

## Celulosa bacteriana: más pura y fuerte que la celulosa de las plantas

*Abuela: ¿Qué es eso que parece un calamar gigante flotando en el vinagre que estás haciendo?*



*Diseñado por Freepik*

**Cristina Campano<sup>1</sup> y M. Auxiliadora Prieto<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Grupo de biotecnología de polímeros, Centro de Investigaciones Biológicas Margarita Salas, Consejo Superior de investigaciones científicas (CIB), CSIC, Calle Ramiro de Maeztu, 9, 28040 Madrid, España

## Celulosa producida por bacterias

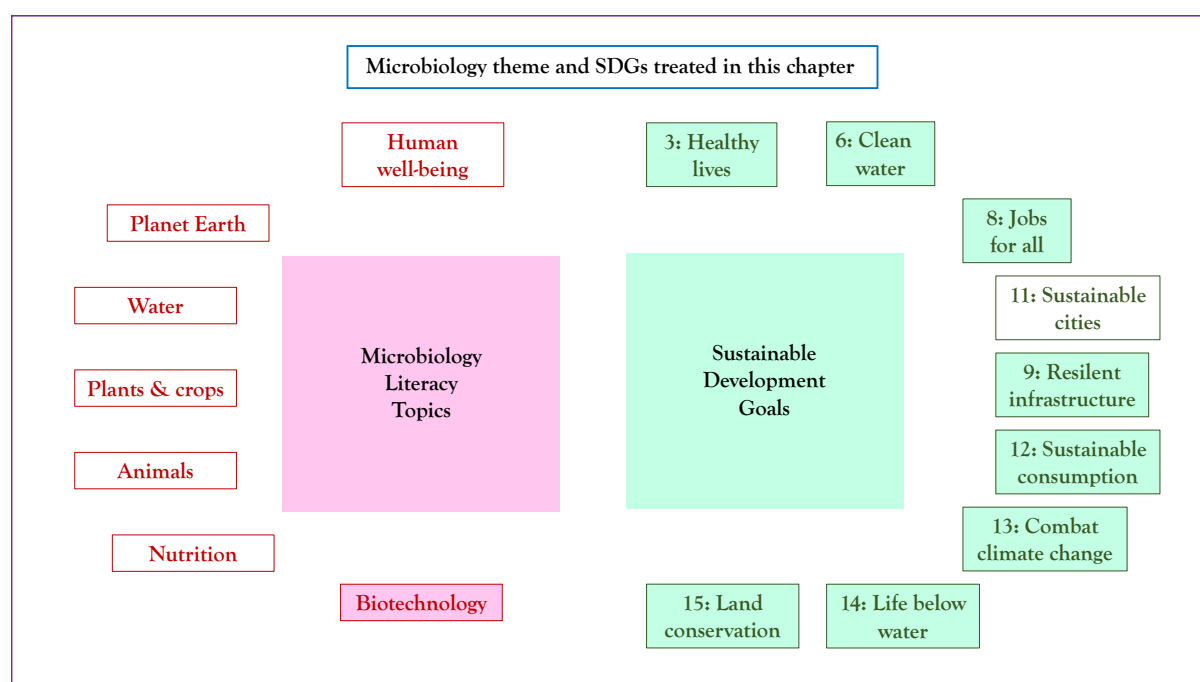
### Argumento

La celulosa bacteriana (CB) fue identificada por primera vez en 1886 por el investigador A.J. Brown, quien al analizar bacterias en soluciones de vinagre, notó la aparición de una fina capa gelatinosa en la superficie del líquido. Su aspecto le recordó al de un calamar, pero lo más sorprendente fue descubrir que esta película estaba compuesta íntegramente por **celulosa**, un compuesto habitual en las plantas. No obstante, esta celulosa tenía un origen microbiano y presentaba características muy distintas que captaron rápidamente la atención del ámbito científico.

