

Celulosa bacteriana: el biopolímero de la naturaleza

Bacterial Cellulose: Nature's Biopolymer

Milena Alvarado-Rojas¹, Josué Castro-Brenes², Fabián Orias-Obando³

Fecha de recepción: 15 de noviembre, 2023

Fecha de aprobación: 21 de marzo, 2024


Alvarado-Rojas, M; Castro-Brenes, J; Orias-Obando, F. Celulosa bacteriana: el biopolímero de la naturaleza. *Tecnología en Marcha*. Vol. 37, N° 4. Octubre-Diciembre, 2024. Pág. 162-170.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v37i4.6945>

1 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 ciris70@yahoo.es

2 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 joscobrenes@gmail.com

3 Estudiantes de Ingeniería en Biotecnología, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 obandooriasfabian89@estudiantec.cr



Palabras clave

Biopolímeros; Bacterias; Bioandamios; Matriz Celular; Biocompatibilidad; Biodegradabilidad.

Resumen

La celulosa bacteriana (CB) es un biopolímero de relevancia en investigación e industria, producido por bacterias, como *Acetobacter* y *Komagataeibacter*. La CB comparte composición molecular similar a la celulosa vegetal (C₆H₁₀O₅), compuesta por dos subunidades (I y II) y un grado de polimerización de 2000 a 6000 unidades, basado en enlaces glucosídicos β-1,4 que forman una estructura tridimensional reticular y cristalina. Es un compuesto naturalmente biocompatible, no tóxico y versátil, con propiedades de biodegradabilidad y sostenibilidad debido a sus componentes de polisacáridos y grupos proteicos. Además, debido a su maleabilidad permiten interacciones beneficiosas con tejidos en recuperación y posee una mayor retención de agua a través de su estructura porosa. La CB se aplica en diversas industrias, incluyendo salud (sustitutos de piel, tejidos periodontales, procedimientos quirúrgicos), alimentos (aditivos, emulsionantes, fibras dietéticas, matrices poliméricas para empaques), textil (bolsos, carteras, collares, zapatos) y electrónica (diafragmas acústicos de alta fidelidad, conductividad eléctrica y dispositivos de luz). La CB presenta un gran potencial para su mayor uso a futuro, considerando los medios para su producción a gran escala, tales como el método estático, empleado a nivel de laboratorio, y el método agitado con una mayor transferencia de oxígeno.

Keywords

Biopolymers; Bacteria; Bio-scaffolds; Cell Matrix; Biocompatibility; Biodegradability.

Abstract

Bacterial cellulose (BC) is a biopolymer of relevance in research and industry, produced by bacteria such as *Acetobacter* and *Komagataeibacter*. BC shares a molecular composition similar to plant cellulose (C₆H₁₀O₅), composed of two subunits (I and II) and a degree of polymerization ranging from 2000 to 6000 units, based on β-1,4 glucosidic bonds that form a reticular and crystalline three-dimensional structure. It is a naturally biocompatible, non-toxic, and versatile compound, with biodegradable and sustainable properties due to its polysaccharide and protein group components. Furthermore, its malleability allows beneficial interactions with tissues in recovery, and it possesses enhanced water retention through its porous structure.

BC finds application in various industries, including healthcare (skin substitutes, periodontal tissues, surgical procedures), food (additives, emulsifiers, dietary fibers, polymeric matrices for packaging), textiles (bags, wallets, necklaces, shoes), and electronics (high-fidelity acoustic diaphragms, electrical conductivity, and light devices). BC holds great potential for increased future use, considering methods for large-scale production, such as the static method used at the laboratory level and the agitated method with increased oxygen transfer.

Definición de la celulosa bacteriana

La celulosa bacteriana (CB) es un biopolímero de gran interés en la investigación y la industria. Se trata de un compuesto producido por bacterias como las del género *Acetobacter* y *Komagataeibacter*, a través de un proceso de biosíntesis. A diferencia de la celulosa de origen

vegetal, la CB se distingue por su estructura altamente pura y homogénea. Destacándose por su biocompatibilidad, lo que la hace especialmente atractiva para diversas aplicaciones biotecnológicas y biomédicas [1].

