidad, la aplicación de 5% de cemento mejoró la cohesión de 75,5 kPa a 152,1 kPa, mientras que, el ángulo de fricción aumentó de $27,5^\circ$ a $34,2^\circ$ después de 28 días de curado. Por otra parte, el uso de gelano al 4%, pasó de 18,5 kPa a 127,3 kPa y el ángulo de fricción de $18,7^\circ$ a $30,7^\circ$ en 12 horas después del tratamiento (Chang y Cho, 2019). Aunque en este estudio se observaron propiedades similares a la cementación y en algunos casos mejoras significativas como las mencionadas anteriormente, el estudio resalta la dificultad de su aplicación debido a la dificultad para controlar la temperatura en la práctica, ya que, este biopolímero necesita alcanzar los 90°C para poder disolverse y formar una solución homogénea (Chang y Cho, 2019). Aún así, el estudio demuestra el potencial del gelano por sus propiedades estabilizadoras y su uso como una alternativa ecológica ante el uso de estabilizantes como el cemento con sus respectivas desventajas.

5.3 INCORPORACIÓN DE MICROORGANISMOS EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Si bien los ensayos de laboratorio pueden ofrecer resultados prometedores, el verdadero desempeño de los microorganismos se evalúa en condiciones reales, donde el control experimental es limitado y los factores ambientales son más variables (Fernandez et al., 2021). Por este motivo, la aplicación práctica en campo requiere del diseño de estrategias eficaces que aseguren la supervivencia prolongada de los mismos (Su y Jin, 2022). De esta forma, las técnicas utilizadas para la incorporación de microorganismos desempeñan un papel crucial, ya que contribuyen a su protección frente a las condiciones adversas del entorno y, por tanto, influyen directamente en su eficiencia funcional (Tianwen y Chunxiang, 2020).

5.3.1 ENCAPSULACIÓN

Previamente se ha resaltado la importancia de utilizar microorganismos con la habilidad de sobrevivir en entornos extremos como el hormigón. Aunque estos presenten adaptaciones que les permiten mantenerse viables dentro de dicha matriz, su tiempo de vida y concentración microbiana suelen disminuir significativamente debido al estrés y a las condiciones adversas del medio (Tang y Xu, 2021). Por ello, se han desarrollado métodos de recubrimiento celular con el objetivo de prolongar la viabilidad y funcionalidad de microorganismos en el interior del material. En este contexto, la encapsulación se define como el recubrimiento de células microbianas activas en una matriz que actúe como una barrera externa frente a factores ambientales adversos (Ali et al., 2023). Este proceso es llevado a cabo mediante el uso de varios materiales orgánicos, incluyendo poliuretano, hidrogeles y diversos polímeros, así como inorgánicos, como partículas de perlita expandida y gel de sílice (Zheng et al., 2020). Asimismo, existen diferentes técnicas, de encapsulación, las cuales dependen del propósito final y el material implementado (Bamidele y Emmambux, 2021). Por ejemplo,

en la industria de la construcción, un método implementado es la gelificación iónica, que utiliza biopolímeros aniónicos y iones divalentes para formar geles (Altamirano, 2021).

Entre los principales biopolímeros, se ha destacado el uso del alginato de calcio como un material económicamente viable y eficaz para la encapsulación de bacterias autorreparadoras de concreto mediante gelificación iónica (Fahimizadeh et al., 2020). Es importante especificar que el alginato es un polímero hidrofílico compuesto por ácido β -D-manurónico y ácido α -L-gulurónico unidos por enlaces 1,4 glicosídicos (Hu et al., 2020). En este sentido, los monómeros que componen al alginato los presentan un alto contenido de grupos carboxilo (X. Zhang et al., 2022). De esta forma, la adición de iones metálicos, como Ca^{2+} permite que estos actúen como puentes, uniendo cadenas de grupos carboxilo, formando una estructura tridimensional (X. Zhang, Wang, et al., 2020). De esta forma, los microorganismos quedan atrapados en el gel, lo que proporciona protección frente a ambientes adversos y hace posible su incorporación en mezclas de cemento.

Un estudio realizado por Soysal et al. (2020) exhibió resultados llamativos respecto a la influencia de la concentración de alginato de calcio y su influencia tanto en propiedades del material como en la capacidad autorreparadora de bacterias. El ensayo implementó a *Bacillus pseudofirmus* y *Diaphorobacter nitroreducens* con concentraciones de 0,5%; 1,5% y 3% de perlas de alginato por peso de cemento (Soysal et al., 2020). En primer lugar, se observó una tendencia de disminución significativa de la resistencia a la compresión mientras la concentración de perlas de alginato aumentó (Soysal et al., 2020). Sin embargo, a una concentración de 0,5% de perlas de alginato, el tratamiento con *D. nitroreducens* obtuvo el mejor resultado, logrando casi 60 MPa en comparación con el control (solo cemento) y el tratamiento con *B. pseudofirmus* a la

misma concentración, los cuales fueron similares con aproximadamente 57MPa (Soysal et al., 2020). Además de esto, *D. nitroreducens* a una concentración de 1,5% alcanzó una recuperación de la rigidez aproximada del 19% al día 28, mientras que, el control obtuvo únicamente una recuperación aproximada del 15% (Soysal et al., 2020). Finalmente, se observó que *D. nitroreducens* con una concentración de 1,5% obtuvo un 55% de eficacia curativa al día 28, mientras que *B. pseudofirmus* alcanzó únicamente el 40% en las mismas condiciones (Soysal et al., 2020). En este contexto, el experimento resalta la necesidad de encontrar la concentración más adecuada del material encapsulador para así no comprometer las propiedades intrínsecas del cemento o incluso mejorara el potencial autorreparador de las cepas bacterianas.