En sus inicios, este hallazgo pudo parecer anecdótico, pero con el tiempo, se ha revelado como un descubrimiento de gran valor. La CB se distingue por su alta pureza y resistencia, y además, ofrece la ventaja de poder producirse de manera ecológica, sin recurrir a la tala de árboles, el consumo excesivo de recursos naturales o el uso de procesos químicos contaminantes. Dado que puede obtenerse mediante el cultivo controlado de bacterias, representa una alternativa sostenible con múltiples aplicaciones. Actualmente, la CB despierta un gran interés en sectores como la medicina, el medio ambiente y la tecnología, por su versatilidad y bajo impacto ambiental.

### La microbiología y el contexto social

*La microbiología:* fermentación de azúcares; producción extracelular; trabajo arquitectónico orgánico; biotecnología sostenible; producción de vinagre; acidificación. *Y, de manera complementaria para cerrar la narrativa:* atribución de recursos no agrícolas; andamiajes biomédicos. *Cuestiones relacionadas con la sostenibilidad:* salud; economía y empleo; contaminación ambiental; calentamiento global.



## Celulosa bacteriana: más pura y fuerte que la celulosa vegetal

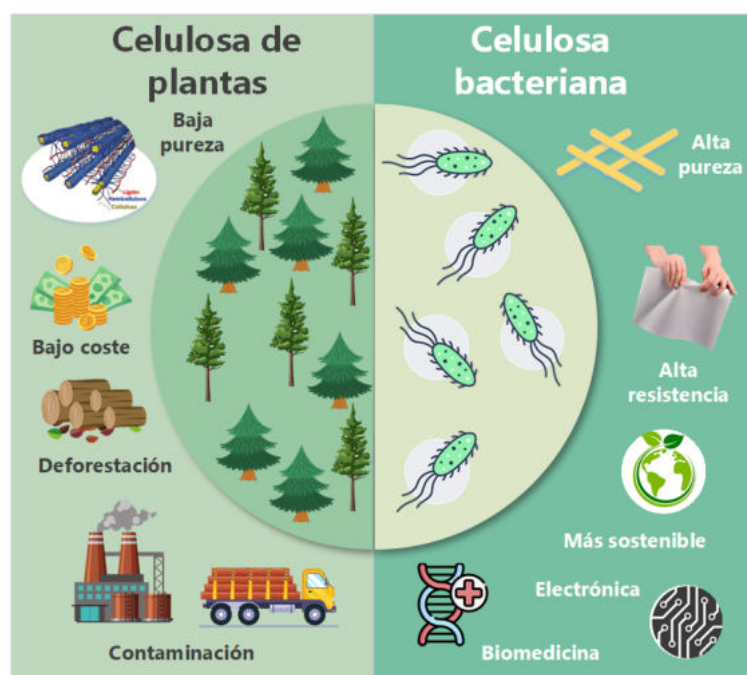
1. *¿Realmente es sostenible seguir obteniendo celulosa a partir de la madera, por muy rentable que resulte?* Este material, que constituye el componente principal de la madera, se utiliza de forma masiva en sectores como el textil, el papelerero o el de embalajes, precisamente por su bajo coste y versatilidad. Sin embargo, su producción a gran escala genera importantes impactos ambientales. La tala intensiva de árboles puede ocasionar **deforestación**, pérdida de hábitats, disminución de la **biodiversidad**, degradación del suelo y una menor capacidad de los bosques para absorber dióxido de carbono, lo que agrava la crisis climática.

Una alternativa más responsable y **eco-sostenible** pasa por utilizar madera procedente de bosques gestionados de forma sostenible, donde se controle la extracción y se garanticen prácticas de reforestación. En estos casos, la celulosa de origen vegetal puede considerarse compatible con los principios de sostenibilidad, ya que los árboles cultivados y aprovechados adecuadamente funcionan como recursos renovables que ayudan a capturar CO<sub>2</sub> y a combatir el **cambio climático**.

En definitiva, aunque la celulosa vegetal es económicamente atractiva, su sostenibilidad depende directamente del modelo de producción y gestión forestal. Apostar por soluciones más ecológicas, como el reciclaje de materiales o el aprovechamiento de residuos agrícolas, podría reducir el impacto ambiental y ofrecer vías más limpias para obtener este valioso polímero.