La síntesis de celulosa ocurre en el interior de las células bacterianas, donde las enzimas responsables de su producción ensamblan las cadenas de glucosa. Posteriormente, este biopolímero se extruye y forma una matriz tridimensional. La capacidad única de formar una matriz tridimensional durante su extrusión confiere a la CB una versatilidad excepcional, lo que la convierte en un recurso valioso para la fabricación de materiales avanzados y productos biocompatibles. Su estructura y propiedades físicas pueden ser adaptadas de manera precisa para satisfacer las demandas de aplicaciones específicas [2].

Por lo anterior, el objetivo de esta revisión es recapitular de manera general las principales características de la CB.. Se abordan aspectos relacionados con su síntesis de celulosa, su estructura única y sus propiedades físicas y químicas, junto con un análisis de sus aplicaciones en industrias como la de salud, alimentos, textil y electrónica. Además, se destaca la importancia de la CB como alternativa sostenible y biodegradable en un contexto global de creciente conciencia ambiental. El enfoque hacia la mejora de los procesos de producción a gran escala se presenta como un paso crucial para aprovechar plenamente el potencial de este biomaterial versátil y prometedor en la innovación industrial

Importancia industrial de la celulosa

Un polisacárido esencialmente omnipresente en la naturaleza, ocupa un lugar preeminente en una amplia variedad de industrias, gracias a sus propiedades físicas y químicas únicas. Su capacidad la distingue como un recurso versátil y valioso [3].

Una de las principales aplicaciones industriales de la celulosa se encuentra en la producción de materiales celulósicos, los cuales son utilizados en la fabricación de productos de consumo cotidiano. La celulosa, a través de procesos de extracción y purificación, se convierte en una materia prima esencial en la elaboración de productos como papel, cartón, tejidos y textiles. Estos materiales desempeñan un papel central en la sociedad moderna, siendo fundamentales en la comunicación escrita, embalaje, confección de prendas de vestir y otros muchos productos [4].

En el contexto contemporáneo caracterizado por una creciente conciencia ambiental, la celulosa ha adquirido un estatus destacado como materia prima sostenible. Su prominencia radica en su capacidad inherente de biodegradación y su condición de recurso renovable, lo que la posiciona como una alternativa altamente respetuosa con el medio ambiente en la producción de una amplia gama de productos [5].

La celulosa, al ser susceptible de degradarse en componentes naturales y volver a entrar en los ciclos biogeoquímicos, ofrece una solución esencial para abordar los desafíos ambientales actuales. Su contribución a la sostenibilidad se manifiesta en la reducción significativa de la acumulación de residuos sólidos y la disminución de la dependencia de recursos no renovables en la fabricación de productos cotidianos [6].

Este enfoque hacia la celulosa como recurso sostenible se alinea con la creciente necesidad global de mitigar la huella de carbono y fomentar prácticas económicas más respetuosas con el medio ambiente. En un momento en que la sociedad y las industrias buscan activamente reducir su impacto ambiental, la forma en que la celulosa se sintetiza y se estructura internamente se revela como un factor esencial de la celulosa, representando un avance crucial en la dirección de una economía más sostenible y equitativa [7].

Producción de Celulosa Bacteriana

La producción de CB se posiciona como un campo de estudio de creciente relevancia. Comprender en profundidad este proceso implica una exploración minuciosa de sus elementos esenciales, desde los microorganismos involucrados hasta los factores ambientales que modelan su producción, junto con las técnicas de cultivo que rigen su obtención [5].

En el epicentro del proceso se encuentran los microorganismos, cuya singularidad bioquímica y capacidad intrínseca para la biosíntesis de celulosa han capturado la atención de investigadores. Entre las cepas de especial relevancia se destacan *Acetobacter xylinum* y *Komagataeibacter xylinus*, organismos que exhiben una extraordinaria aptitud para la excreción de celulosa extracelular durante su ciclo vital. Este fenómeno biológico, relacionado con la excreción meticulosa de celulosa extracelular por parte de los microorganismos, es la base de la producción eficiente de celulosa [8]. La producción de CB está estrechamente vinculada a factores ambientales cuya gestión precisa es crucial para obtener los resultados deseados.