Por otra parte, Vedrtnam et al. (2025) investigaron la capacidad autorreparadora de bacterias encapsuladas en tres materiales (esferas de fibra de carbono, arcilla expandida y cápsulas de gelatina) en bloques de hormigón sometidos a altas temperaturas (200°C a 800°C) para simular un incendio. Mediante microscopía electrónica, observaron que los tres materiales promovieron la formación de cristales de carbonato de calcio en la superficie a temperaturas de 200°C a 400°C, pero no a 600°C. La encapsulación con 10% de fibra de carbono mostró la mayor resistencia a la compresión residual post-ensayo, con valores de 6,76% (200°C), 5,58% (400°C), 4,72% (600°C) y 2,97% (800°C). Estos resultados sugieren la viabilidad de evaluar materiales de encapsulación para mantener la actividad bacteriana en condiciones de alta temperatura, con aplicaciones específicas en la autorreparación de estructuras.

5.4 MICROORGANISMOS GENÉTICAMENTE MODIFICADOS

Anteriormente se ha expuesto la importancia y el alcance de la aplicación de LBM en la industria de la construcción. Si bien múltiples cepas salvajes presentan beneficios notables, se ha recurrido a enfoques complementarios para superar

limitaciones naturales como su eficiencia, adaptabilidad y flexibilidad funcional, destacando el uso de la ingeniería genética como una herramienta en la producción de materiales vivos diseñados (ELMs) (Y. Wang et al., 2022). De esta forma, es posible alterar rutas metabólicas para acelerar la precipitación de carbonato de calcio, inducir la sobreexpresión de genes que incrementen su producción o modificar las superficies celulares con el fin de modular la velocidad de este proceso (Molinari et al., 2021).

Una de las tecnologías mayormente utilizadas es la transformación bacteriana con plásmidos clonados (Heveran et al., 2020). En esta se utilizan enzimas de restricción para generar extremos cohesivos tanto en el plásmido como en el fragmento de ADN de interés, el cual se une posteriormente a este sitio específico en el vector mediante una ADN ligasa para formar una molécula recombinante (Tao et al., 2020). Posteriormente, esta construcción es introducida en bacterias a través del proceso de transformación, un tipo de transferencia horizontal de genes (THG), mediante el cual las bacterias incorporan ADN exógeno a través de sus membranas, siempre que se encuentren en un estado de competencia (Y. Wang et al., 2020). Finalmente, es fundamental mantener una expresión estable del plásmido dentro de la célula hospedadora (Emamalipour et al., 2020). Por esta razón, los vectores incluyen genes de resistencia a antibióticos específicos, lo que permite seleccionar únicamente las células transformadas (Michaelis y Grohmann, 2023). Además, incorporan genes reporteros, como la proteína verde fluorescente (GFP), que facilitan la confirmación visual del éxito de la transformación (Brito, 2021).

A modo ilustrativo Chatterjee et al. (2024) implementaron cepas transformadas de *Bacillus subtilis* con el gen de una proteína similar a la biorremediadora, proveniente de la bacteria BKH2 para la formación de gehlenita, como una alternativa al uso convencional de cemento, aplicándolas en compuestos geopoliméricos a base de ceniza volante. De forma preliminar, se observó un aumento en las resistencias a

compresión, tracción y flexión en los morteros geopoliméricos que contenían bacterias, en comparación con los grupos control sin bacterias (Chatterjee et al., 2024). Por ejemplo, cuando se evaluó la reparación de grietas el cubo de mortero con bacterias curado al vapor a 60°C logró una resistencia a la compresión de 30.6 MPa, en contraste, el mismo tratamiento sin bacterias alcanzó 19.5 MPa (Chatterjee et al., 2024). Paralelamente, el estudio abordó un ensayo de toxicidad hacia los microorganismos transformados mediante la prueba colorimétrica MTT en las líneas celulares humanas (WI38 y HaCaT) y con un kit de Merck la sangre de las ratas después de 28 días de exposición donde no se observaron efectos tóxicos en ninguno de los tratamientos (Chatterjee et al., 2024). Este estudio demuestra que las bacterias transformadas pueden mejorar propiedades estructurales y ser una alternativa ecológica al cemento. Asimismo, aborda un aspecto crucial al evaluar la posible toxicidad de estos microorganismos en organismos superiores. No obstante, es crucial investigar los riesgos de transferencia genética por plásmidos hacia bacterias patógenas especialmente en ambientes hospitalarios, además del impacto ambiental que pueden tener estos microorganismos modificados.

Por su parte, Kang et al. (2021) transformaron una cepa de *Bacillus subtilis* con un plásmido modificado para producir andamios proteicos auto ensamblables para la reticulación celular y la biomineralización de sílice. Utilizaron técnicas como ensamblaje Gibson, mutagénesis dirigida, deleciones, inserciones y clonación con enzimas de restricción. Se insertaron genes *eutM* modificados para secretar SpyCatcher y péptidos de biomineralización (CotB), y se alteró el gen *hag* para que los flagelos expresen SpyTag, facilitando la formación de andamios mediante la interacción SpyCatcher-SpyTag. Además, se eliminó el gen *lytC* para evitar la producción de autolisina, estabilizando las células como componentes estructurales. Los microorganismos transformados generaron materiales de sílice más agregados y de mayor tamaño debido a la reticulación, mientras que la cepa no transformada mostró solo condensación

superficial de sílice. Un análisis reológico reveló que la cepa transformada era 1,37 veces más rígida que el control, gracias a un mayor número de enlaces intermoleculares.