2. *¿Es posible que la corteza del árbol dificulte el uso de la celulosa vegetal, por ejemplo, en medicina?* La celulosa vegetal presenta ciertas limitaciones cuando se requiere un material de alta pureza y estructura uniforme.

Al estar compuesta no solo por celulosa, sino también por otros elementos como **lignina** y **hemicelulosa**, su procesamiento se complica y su rendimiento puede verse comprometido en aplicaciones que exigen precisión, como en el ámbito médico o tecnológico. Además, las fibras de origen vegetal son relativamente gruesas y no ofrecen la nanoestructura fina que resulta esencial en apósitos avanzados, **dispositivos electrónicos flexibles** o **soportes celulares delicados**. Su rigidez, en particular, dificulta su uso en contextos donde se requiere elasticidad y adaptabilidad.



Frente a esto, la CB ofrece una solución notablemente superior. Producida por microorganismos como *Komagataeibacter xylinum* mediante procesos de fermentación, la CB se genera como una forma de celulosa extremadamente pura, libre de lignina y otros compuestos vegetales. Su estructura basada en nanofibras, finas y bien organizadas, le confiere una **resistencia mecánica** sobresaliente, además de una flexibilidad y capacidad de adaptación ideales para usos biomédicos y tecnológicos avanzados.

Gracias a su capacidad para formar películas delgadas, flexibles y al mismo tiempo resistentes, la celulosa bacteriana se adapta perfectamente a aplicaciones de alta tecnología, como

pantallas flexibles o sistemas avanzados de filtración. Además, al poder cultivarse en entornos controlados, su producción resulta más sostenible que la extracción tradicional de celulosa vegetal, ya que requiere menos productos químicos y genera un impacto ambiental significativamente menor.

**3. La celulosa bacteriana es una estructura biológica sorprendente, resultado del trabajo colectivo de bacterias que actúan de forma ordenada, casi como si fueran integrantes de una orquesta perfectamente sincronizada.** A través de un proceso meticuloso y coordinado, estos



microorganismos generan una red de **fibras** altamente organizada. Cada bacteria aporta su parte en la construcción de esta red, siguiendo un ritmo natural y preciso que da lugar a una compleja malla fibrosa.

Durante este proceso, cada célula bacteriana produce diminutas fibrillas de celulosa que emergen por pequeños poros. Estas fibrillas se agrupan en cintas que, mediante los movimientos constantes de las bacterias, se entrelazan para formar una red densa y resistente. Al construir esta red en la superficie del medio líquido donde viven, las bacterias también crean túneles funcionales: unos que les permiten ascender hacia el oxígeno y otros que facilitan su acceso a los nutrientes presentes en el líquido.

De esta forma, la celulosa bacteriana se genera capa tras capa, dando lugar a un material robusto, flexible y con una notable capacidad de adaptación. Cada microorganismo cumple una

función específica dentro de este proceso colectivo, contribuyendo a la creación de una **estructura viva** y eficiente diseñada por la naturaleza.

El resultado es un biomaterial con propiedades excepcionales: gran resistencia mecánica, **elasticidad** y capacidad para retener humedad. Estas características lo hacen ideal para aplicaciones tan diversas como apósitos cicatrizantes o envases sostenibles. La capacidad de las bacterias para organizarse y construir una estructura funcional es un claro ejemplo del ingenio de los sistemas naturales y su potencial para inspirar soluciones tecnológicas.

**4. La microbiología detrás de estas pequeñas arquitectas bacterianas revela un sistema complejo y eficiente, sustentado en una dieta sencilla a base de azúcares, nitrógeno y oxígeno.**

En las especies del género *Komagataeibacter*, la producción de CB es un proceso perfectamente orquestado, regulado por un conjunto de genes clave. Más allá de ser solo un componente estructural en los **biofilms**, la CB también cumple funciones ecológicas importantes: protege a las bacterias frente a la radiación ultravioleta y les permite sobrevivir en entornos con bajos niveles de oxígeno.