La temperatura de cultivo, generalmente mantenida en un rango termodinámico de 25-30°C, es importante en el desarrollo de la producción celulósica. Sin embargo, esta cifra puede ser objeto de ajustes específicos en función de la cepa bacteriana empleada y las variables de producción. De manera análoga, el pH del medio de cultivo desempeña un papel de relevancia, con un rango óptimo de actividad enzimática que oscila entre 5.5 y 7.0, aunque nuevamente, este parámetro puede ser sometido a ajustes particulares según la especie bacteriana y el sustrato utilizado. La disponibilidad de nutrientes, comprendiendo fuentes de carbono, nitrógeno y oligoelementos, influencia en el crecimiento bacteriano y, por consiguiente, en la producción de celulosa. La gestión de estos componentes es indispensable para sustentar un crecimiento bacteriano saludable y el desarrollo de una celulosa de elevada calidad [9].

La fase de inoculación, implica la introducción de la cepa bacteriana en un medio de cultivo estéril, durante un período de tiempo definido. La agitación y oxigenación, aseguran la homogeneidad en la distribución de nutrientes y oxígeno en el cultivo. Finalmente, una vez que se alcanza la cantidad deseada de celulosa, se procede a su recolección, lavado y procesamiento subsiguiente, preparándose para su uso. [3].

Estructura de la Celulosa Bacteriana

La CB presenta una composición molecular análoga a la celulosa vegetal ($C_6H_{10}O_5$). Está compuesta por dos subunidades, I y II, y exhibe un grado de polimerización que varía entre 2000 y 6000 unidades. Su estructura se fundamenta en enlaces glucosídicos β -1,4 que forman una tridimensionalidad reticular. Su diámetro se sitúa en un rango de 10 a 50 nm y longitud de 100 a 1000 nm, lo que confiere una naturaleza fibrosa. Destaca por su rica presencia de puentes de hidrógeno, estableciendo una fuerte cohesión molecular. Las fibras pueden traslaparse a través de fuerzas de van der Waals, generando estructuras cristalinas organizadas [10].

Posee una elevada concentración de fases I α , lo cual corresponde a un ordenamiento estructural triclinico. En este patrón, las cadenas de celulosa se organizan helicoidalmente entre planos paralelos, facilitando interacciones intermoleculares mediante fuerzas de Van der Waals. Esta disposición contribuye de manera significativa a un alto grado de cristalinidad, que oscila entre un 50% y un 95%. Este grado de cristalinidad es una característica distintiva que la diferencia de otras formas menos cristalinas, como la celulosa vegetal [11,12].

Celulosa bacteriana vrs. vegetal

Comparada con la celulosa de origen vegetal, la CB exhibe una mayor pureza. La celulosa vegetal presenta una composición que abarca no sólo celulosa, sino también hemicelulosa, lignina y pectina, componentes que resultan difíciles de separar. A pesar de que inicialmente la CB no es completamente pura debido a la presencia de células bacterianas, nutrientes y metabolitos. En el proceso de purificación de pellets de CB, se inicia tratándolos con soluciones alcalinas a 100 grados Celsius durante 15-20 minutos para eliminar eficazmente las células bacterianas. Luego, se aíslan los pellets de la solución alcalina mediante técnicas de separación físicas o químicas. Finalmente, los pellets purificados se lavan con agua destilada para recuperar un pH neutro, eliminando residuos alcalinos y restaurando el equilibrio de la CB [13].

La significativa rigidez de la CB encuentra su explicación en la relevancia crítica de los puentes de hidrógeno presentes en su estructura. Esta rigidez sobrepasa a la de la celulosa vegetal debido al grosor nanoscópico de sus fibras, lo que se traduce en una mayor concentración de grupos hidroxilo y una superficie interna altamente desarrollada. La configuración molecular y su estructura en escalas nanométricas permiten la precisa alineación de las fibrillas dentro de la estructura, generando una estructura entrelazada y compacta a través de una red de puentes de hidrógeno y diámetros más extensos. Esta organización molecular altamente ordenada contribuye significativamente a la alta resistencia que caracteriza a este tipo de compuesto en comparación con otros tipos de celulosa [14].

Adicionalmente, se observa una mayor resistencia a la tracción, mayor flexibilidad y mejor resistencia a la solubilidad en la mayoría de los disolventes. Aunque es cien veces más delgada que las fibras de celulosa vegetal, mantiene una notable retención estructural, lo que le confiere versatilidad para adquirir diversas formas tridimensionales durante el proceso de fermentación [15].