Las investigaciones presentadas destacan la amplia gama de aplicaciones y ventajas que ofrecen los ELMs frente a los LBM, como la posibilidad de dotar a microorganismos con características específicas mediante ingeniería genética para cumplir funciones determinadas.

6. CONCLUSIONES

Los materiales de construcción vivos (LBM), basados en microorganismos y sus productos metabólicos, representan una alternativa ecológica prometedora al reducir el impacto ambiental. Consumen menos energía, aprovechan desechos orgánicos, capturan CO₂ y, en algunos casos, mejoran las propiedades del material mediante la precipitación de carbonato de calcio (CaCO₃).

Dentro de las bacterias más estudiadas en la autorreparación de concreto se encuentran bacterias del género *Bacillus* y otros capaces de formar estructuras de resistencia como las esporas, lo cual facilita su incorporación en matrices de hormigón. Además, para la precipitación de CaCO₃ en su mayoría se buscan microorganismos productores de ureasa debido a la simplicidad por la que esta actúa en el medio.

A pesar de que la aplicación de los hongos se ha enfocado en materiales como espumas aislantes, absorbentes acústicos, revestimientos y paneles debido a la formación de redes tridimensionales de hifas. Algunos investigadores plantean que los hongos filamentosos podrían ser mejores que las bacterias autorreparadoras de concreto, debido a una mayor producción de biomasa, influyendo positivamente en las propiedades mecánicas del material. Sin embargo, la escasez de estudios experimentales en este ámbito resalta la necesidad de abordar a detalle su eficacia bajo diferentes condiciones controladas, con el fin de obtener datos precisos y confiables.

Por su parte la implementación de consorcios microbianos presenta varias ventajas frente a los cultivos puros, como una mayor versatilidad, eficiencia y resistencia en entornos cambiantes. No obstante, persiste una falta de comprensión sobre las interacciones metabólicas sinérgicas que pueden surgir entre los microorganismos que los componen. En muchos casos, se han realizado pruebas combinando distintos

microorganismos de forma aleatoria, con resultados prometedores y otros menos efectivos. Por ello, es fundamental estudiar la dinámica poblacional y comprender las rutas metabólicas involucradas, ya que estos factores pueden influir significativamente en el desempeño del consorcio.

Además de lo anteriormente mencionado, dentro de los metabolitos de mayor interés producidos por microorganismos se encuentran los biopolímeros y específicamente los exopolisacáridos (EPS). Entre los EPS más destacables se encuentran el xantano, dextrano y gelano. Bajo esta perspectiva, estas macromoléculas actúan principalmente como estabilizadores en la industria de la construcción, ya que, tienen la capacidad de formar hidrogeles. Adicional a esto, los biopolímeros no solo contribuyen directamente con el material, sino también pueden actuar como material para la encapsulación de los microorganismos. En este contexto, el alginato mediante gelificación iónica ha sido uno de los más utilizados con este propósito, contribuyendo a mantener la viabilidad y funcionalidad de los microorganismos dentro del material.

Finalmente, la ingeniería genética ha permitido el diseño de materiales vivos diseñados (ELMs). Estos microorganismos adquieren características específicas como por ejemplo la aceleración de la precipitación de CaCO_3 a través de modificaciones genéticas mayoritariamente debido a la adquisición de plásmidos modificados e insertados a través de procesos de transformación. A partir de ello, es posible adaptar o modificar los microorganismos según las necesidades específicas, como incrementar la bioproducción, mejorar su resistencia u optimizar otras propiedades deseadas. Aun así, es importante destacar que solo un número limitado de investigadores ha abordado estudios de toxicidad. Por ello, resulta fundamental seguir profundizando en la posible influencia de estos microorganismos a largo plazo, tanto sobre los materiales como sobre los seres vivos en su entorno.

7. RECOMENDACIONES

A partir de la revisión bibliográfica, se proponen algunas recomendaciones clave para la implementación de microorganismos o sus productos en la industria de la construcción. En primer lugar, se debe realizar una bioprospección focalizada según la aplicación específica, seleccionando cepas con alta eficiencia en la precipitación de CaCO_3 y tolerancia a condiciones alcalinas para sistemas de autorreparación de concreto, o cepas con elevada producción de EPS cuando se busquen efectos estabilizantes. Posteriormente es fundamental optimizar las condiciones de cultivo microbiano dependiendo de si se busca obtener biomasa o metabolitos. En este contexto, se recomienda integrar subproductos industriales u orgánicos como sustratos de bajo costo para reducir el impacto ambiental del proceso. También es importante asegurar la mayor viabilidad posible de los microorganismos al evaluar la eficiencia de distintos materiales de encapsulación y su influencia en el material final.

Si se busca implementar ELMs es primordial estudiar las rutas metabólicas de los microorganismos a implementar. Además, es crucial evaluar la toxicidad e impacto ambiental de los microorganismos genéticamente modificados, con especial atención al riesgo de transferencia horizontal de genes.