Aunque el núcleo del mecanismo productor de celulosa está conservado en muchas bacterias, aquellas del género *Komagataeibacter* cuenta con particularidades genéticas que otorgan a su celulosa propiedades únicas. Estas características provienen del clúster génico bcs, que codifica varias proteínas fundamentales en el proceso:

- Complejo BcsABC: Este conjunto **enzimático** se encarga de unir las moléculas de azúcar (UDP-glucosa) para formar cadenas de celulosa (BcsA), transportarlas a lo largo del peptidoglicano (BcsB) y finalmente secretarlas fuera de la célula a través de la membrana externa, donde BcsC actúa como un canal o poro para su liberación al exterior.
- Una característica distintiva del género *Komagataeibacter* es la presencia del gen específico *bcsD*, que codifica una proteína relacionada con la cristalización. Esta, en combinación con el factor complementario BcsH, regula la distancia entre los complejos sintetizadores BcsABC. Esta separación precisa es clave para permitir la cristalización del polímero fuera de la célula, lo que da lugar a una celulosa de alta **cristalinidad** y gran resistencia.

**5. ¿Es posible modificar genéticamente a las bacterias para que produzcan celulosa con las propiedades que queremos?** La **biología sintética** ofrece una respuesta prometedora a esta pregunta, al tratar el ADN como un conjunto modular de instrucciones que se puede reprogramar. Desde principios de los años 2000, esta disciplina ha impulsado grandes avances en biotecnología, especialmente en microorganismos bien caracterizados como *E. coli* y *Saccharomyces cerevisiae*. Estos modelos cuentan con genomas ampliamente estudiados, lo que ha facilitado el desarrollo de herramientas de ADN modulares capaces de activar nuevos programas genéticos.

Aunque las bacterias productoras de celulosa como *Komagataeibacter* han avanzado más lentamente en este campo, ya se han logrado progresos significativos. A partir de 2016, algunos investigadores introdujeron **kits de ADN modulares** y herramientas basadas en **CRISPR** en *K. rhaiticus*, lo que permitió controlar la expresión génica y crear patrones espaciales en las películas de celulosa. Gracias a estos avances, se demostró que señales externas como la acil-homoserina lactona (AHL) pueden modular la expresión de genes, generando materiales con capacidad de **auto-detección** que responden al entorno y a la disposición celular.

Además, se ha explorado la posibilidad de crear materiales compuestos y **copolímeros** de CB mediante la incorporación de genes de otros organismos. Se han desarrollado, por ejemplo, copolímeros de **quitina**-celulosa y materiales enriquecidos con proteínas que presentan propiedades mejoradas. La biología sintética abre así la puerta a CB con funcionalidades avanzadas, como sensores biológicos, sistemas para degradar contaminantes o materiales con comportamientos celulares programables.

No obstante, aún queda camino por recorrer. Uno de los retos futuros es optimizar cepas de *Komagataeibacter* para la secreción eficiente de proteínas. Este paso permitiría fabricar materiales de CB que incorporen proteínas funcionales, ampliando sus aplicaciones en campos como la filtración de agua, la medicina regenerativa o el diseño de materiales inteligentes.

**6. Los apósitos elaborados a partir de celulosa bacteriana han supuesto un avance significativo en el ámbito de la biomedicina, especialmente en el tratamiento de heridas.** Gracias a sus características únicas, la CB se perfila como un biopolímero con un enorme potencial para múltiples aplicaciones médicas. Entre sus usos más destacados se encuentra la liberación controlada de medicamentos, ya sea en forma de cápsulas orales o como apósitos impregnados con antibióticos o plata para favorecer la **regeneración de la piel** en quemaduras.



Su alta porosidad permite la carga de diversos compuestos terapéuticos, incluyendo agentes antibacterianos, anticancerígenos, antioxidantes y antiinflamatorios. Además, la CB puede ser químicamente modificada para ajustar y mejorar el perfil de liberación de fármacos, e incluso adaptarse a estímulos específicos como el pH, la temperatura o campos electromagnéticos.