Propiedades

Al ser un compuesto orgánico natural, la CB manifiesta un alto grado de biocompatibilidad, atribuido a su similitud química con la celulosa vegetal. Su biocompatibilidad ha sido validada, resaltando su no toxicidad y versatilidad. Su maleabilidad y estructura porosa permiten una interacción beneficiosa con células, facilitando la adhesión y proliferación celular, así como su integración efectiva con los tejidos huéspedes. Además, posee la capacidad de absorber exudados de tejidos cicatrizantes y ayuda a la granulación acelerada o formación de tejido conectivo nuevo [16,17].

Igualmente, se la clasifica como una molécula biodegradable y sostenible debido a su composición de polisacáridos y grupos proteicos, junto con enlaces glucosídicos, y manteniendo una alta pureza libre de compuestos interferentes. La CB es propensa a la descomposición sencilla por parte de microorganismos como bacterias y hongos a través de procesos enzimáticos, lo que resulta en la obtención de componentes de menor peso molecular que pueden ser utilizados en procesos biológicos y que no son contaminantes ambientales [18,19].

La capacidad de retención de agua es una característica distintiva y esencial que se debe a la naturaleza porosa de su estructura, donde los poros actúan como atractores de agua. Los enlaces de hidrógeno presentes en las fibrillas de celulosa atraen y mantienen el agua internamente, permitiendo una retención en su red tridimensional. Además, la CB exhibe una alta tensión superficial y un carácter hidrofílico, lo que significa que tiene afinidad por el agua,

facilitando aún más su capacidad para retenerla. En consecuencia, la cantidad de agua que puede retener por unidad de peso seco es considerable, llegando a ser hasta 100 o incluso 200 veces su propio peso seco en condiciones óptimas [20].

Aplicaciones de la celulosa bacteriana

La celulosa bacteriana ha tenido múltiples usos industriales a día de hoy [19], por ejemplo, en la salud, alimentos, industria textil, electrónica y de tecnología.

La industria de la salud ha sido una de las más beneficiadas por la producción de la CB [3], debido a que las películas de este material poseen una alta fuerza mecánica cuando están hidratadas, su alta permeabilidad a líquidos y gases, además de la poca irritación que esta provoca en su contacto, [21] motivan a su uso, como por ejemplo, en los sustitutos de piel en caso de quemaduras de segundo o tercer grado como los realizados por Biofill® [22] y Gengiflex® que utilizan la CB para tejidos periodontales en recuperación [23]. La CB se utiliza además como biomaterial para aplicaciones en microcirugías como BASYC®, que la utiliza para arterias y venas [24], o Cellumed® que la utiliza para la terapia de úlceras en caballos [25].

Por las capacidades antimicrobianas de la CB esta se ha utilizado con objetivos biomédicos [26], por ejemplo, en la elaboración de matrices con aplicaciones en periodoncia, ofreciendo resultados positivos en las pruebas de inhibición microbiana, o en la creación de hidrogeles, donde se demostró que si la CB es enriquecida con hidróxido de calcio y digluconato de clorhexidina, se observa poca actividad microbiana, lo que permitiría utilizar este biopolímero para procedimientos de regeneración de tejidos, como es en el caso de la exclusión de tejido blando en defectos óseos. [27].

En la industria de los alimentos también ha sido sumamente importante la CB [28], al usarse por ejemplo, como aditivo de alimentos, emulsificante o como fibra dietética debido a su textura y contenido de fibra, como es el caso de Cellulon, un agente de carga usado como reductor de calorías [29], o en bebidas dietéticas como aditivo, como en la Kombucha, o como refuerzo de matrices poliméricas para los empaques de alimentos, debido a sus propiedades mecánicas, alta relación superficie/volumen, su biodegradabilidad y la pureza que posee este compuesto en comparación con la celulosa vegetal, que al ser purificada resulta no alergénica y biocompatible [30].

Por otro lado, se han desarrollado múltiples prototipos de uso textil con base en la CB [31] como bolsos, carteras, collares o zapatos, que además de poseer una alta resistencia y variedad, poseen características sumamente importantes en los tiempos actuales, como su biodegradabilidad, siendo la CB un biomaterial, que promete ser una excelente alternativa a los tradicionales que provocan una alta contaminación [32] mientras que los productos en base a este material pueden desecharse con una baja probabilidad de provocar contaminación o pueden ser usados como compost [33].