8. REFERENCIAS

- Ahuja, V., Bhatt, A. K., Banu, J. R., Kumar, V., Kumar, G., Yang, Y. H., & Bhatia, S. K. (2023). Microbial Exopolysaccharide Composites in Biomedicine and Healthcare: Trends and Advances. In *Polymers* (Vol. 15, Issue 7). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/polym15071801>
- Akhtar, J. N., Khan, R. A., Khan, R. A., & Akhtar, M. N. (2025). Investigation of microstructural characterization, strength and durability of self-healing self-compacting conventional concrete. *Structures*, 71.
<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.108059>
- Al Omari, M. M. H., Rashid, I. S., Qinna, N. A., Jaber, A. M., & Badwan, A. A. (2016). Calcium Carbonate. In *Profiles of Drug Substances, Excipients and Related Methodology* (Vol. 41, pp. 31–132). Academic Press Inc.
<https://doi.org/10.1016/bs.podrm.2015.11.003>
- Ali, M., Cybulska, J., Fraç, M., & Zdunek, A. (2023). Application of polysaccharides for the encapsulation of beneficial microorganisms for agricultural purposes: A review. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 244). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125366>
- Alima, N. (2024). BioForms: 3-D printed mycelium wall panel systems. *Research Directions: Biotechnology Design*, 2, e18. <https://doi.org/10.1017/btd.2024.9>
- Al-Nabulsi, A. A., Jaradat, Z. W., Al Qudsi, F. R., Elsalem, L., Osaili, T. M., Olaimat, A. N., Esposito, G., Liu, S. Q., & Ayyash, M. M. (2022). Characterization and bioactive properties of exopolysaccharides produced by *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus bulgaricus* isolated from labaneh. *LWT*, 167.
<https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113817>

- Al-Qahtani, S., Koç, M., & Isaifan, R. J. (2025). Assessing the Effectiveness of Mycelium-Based Thermal Insulation in Reducing Domestic Cooling Footprint: A Simulation-Based Study. *Energies*, 18(4). <https://doi.org/10.3390/en18040980>
- Altamirano, E. (2021). *Microencapsulación de conidios de Metarhizium anisopliae mediante secado por aspersión y gelificación iónica*. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria.
- Amran, M., Onaizi, A. M., Fediuk, R., Vatin, N. I., Rashid, R. S. M., Abdelgader, H., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material: A Review. In *Materials* (Vol. 15, Issue 9). MDPI. <https://doi.org/10.3390/ma15093214>
- Bamidele, O. P., & Emmambux, M. N. (2021). Encapsulation of bioactive compounds by “extrusion” technologies: a review. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (Vol. 61, Issue 18, pp. 3100–3118). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1793724>
- Bandyopadhyay, A., Saha, A., Ghosh, D., Dam, B., Samanta, A. K., & Dutta, S. (2023). Microbial repairing of concrete & its role in CO₂ sequestration: a critical review. In *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences* (Vol. 12, Issue 1). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1186/s43088-023-00344-1>
- Barberán, A., Chávez, D., Cajas, A., Egas, M. C., Criollo, M., Pineda, J., País-Chanfrau, J. M., & Trujillo, L. E. (2020). A new area of application and research in bio-processes: Biotechnologies in civil construction. In *Bionatura* (Vol. 5, Issue 1, pp. 1072–1077). Centro de Biotecnología y Biomedicina, Clinical Biotec. Universidad Católica del Oriente (UCO), Univesidad Yachay Tech. <https://doi.org/10.21931/RB/2020.05.01.11>

- Bello, J., & Villacreses, C. (2021). *Ventajas y desventajas del sistema constructivo con bambú frente al sistema de hormigón armado en viviendas de interés social*. 6. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i9.3152>
- Benjamin, B., Zachariah, S., Sudhakumar, J., & Suchithra, T. V. (2023). Bacterial consortium development and optimization for crack controlling cement mortar. *Journal of Building Engineering*, 77, 107501. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107501>
- Brito, I. L. (2021). Examining horizontal gene transfer in microbial communities. In *Nature Reviews Microbiology* (Vol. 19, Issue 7, pp. 442–453). Nature Research. <https://doi.org/10.1038/s41579-021-00534-7>
- Buff, M., Cailleau, G., Kuhn, T., Richter, X. Y. L., Stanley, C. E., Wick, L. Y., Chain, P. S., Bindschedler, S., & Junier, P. (2023). Fungal drops: A novel approach for macro- and microscopic analyses of fungal mycelial growth. *MicroLife*, 4. <https://doi.org/10.1093/femsml/uqad042>
- Cardoso, R., Pedreira, R., Duarte, S. O. D., & Monteiro, G. A. (2020). About calcium carbonate precipitation on sand biocementation. *Engineering Geology*, 271. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105612>
- Carter, M. S., Tuttle, M. J., Mancini, J. A., Martineau, R., Hung, C. S., & Gupta, M. K. (2023). Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation by *Sporosarcina pasteurii*: a Case Study in Optimizing Biological CaCO₃ Precipitation. In *Applied and Environmental Microbiology* (Vol. 89, Issue 8). American Society for Microbiology. <https://doi.org/10.1128/aem.01794-22>
- Chang, I., & Cho, G. C. (2019). Shear strength behavior and parameters of microbial gellan gum-treated soils: from sand to clay. *Acta Geotechnica*, 14(2), 361–375. <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0641-x>