Por otro lado, su excelente **biocompatibilidad**, resistencia

mecánica y capacidad de absorber **exudados** manteniendo un entorno húmedo hacen que la CB sea ideal para apósitos de uso clínico. Estos vendajes no solo actúan como barreras protectoras frente a infecciones, sino que también permiten el intercambio gaseoso y pueden retirarse sin causar dolor. Su transparencia óptica facilita además la monitorización no invasiva del proceso de cicatrización.

En heridas profundas, quemaduras y control de sangrados, los apósitos basados en CB han demostrado ser altamente eficaces. Diversos estudios subrayan que la nanoestructura de la CB desempeña un papel clave en la aceleración de la regeneración tisular.

Asimismo, en el campo de la ingeniería de tejidos, se ha comprobado que la CB puede actuar como un soporte biológico para células humanas, al imitar la matriz extracelular. Modificaciones como la incorporación de queratina, por ejemplo, favorecen la adhesión celular y ayudan a mantener la morfología de las células durante el cultivo.

Como prueba del éxito de este material, existen en el mercado varias marcas que han desarrollado apósitos comerciales a base de CB para el tratamiento de quemaduras, entre ellas: Biofill, XCell, Suprasorb X, Nanoderm™ y Membracel.

**7. Entonces, ¿realmente podemos fabricar ropa con celulosa bacteriana, igual que con el algodón?** La respuesta es sí. No solo es posible, sino que además la CB ofrece ventajas singulares frente a las fibras tradicionales. Este biopolímero representa una apuesta prometedora para la innovación textil, especialmente en el impulso de métodos de producción más sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Esto cobra especial relevancia si se tiene en cuenta que la industria de la moda es actualmente la segunda más contaminante del mundo, solo por detrás del sector petrolero.

Una de las precursoras en este campo fue la diseñadora británica Suzanne Lee, quien desarrolló el proyecto BioCouture. A partir del cultivo de CB generada por **kombucha** y utilizando técnicas convencionales de confección, logró crear prendas como chaquetas y guantes. Este material “cultivado” en lugar de tejido ofrece una alternativa mucho más sostenible frente a fibras como el algodón, cuya producción requiere grandes cantidades de agua y superficie cultivable.

Otro ejemplo innovador es el de Malai, una iniciativa que fabrica cuero vegano a partir de CB cultivada en medios que combinan agua de coco y subproductos industriales. El material

resultante, biodegradable y resistente, se utiliza para crear accesorios de moda en distintos colores, con una durabilidad notable si se cuidan adecuadamente. La CB también tiene gran potencial en el desarrollo de ropa funcional, gracias a sus propiedades de transpirabilidad, absorción de humedad y acción antimicrobiana. Estas cualidades la hacen

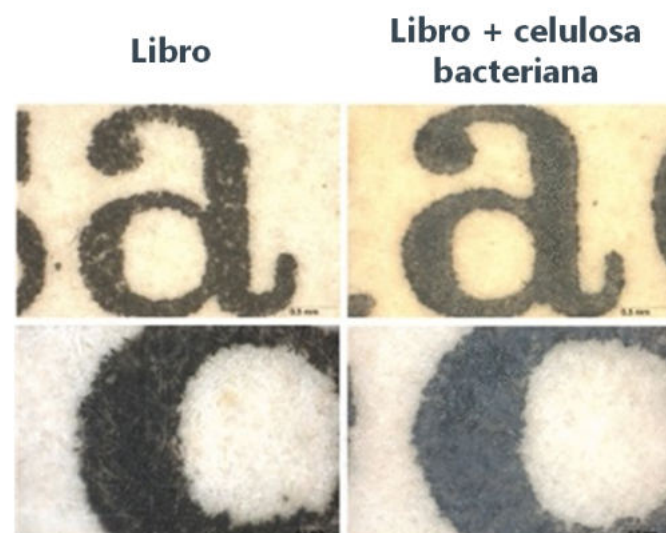
ideal para prendas de alto rendimiento como ropa deportiva, vestimenta médica o equipamiento protector. A diferencia de las fibras sintéticas, la CB es ecológica y aporta mejoras funcionales que incrementan el confort, la higiene y la sostenibilidad en el sector textil.