En la industria de la electrónica y tecnología, la CB ha demostrado poseer una alta capacidad sónica, similar a las películas de aluminio o titanio, lo que ha permitido crear diafragmas de alta fidelidad acústica en microfones y audífonos, como los creados por Sony Corp. [3] Además, ha sido utilizada en transductores acústicos, esto debido a que al ser sometida a un tratamiento químico adquiere una alta resistencia mecánica. [34] Asimismo, también se han desarrollado membranas con alta conductividad eléctrica y dispositivos emisores de luz, ambos, por medio de la incorporación de metales en la estructura de este material.[35]

Por todas estas aplicaciones, es importante mencionar el potencial de la CB, esto considerando los medios de producción a gran escala de este material, actualmente la CB se produce por dos métodos: el estático, empleado a nivel de laboratorio, y el método agitado, que produce una mayor transferencia de oxígeno, favoreciendo la producción de celulosa, sin embargo, genera el problema de inducir a la célula una pérdida en su capacidad de producir celulosa, es por esta razón que en los últimos años se han desarrollado distintas estrategias para una mayor producción de celulosa sin ver afectada esta capacidad, por ejemplo, un estudio en Colombia inoculó un cultivo de bacterias *Acetobacter* con agua, demostrando al final, que se produce mayor cantidad de celulosa que con los métodos tradicionales [36]. Asimismo, se puede mencionar un estudio realizado en Chile, donde por medio de la utilización de microalgas y luminosidad constante, se logró optimizar la producción de CB casi el doble que en los métodos tradicionales, esto debido a que las microalgas son una excelente fuente de oxígeno, además de que son fáciles de manejar y son económicamente rentables [37] Por otro lado, un estudio realizado en Bogotá, demostró, que el valor de producción de CB es mucho más económico que el de otros materiales que son utilizados en las industrias, tales como: el PVC, PC, PS o PE [38].

Conclusión

La CB se destaca como un compuesto altamente eficiente y prometedor en los ámbitos de investigación e industria, gracias a su combinación única de propiedades físicas, químicas y estructurales. Su relevancia adquiere particular importancia en aplicaciones médicas, donde su marcada biocompatibilidad sugiere usos desde procedimientos quirúrgicos hasta la regeneración de tejidos. La versatilidad de este material y su potencial impacto en la medicina anticipan un futuro donde la CB jugará un papel crucial en innovaciones médicas y tecnológicas.

Industrialmente, la CB presenta innovaciones prometedoras para sectores clave como textiles y alimentos. Su biodegradabilidad, resistencia y funcionalidad la convierten en una base sólida para la creación de biopolímeros novedosos, con potencial para fabricar productos industriales de alto valor como implementos de vestir y films alimenticios. Además, su incorporación en la industria electrónica puede facilitar la producción de dispositivos de alta calidad y rendimiento al integrarse con metales y otros materiales conductores.

En el futuro, es importante optimizar los procesos de producción a escala industrial e identificar metodologías eficientes como el método estático o agitado para reducir los costos de fabricación. Esto provocaría una mayor demanda e implementación de la celulosa bacteriana y sus derivados en diversas áreas y aplicaciones industriales. Con un enfoque en la mejora continua y la eficiencia en la producción, la CB se posiciona como un recurso fundamental en la próxima etapa de la innovación industrial, brindando soluciones sostenibles, innovadoras y de alto rendimiento.

Referencias

- [1] E. Alata Mayhuire, Y. Cuadros Huamaní, L. Miranda Zanardi y E. Medina de Miranda, "Biopelículas producidas con cáscara de naranja y reforzadas con celulosa bacteriana," *Revista de la Sociedad Química del Perú*, vol. 85, no. 2, feb., pp. 231-241, 2019.
- [2] C. Buruaga Ramiro, "Funcionalización enzimática de la celulosa bacteriana para su aprovechamiento y valorización," Tesis doctoral, Universitat de Barcelona, Ciudad de Barcelona, Barcelona, 2021.
- [3] J. L. C. Pacheco, S. K. M. Yee, M. L. C. Zentella y J. E. E. Marvan, "Celulosa bacteriana en *Gluconacetobacter xylinum*: biosíntesis y aplicaciones," *Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, vol. 7, (1), mar., pp. 18-25, 2004.