- Chatterjee, A., Alam, N., Chowdhury, T., & Chattopadhyay, B. (2024). Modified Bacteria Incorporated Geopolymer - A Qualitative Approach for an Eco-friendly, Energy-efficient and Self-healing Construction Material. *Journal of Civil Engineering and Construction*, 13(1), 44–57.
<https://doi.org/10.32732/jcec.2024.13.1.44>
- Cho, W. II, & Chung, M. S. (2020). Bacillus spores: a review of their properties and inactivation processing technologies. In *Food Science and Biotechnology* (Vol. 29, Issue 11, pp. 1447–1461). The Korean Society of Food Science and Technology.
<https://doi.org/10.1007/s10068-020-00809-4>
- Chuo, S. C., Mohamed, S. F., Setapar, S. H. M., Ahmad, A., Jawaid, M., Wani, W. A., Yaqoob, A. A., & Ibrahim, M. N. M. (2020). Insights into the current trends in the utilization of bacteria for microbially induced calcium carbonate precipitation. In *Materials* (Vol. 13, Issue 21, pp. 1–28). MDPI AG.
<https://doi.org/10.3390/ma13214993>
- Cortés-López, N. G., Ordóñez-Baquera, P. L., & Domínguez-Viveros, J. (2021). Molecular tools used for metagenomic analysis. Review. In *Revista Mexicana De Ciencias Pecuarias* (Vol. 11, Issue 4, pp. 1150–1173). INIFAP-CENID Parasitología Veterinaria. <https://doi.org/10.22319/RMCP.V11I4.5202>
- Emamalipour, M., Seidi, K., Zununi Vahed, S., Jahanban-Esfahlan, A., Jaymand, M., Majdi, H., Amoozgar, Z., Chitkushev, L. T., Javaheri, T., Jahanban-Esfahlan, R., & Zare, P. (2020). Horizontal Gene Transfer: From Evolutionary Flexibility to Disease Progression. In *Frontiers in Cell and Developmental Biology* (Vol. 8). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fcell.2020.00229>
- Fahimizadeh, M., Abeyratne, A. D., Mae, L. S., Raman Singh, R. K., & Pasbakhsh, P. (2020). Biological self-healing of cement paste and mortar by non-ureolytic

bacteria encapsulated in alginate hydrogel capsules. *Materials*, 13(17).

<https://doi.org/10.3390/MA13173711>

Feijóo-Vivas, K., Bermúdez-Puga, S. A., Hernán-Rebolledo, Figueroa, J. M., Zamora, P., & Naranjo-Briceño, L. (2021). Fungal mycelium-bioproducts development: A new material culture and its impact on the transition to a sustainable economy. In *Bionatura* (Vol. 6, Issue 1, pp. 1637–1652). Centro de Biotecnología y Biomedicina, Clinical Biotec. Universidad Católica del Oriente (UCO), Univesidad Yachay Tech. <https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.01.29>

Feng, J., Chen, B., Sun, W., & Wang, Y. (2021). Microbial induced calcium carbonate precipitation study using *Bacillus subtilis* with application to self-healing concrete preparation and characterization. *Construction and Building Materials*, 280, 122460. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122460>

Fernandez, C. A., Correa, M., Nguyen, M. T., Rod, K. A., Dai, G. L., Cosimbescu, L., Rousseau, R., & Glezakou, V. A. (2021). Progress and challenges in self-healing cementitious materials. In *Journal of Materials Science* (Vol. 56, Issue 1, pp. 201–230). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05164-7>

Gardner, D., Lark, R., Jefferson, T., & Davies, R. (2018). A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials. *Case Studies in Construction Materials*, 8, 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.02.002>

González, M., Alemán, M., Glenda, H., Ramirez, D., & Díaz, P. (2024). *Bacillus Una bacteria versátil multifuncional y ampliamente aplicada.*

Heveran, C. M., Liang, L., Nagarajan, A., Hubler, M. H., Gill, R., Cameron, J. C., Cook, S. M., & Srubar, W. V. (2019). Engineered Ureolytic Microorganisms Can Tailor the Morphology and Nanomechanical Properties of Microbial-Precipitated Calcium Carbonate. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51133-9>

Heveran, C. M., Williams, S. L., Qiu, J., Artier, J., Hubler, M. H., Cook, S. M., Cameron, J. C., & Srubar, W. V. (2020). Biomineralization and Successive Regeneration of Engineered Living Building Materials. *Matter*, 2(2), 481–494.

<https://doi.org/10.1016/j.matt.2019.11.016>

Hu, M., Zheng, G., Zhao, D., & Yu, W. (2020). Characterization of the structure and diffusion behavior of calcium alginate gel beads. *Journal of Applied Polymer Science*, 137(31). <https://doi.org/10.1002/app.48923>

Huamán-Castilla, N. L., Allcca-Alca, E. E., Allcca-Alca, G. J., & Quispe-Pérez, M. L. (2021). Biopolymers produced by *Azotobacter*: Synthesis and production, physicomechanical properties, and potential industrial applications. In *Scientia Agropecuaria* (Vol. 12, Issue 3, pp. 369–377). Universidad Nacional de Trujillo.

<https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2021.040>

Ibe, C., & Munro, C. A. (2021). Fungal cell wall proteins and signaling pathways form a cytoprotective network to combat stresses. In *Journal of Fungi* (Vol. 7, Issue 9).

MDPI. <https://doi.org/10.3390/jof7090739>

Iglesias, M., Mesa, L., Ortiz, E., Álvarez, C., Lugioyo, G., & Núñez, R. (2020).

Influencia del pH y la concentración de NaCl en el crecimiento y emisión de luz de dos cepas de Vibrio harveyi. <http://elfosscientiae.cigb.edu.cu/Biotecnologia.asp>

Iqbal, D. M., Wong, L. S., & Kong, S. Y. (2021). Bio-cementation in construction materials: A review. In *Materials* (Vol. 14, Issue 9). MDPI AG.

<https://doi.org/10.3390/ma14092175>

Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2020). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. *Materials & Design*, 187, 108397.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>

Kang, S. Y., Pokhrel, A., Bratsch, S., Benson, J. J., Seo, S. O., Quin, M. B., Aksan, A., & Schmidt-Dannert, C. (2021). Engineering *Bacillus subtilis* for the formation of a durable living biocomposite material. *Nature Communications*, 12(1).

<https://doi.org/10.1038/s41467-021-27467-2>

Kaushal, V., & Saeed, E. (2024). Sustainable and Innovative Self-Healing Concrete Technologies to Mitigate Environmental Impacts in Construction. *CivilEng*, 5(3), 549–558. <https://doi.org/10.3390/civileng5030029>

Kore, S. D., & Sudarsan, J. S. (2021). Hemp Concrete: A Sustainable Green Material for Conventional Concrete. *Journal of Building Material Science*, 3(2), 1–7.