- [4] A. Requejoa y N. Santosb, "La Biorrefinería: caminando hacia un desarrollo sostenible," *Pasaje a la ciencia*, vol. 8, (22), jun., pp. 8-16, 2021.
- [5] S. González Arranz, "Diseño de un nuevo material sostenible a partir de celulosa bacteriana de residuos orgánicos de producción local en un marco de economía circular," Tesis de Bachillerato, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad de Madrid, Madrid, 2021.
- [6] A. C. Valdez Manzaba, "Influencia de los microorganismos eficientes en el aprovechamiento ecológico de residuos orgánicos", Bachelor 's thesis, Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Santa Elena, 2023.
- [7] P. Ruiz Masegosa, "Tejidos con protección solar y baja coloración a partir de extractos de residuos orgánicos," Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València, Ciudad de Valencia, Valencia, 2023.
- [8] J. A. Toscano Avila, "Estimación de vida útil de mora de castilla (*Rubus glaucus Benth*) a partir del recubrimiento de celulosa bacteriana producida por *Komagataeibacter xylinus*," Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Tungurahua, 2019.
- [9] G. O. Jean, "Aplicación de microalgas para la remoción de nutrientes en efluentes agrícolas: Revisión de literatura," Tesis de Bachillerato, Universidad Zamorano, San Antonio de Oriente, Francisco Morazán, 2020.
- [10] D. Lahiri *et al.*, "Bacterial Cellulose: Production, Characterization, and Application as Antimicrobial Agent", *IJMS*, vol. 22, (23), nov., p. 12984, 2021.
- [11] G. Gayathri y G. Srinikethan, "Bacterial Cellulose production by *K. saccharivorans* BC1 strain using crude distillery effluent as cheap and cost effective nutrient medium", *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 138, (1), oct., pp. 950-957, 2019.
- [12] E. K. Gladysheva, E. A. Skiba, V. N. Zolotukhin, y G. V. Sakovich, "Study of the Conditions for the Biosynthesis of Bacterial Cellulose by the Producer *Medusomyces gisevii* Sa-12", *Appl Biochem Microbiol*, vol. 54, (2), mar., pp. 179-187, 2018.
- [13] C. Zhong, "Industrial-Scale Production and Applications of Bacterial Cellulose", *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 8, (1), dic., p. 605374, 2020.
- [14] Z. N. Skvortsova, T. I. Gromovoykh, V. S. Grachev, y V. Yu. Traskin, "Physicochemical Mechanics of Bacterial Cellulose", *Colloid J*, vol. 81, (4), jul., pp. 366-376, 2019
- [15] B. V. Mohite y S. V. Patil, "A novel biomaterial: bacterial cellulose and its new era applications: BC and Its New Era Applications", *Biotechnology and Applied Biochemistry*, vol. 61, (2), mar., pp. 101-110, 2014.
- [16] R. Portela, C. R. Leal, P. L. Almeida, y R. G. Sobral, "Bacterial cellulose: a versatile biopolymer for wound dressing applications", *Microbial Biotechnology*, vol. 12, (4), jul. pp. 586-610, 2019.
- [17] S. Torgbo y P. Sukyai, "Bacterial cellulose-based scaffold materials for bone tissue engineering", *Applied Materials Today*, vol. 11, (1), jun., pp. 34-49, 2018.
- [18] T. Garrison, A. Murawski, y R. Quirino, "Bio-Based Polymers with Potential for Biodegradability", *Polymers*, vol. 8, (7), jul., p. 262, 2016.
- [19] I. Kamaruddin, A. Dirpan, y F. Bastian, "The novel trend of bacterial cellulose as biodegradable and oxygen scavenging films for food packaging application : An integrative review", *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 807, (2), jul., p. 022066, 2021.
- [20] M. Ul-Islam, T. Khan, y J. K. Park, "Water holding and release properties of bacterial cellulose obtained by in situ and ex situ modification", *Carbohydrate Polymers*, vol. 88, (2), abr., pp. 596-603, 2012.
- [21] C. J. Grande Cruz, "Desarrollo De Nanocompuestos De Celulosa Bacteriana Para Aplicaciones Biomédicas.", Tesis de Bachillerato, Universitat de València, Ciudad de Valencia, Valencia, 2014.
- [22] W. K. Czaja *et al.*, "The Future Prospects of Microbial Cellulose in Biomedical Applications," *Biomacromolecules*, vol. 8, (1), Dec., pp. 1-12, 2007
- [23] H. G. de Oliveira Barud *et al.*, "Bacterial nanocellulose in dentistry: perspectives and challenges," *Molecules*, vol. 26, (1), dec., pp. 49, 2021.
- [24] D. Klemm *et al.*, "Bacterial synthesized cellulose—artificial blood vessels for microsurgery," *Progress in Polymer Science*, vol. 26, (9), mar., pp. 1561-1603, 2001.
- [25] H. P. Schmauder *et al.*, "Bakterienzellulose-ein inter-essantes biomaterial," *Bioforum*, vol. 23, (7/8), jan., pp. 484-486, 2000.
- [26] C. A. R. Giraldo, "La celulosa bacteriana: un mundo de nanoposibilidades," *Universitas Científica*, vol. 16, Jan., pp. 6-9, 2013.