<https://doi.org/10.30564/jbms.v3i2.3189>

Kuribayashi, T., Pauliina, L., Hietala, S., & Mikkonen, K. (2022). *Dense and continuous networks of aerial hyphae improve flexibility and shape retention of mycelium composite in the wet state.*

Lanza, F., Aguilar, J., & Reyes Zúniga, J. (2024). *Resistencia a la Compresión y Porcentaje de Absorción del Micelio de Ganoderma Lucidum.*

Laventie, B.-J., & Jenal, U. (2020). *Surface Sensing and Adaptation in Bacteria*. 46.

<https://doi.org/10.1146/annurev-micro-012120>

Loaeza, S. H., Gómez, B. H., Chávez, G. M., & López, C. H. Z. 1. (2023).

EVALUACIÓN DE DOS DIFERENTES ESTABILIZANTES A BASE DE BIOPOLÍMEROS EN PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE SUELO ARCILLOSO. 7, 1–18. <https://doi.org/10.19136/Jeeos.a7n1.5648>

Ma, L., Pang, A. P., Luo, Y., Lu, X., & Lin, F. (2020). Beneficial factors for biomineralization by ureolytic bacterium *Sporosarcina pasteurii*. *Microbial Cell Factories*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-020-1281-z>

- Macías, D., & Ortiz, E. (2022). *Estudio del carbonato de calcio como agente estabilizador de subrasante*. 7.
- Mahmoud, H. H. A., Kalaba, M. H. A., El-Sherbiny, G. M. E., Mostafa, A. E. A., Ouf, M. E. A., & Tawhed, W. M. F. (2021). *Sustainable Repairing and Improvement of Concrete Properties Using Bacterial Consortium Isolated From Egypt*.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-688731/v1>
- Manvith Kumar Reddy, C., Ramesh, B., Macrin, D., & Reddy, K. (2020a). Influence of bacteria *Bacillus subtilis* and its effects on flexural strength of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 33, 4206–4211. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.225>
- Manvith Kumar Reddy, C., Ramesh, B., Macrin, D., & Reddy, K. (2020b). Influence of bacteria *Bacillus subtilis* and its effects on flexural strength of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 33, 4206–4211. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.225>
- Manzanares, C. M. (2017). *CONSTRUCCIÓN VIVA SINERGIA ENTRE MATERIALES Y MICROORGANISMOS*.
- Martuscelli, C., Soares, C., Camões, A., & Lima, N. (2020). Potential of fungi for concrete repair. *Procedia Manufacturing*, 46, 180–185.
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.027>
- Michaelis, C., & Grohmann, E. (2023). Horizontal Gene Transfer of Antibiotic Resistance Genes in Biofilms. In *Antibiotics* (Vol. 12, Issue 2). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/antibiotics12020328>
- Molinari, S., Tesoriero, R. F., & Ajo-Franklin, C. M. (2021). Bottom-up approaches to engineered living materials: Challenges and future directions. In *Matter* (Vol. 4, Issue 10, pp. 3095–3120). Cell Press. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.08.001>
- Mondal, S., & Ghosh, A. (Dey). (2021). Spore-forming *Bacillus subtilis* vis-à-vis non-spore-forming *Deinococcus radiodurans*, a novel bacterium for self-healing of

concrete structures: A comparative study. *Construction and Building Materials*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121122>

Muguda, S., Lucas, G., Hughes, P. N., Augarde, C. E., Perlot, C., Bruno, A. W., & Gallipoli, D. (2020). Durability and hygroscopic behaviour of biopolymer stabilised earthen construction materials. *Construction and Building Materials*, 259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119725>

Muñoz-Pérez, S., Carlos-Sánchez, J., & Peralta-Sánchez, M. (2023). Influencia de las bacterias en la autocuración del concreto. *Revista UIS Ingenierías*, 22(1). <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n1-2023007>

Niu, Y. Q., Liu, J. H., Aymonier, C., Fermani, S., Kralj, D., Falini, G., & Zhou, C. H. (2022). Calcium carbonate: controlled synthesis, surface functionalization, and nanostructured materials. In *Chemical Society Reviews* (Vol. 51, Issue 18, pp. 7883–7943). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d1cs00519g>

Omoregie, A. I., Palombo, E. A., & Nissom, P. M. (2021). Bioprecipitation of calcium carbonate mediated by ureolysis: A review. In *Environmental Engineering Research* (Vol. 26, Issue 6). Korean Society of Environmental Engineers. <https://doi.org/10.4491/eer.2020.379>

Patel, J., Maji, B., Moorthy, N. S. H. N., & Maiti, S. (2020). Xanthan gum derivatives: Review of synthesis, properties and diverse applications. In *RSC Advances* (Vol. 10, Issue 45, pp. 27103–27136). Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/d0ra04366d>

Qiu, J., Cook, S., Srubar, W. V., Hubler, M. H., Artier, J., & Cameron, J. C. (2021). Engineering living building materials for enhanced bacterial viability and mechanical properties. *IScience*, 24(2). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102083>

- Rana, S., & Upadhyay, L. S. B. (2020). Microbial exopolysaccharides: Synthesis pathways, types and their commercial applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 157, 577–583.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.084>
- Rauf, M., Khaliq, W., Khushnood, R. A., & Ahmed, I. (2020). Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, 258.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119578>
- Ruiz-Herrera, J., & Ortiz-Castellanos, L. (2019). Cell wall glucans of fungi. A review. In *Cell Surface* (Vol. 5). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2019.100022>
- Rumbaugh, K. P., & Sauer, K. (2020). Biofilm dispersion. In *Nature Reviews Microbiology* (Vol. 18, Issue 10, pp. 571–586). Nature Research.
<https://doi.org/10.1038/s41579-020-0385-0>
- Salifu, E., Gutteridge, F., & Witte, K. (2021). *Recent Advances in Engineered Microbial Technologies for the Construction Industry*.
- Schilcher, K., & Horswill, A. R. (2020). *Staphylococcal Biofilm Development: Structure, Regulation, and Treatment Strategies*. <https://journals.asm.org/journal/membr>
- Sharma, T., Sharma, A., Xia, C. lei, Lam, S. S., Khan, A. A., Tripathi, S., Kumar, R., Gupta, V. K., & Nadda, A. K. (2022). Enzyme mediated transformation of CO₂ into calcium carbonate using purified microbial carbonic anhydrase. *Environmental Research*, 212, 113538.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113538>
- Soysal, A., Milla, J., King, G. M., Hassan, M., & Rupnow, T. (2020). Evaluating the Self-Healing Efficiency of Hydrogel-Encapsulated Bacteria in Concrete. *Transportation Research Record*, 2674(6), 113–123. <https://doi.org/10.1177/0361198120917973>

- Sri Durga, C. S., Ruben, N., Sri Rama Chand, M., Indira, M., & Venkatesh, C. (2021). Comprehensive microbiological studies on screening bacteria for self-healing concrete. *Materialia*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101051>
- Su, Y., & Jin, P. (2022). Application of encapsulated expanded vermiculites as carriers of microorganisms and nutrients in self-repairing concrete. *Biochemical Engineering Journal*, 187, 108672. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108672>
- Taha, M., Shata, S., Taher, H., & Abdulla, H. (2022). Factors Affecting Calcite Bio-precipitation via Urea Hydrolyzing Bacterial Consortium. *Advances in Environmental and Life Sciences*, 0(0), 0–0. <https://doi.org/10.21608/aels.2022.165065.1020>
- Tang, Y., & Xu, J. (2021). Application of microbial precipitation in self-healing concrete: A review on the protection strategies for bacteria. *Construction and Building Materials*, 306, 124950. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124950>
- Tao, C. C., Yang, Y., Li, F., Qiao, L., Wu, Y., Sun, X. D., Zhang, Y. Y., & Li, C. L. (2020). Cloning short DNA into plasmids by one-step PCR. *Thoracic Cancer*, 11(11), 3409–3415. <https://doi.org/10.1111/1759-7714.13660>
- Thangavel, S., Shanmugavadivel, S., Shanmugamoorthy, M., & Velusamy, S. (2024a). Pleurotus ostreatus mycelium biofilters: a sustainable approach for thermal insulation in buildings. *Revista Materia*, 29(3). <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0193>
- Thangavel, S., Shanmugavadivel, S., Shanmugamoorthy, M., & Velusamy, S. (2024b). Pleurotus ostreatus mycelium biofilters: a sustainable approach for thermal insulation in buildings. *Revista Materia*, 29(3). <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2024-0193>

- Tianwen, Z., & Chunxiang, Q. (2020). Self-Healing of Later-Age Cracks in Cement-Based Materials by Encapsulation-Based Bacteria. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(11), 04020341. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003437](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003437)
- Tong, J., Gao, H., Weng, Y., & Wang, Y. (2023). Anisotropic Aerogels with Excellent Mechanical Resilience and Thermal Insulation from *Pleurotus eryngii* Fungus. *Macromolecular Materials and Engineering*, 308(4). <https://doi.org/10.1002/mame.202200538>
- Vedrtnam, A., Palou, M. T., Varela, H., Gunwant, D., Kalauni, K., & Barluenga, G. (2025). Experimental and numerical study on post-fire self-healing concrete for enhanced durability. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94331-4>
- Villao, R., & Llangarí, B. (2024). DURABILITY OF MATERIALS USED IN GREEN CONSTRUCTION PROJECTS. *INGENIAR*, 7(14), 2024. <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0200>
- Vivas, K., Puga, S., Rebolledo, H., Figueroa, J., Zamora, P., & Briceño, L. (2021). Fungal mycelium-bioproducts development: A new material culture and its impact on the transition to a sustainable economy. In *Bionatura* (Vol. 6, Issue 1, pp. 1637–1652). Centro de Biotecnología y Biomedicina, Clinical Biotec. Universidad Católica del Oriente (UCO), Univesidad Yachay Tech. <https://doi.org/10.21931/RB/2021.06.01.29>
- Wang, W., Ju, Y., Liu, N., Shi, S., & Hao, L. (2023). Structural characteristics of microbial exopolysaccharides in association with their biological activities: a review. In *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* (Vol. 10, Issue 1). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00515-3>