- [27] K. L. T. Carrillo *et al*, "Elaboración de matrices de celulosa con propiedades antimicrobianas para su aplicación en periodoncia," *Revista Mexicana De Periodontología*, vol. 12, (1-3), oct., pp. 7-11, 2021.
- [28] L. D. C. Pineda, L. A. C. Mesa and C. A. M. Riascos, "Técnicas de fermentación y aplicaciones de la celulosa bacteriana: una revisión," *Ingeniería Y Ciencia*, vol. 8, (16), Jul., pp. 307-335, 2012.
- [29] D. N. Thompson and M. A. Hamilton, "Production of bacterial cellulose from alternate feedstocks," *Applied Biochemistry and Biotechnology*, vol. 91, (1-9), Mar., pp. 503-513, 2001.
- [30] A. Labeaga Viteri, "Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones," Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Educación a Distancia (España), Ciudad de Madrid, Madrid, 2018.
- [31] A. G. B. Flores, "Moda y biotecnología: creación de nuevos biotextiles para una industria textil sostenible," *Rd-Icuap*, vol. 7, (21), sep., pp. 185-199, 2021.
- [32] Y. Y. Jiménez-Sánchez, "APLICACIÓN DE LA CELULOSA BACTERIANA EN EL DISEÑO DE PRODUCTOS: UN CAMINO A LA SUSTENTABILIDAD," *Diseño Arte Y Arquitectura*, vol 1, (11), dec., pp. 41-57, 2021.
- [33] L. N. Gómez Rodríguez, "Análisis de celulosa bacteriana, como propuesta de fibra textil para el desarrollo de una chaqueta masculina en pacientes con hiperhidrosis, en la ciudad de Bucaramanga en el primer periodo del 2021," Tesis de Bachillerato, Universidades Tecnológicas de Santander, Bucaramanga, Santander, 2021.
- [34] L. D. Carreño Pineda, "Efecto De Las Condiciones De Cultivo Y Purificación Sobre Las Propiedades Físicoquímicas Y De Transporte En Membranas De Celulosa Bacteriana," Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Colombia, Ciudad de Bogotá, Bogotá, 2011.
- [35] C. Legnani *et al*, "Bacterial cellulose membrane as flexible substrate for organic light emitting devices," *Thin Solid Films*, vol. 517, (3), dec., pp. 1016-1020, 2008.
- [36] L. A. Caicedo, F. P. Da França and L. Lopez, "Factores para el escalado del proceso de producción de celulosa por fermentación estática," *Revista Colombiana De Química*, vol. 30, (2), dec., pp. 155-162, 2001.
- [37] D. E. Sandoval Vargas, "Evaluación del rendimiento de producción de celulosa bacteriana usando microalgas como fuente sustentable de oxígeno," Tesis de Bachillerato, Universidad de Chile, Region Metropolitana de Santiago, Santiago, 2017.
- [38] S. A. Gordillo Medina and M. P. Rodríguez Godoy, "Evaluación técnica y análisis de costos para el proceso de producción de biofilm aprovechando residuos de papel de oficina generados por la Empresa International House Bogotá," Tesis de Bachillerato, Universidad de América, La Candelaria, Bogotá, 2022.

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.