- Wang, Y., Liu, Y., Li, J., Chen, Y., Liu, S., & Zhong, C. (2022). Engineered living materials (ELMs) design: From function allocation to dynamic behavior modulation. *Current Opinion in Chemical Biology*, *70*, 102188. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2022.102188>
- Wang, Y., Lu, J., Engelstädter, J., Zhang, S., Ding, P., Mao, L., Yuan, Z., Bond, P. L., & Guo, J. (2020). Non-antibiotic pharmaceuticals enhance the transmission of exogenous antibiotic resistance genes through bacterial transformation. *ISME Journal*, *14*(8), 2179–2196. <https://doi.org/10.1038/s41396-020-0679-2>
- Xia, Q. (2024). Utilizing mycelium-based materials for sustainable construction. *Applied and Computational Engineering*, *63*(1), 10–15. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/63/20240967>
- Xu, C., & Yu, H. (2021). Insights into constructing a stable and efficient microbial consortium. In *Chinese Journal of Chemical Engineering* (Vol. 30, pp. 112–120). Materials China. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.12.012>
- Zhang, J., Shi, X., Chen, X., Huo, X., & Yu, Z. (2021). Microbial-Induced Carbonate Precipitation: A Review on Influencing Factors and Applications. In *Advances in Civil Engineering* (Vol. 2021). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2021/9974027>
- Zhang, J., Xiao, Y., Wang, H., Zhang, H., Chen, W., & Lu, W. (2023). Lactic acid bacteria-derived exopolysaccharide: Formation, immunomodulatory ability, health effects, and structure-function relationship. In *Microbiological Research* (Vol. 274). Elsevier GmbH. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2023.127432>
- Zhang, X., Al-Dossary, A., Hussain, M., Setlow, P., & Li, J. (2020). Applications of bacillus subtilis spores in biotechnology and advanced materials. *Applied and Environmental Microbiology*, *86*(17). <https://doi.org/10.1128/AEM.01096-20>

Zhang, X., Wang, K., Hu, J., Zhang, Y., Dai, Y., & Xia, F. (2020). Role of a high calcium ion content in extending the properties of alginate dual-crosslinked hydrogels.

Journal of Materials Chemistry A, 8(47), 25390–25401.

<https://doi.org/10.1039/d0ta09315g>

Zhang, X., Wang, X., Fan, W., Liu, Y., Wang, Q., & Weng, L. (2022). Fabrication, Property and Application of Calcium Alginate Fiber: A Review. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 15). MDPI.

<https://doi.org/10.3390/polym14153227>

Zhao, W., Fernando, L. D., Kirui, A., Delige, F., & Wang, T. (2020). Solid-state NMR of plant and fungal cell walls: A critical review. In *Solid State Nuclear Magnetic*

Resonance (Vol. 107). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ssnmr.2020.101660>

Zheng, T., Su, Y., Zhang, X., Zhou, H., & Qian, C. (2020). Effect and Mechanism of Encapsulation-Based Spores on Self-Healing Concrete at Different Curing Ages.

ACS Applied Materials and Interfaces, 12(47), 52415–52432.

<https://doi.org/10.1021/acsami.0c16343>

9. TABLAS

TABLA 1 COMPUESTOS CLAVE Y CONDICIONES AMBIENTALES PARA LA BIOMINERALIZACIÓN MICROBIANA DE CARBONATO DE CALCIO

Mecanismo microbiano	Condición ambiental	Compuesto clave liberado	Tipo de microorganismo involucrado	Observaciones
Reducción de sulfato	Anóxica	Bicarbonato (HCO_3^-)	Bacterias sulfato-reductoras	Ocurre en ambientes anaeróbicos; subproducto de la reducción del sulfato.
Desaminación oxidativa de aminoácidos	Aeróbica	Amoniaco (NH_3) y CO_2	Bacterias heterótrofas (<i>Myxococcus xanthus</i> y pocas cepas bacterianas aeróbicas gram negativas)	El amonio eleva el pH, favoreciendo la formación de carbonato.
Reducción de nitratos (desnitrificación)	Anaeróbica o microaerofílicas	Carbonato (CO_3^{2-})	Bacterias desnitrificantes (cianobacterias)	Útil en condiciones sin oxígeno; también puede conducir a la producción de NO_2 , conocido como inhibidor de corrosión.
Desaminación de la úrea o ácido úrico	Aeróbica	Amoniaco (NH_3) y CO_2	Bacterias ureolíticas	Vía más estudiada; común en biocementación.

TABLA 1 COMPUESTOS CLAVE Y CONDICIONES AMBIENTALES PARA LA BIOMINERALIZACIÓN MICROBIANA DE CARBONATO DE CALCIO (CONTINUACIÓN)

Mecanismo microbiano	Condición ambiental	Compuesto clave liberado	Tipo de microorganismo involucrado	Observaciones
Transformación metabólica de sales de calcio	Aeróbica	Carbonato (CO_3^{2-})	Bacterias aerobias facultativas (Géneros <i>Bacillus</i> , <i>Arthrobacter</i> , y <i>Rhodococcus</i>)	La oxidación de fuentes orgánicas genera carbonato que precipita con Ca^{2+} .
Fotosíntesis oxigénica	Aeróbica, luz, CO_2 y H_2O	Bicarbonato (HCO_3^-)	Cianobacterias, algas	Aumenta pH por consumo de CO_2 . Funciona solo en superficies expuestas.
Fotosíntesis anoxigénica	Anaeróbica, luz, CO_2 y H_2S	Bicarbonato (HCO_3^-)	Bacterias púrpuras	Usa H_2S como donador de electrones. Aumenta pH, pero puede liberar algo de H_2S .
Metanogénesis no metilotrófica	Anaeróbica	Metano (CH_4) y bicarbonato (HCO_3^-)	Metanógenos (<i>Methanobrevibacter abortiphilus</i> , <i>Methanosarcina barkeri</i> , <i>Methanothermobacter thermautotrophicus</i> , y <i>Methanothermobacter marburgensis</i>)	Ocurre mayormente en ecosistemas acuáticos. Puede producir metano utilizando CO_2 y H_2 como fuentes de carbono y energía, respectivamente.

HCO_3^- = ion bicarbonato, CO_3^{2-} = ion carbonato, NH_3 = amoníaco, CO_2 = dióxido de carbono, CH_4 = metano, H_2O = agua, H_2 = hidrógeno, H_2S = sulfuro de hidrógeno.