**8. La celulosa bacteriana también ha demostrado ser una herramienta valiosa en la restauración de documentos antiguos.** La mayoría de los papeles históricos, especialmente

aquellos producidos entre mediados del siglo XIX y finales del siglo XX, presentan signos de degradación debidos a la acidificación, la oxidación y el deterioro de las fibras, causados tanto por factores ambientales agresivos como por la propia fragilidad de los materiales empleados en su fabricación.

Ante las limitaciones de las técnicas de conservación tradicionales —que suelen emplear polímeros sintéticos o naturales con resultados variables—, la CB surge como una alternativa más eficaz. Sus ventajas se deben a su biocompatibilidad, su similitud estructural con las fibras del



papel y su gran capacidad de adhesión. Aplicada en forma de solución mediante atomización ultrasónica, la CB no solo mejora las propiedades mecánicas del papel envejecido —como la resistencia a la tracción, al desgarro y al plegado—, sino que también estabiliza el pH del papel y refuerza su resistencia al **envejecimiento** futuro.

Además, la capacidad de la CB para establecer enlaces fuertes entre fibras prolonga considerablemente la vida útil del documento, incluso en condiciones adversas. Lo más destacable es que este tratamiento no invasivo permite conservar la apariencia original del papel, un aspecto fundamental cuando se trata de preservar la autenticidad de documentos históricos.

**9. Residuos alimentarios e industriales: nutrientes de bajo coste para impulsar una producción circular de celulosa bacteriana.** El aprovechamiento de residuos industriales para la producción de CB no solo representa una opción económica, sino también una estrategia con importantes beneficios ambientales. Por ejemplo, los **subproductos agroindustriales** como

los **hidrolizados** de tallos de maíz, la paja de trigo o las cáscaras de frutas son fuentes abundantes de azúcares que las bacterias pueden utilizar como sustrato. De igual forma, industrias como la cervecera o la azucarera generan residuos como la melaza, que también se ha empleado con éxito como fuente de carbono para obtener CB.

Estas corrientes residuales no solo permiten reducir los costes de producción, sino que además se integran en modelos de **economía circular** al transformar materiales que normalmente se desecharían en recursos útiles y de alto valor añadido. Este enfoque promueve un sistema productivo más sostenible y eficiente, al mismo tiempo que reduce significativamente la generación de residuos.

Al maximizar el uso de **biomasa** disponible, se minimizan los costes asociados a su eliminación y se garantiza una fuente renovable de materia prima para la fabricación de CB. Esta integración permite a las industrias disminuir su huella ambiental y, al mismo tiempo, avanzar hacia la comercialización a gran escala de productos basados en CB en sectores como la biomedicina, los envases alimentarios o la ingeniería de materiales.

### Relevancia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los Grandes Retos

La dimensión microbiana de la producción y el uso de CB está relacionada con varios ODS (*los aspectos microbianos aparecen en cursiva*), entre ellos

- **Objetivo 3. Garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades** (*mejorar la salud y prevenir infecciones*)

La celulosa bacteriana (CB) se ha consolidado como un material clave en el ámbito sanitario gracias a su alta biocompatibilidad, su carácter no tóxico y su capacidad para acelerar la cicatrización de heridas. Por ejemplo, los apósitos de CB se utilizan con éxito en el tratamiento de quemaduras, ya que favorecen la retención de humedad y estimulan la regeneración del tejido sin provocar irritaciones.

Además, la CB puede emplearse como soporte en sistemas de liberación de fármacos, permitiendo una administración controlada y dirigida de medicamentos, lo que incrementa la eficacia de los tratamientos. Un aspecto especialmente relevante es que, al producirse a partir de residuos orgánicos, los productos sanitarios basados en CB pueden fabricarse a menor coste, haciéndolos más accesibles para poblaciones amplias y contribuyendo así a mejorar los resultados en salud de forma equitativa y sostenible.

- **Objetivo 6. Garantizar la disponibilidad de agua y su gestión sostenible para todos** (*asegurar el acceso al agua potable, mejorar su calidad, reducir la contaminación, proteger los ecosistemas acuáticos y optimizar la gestión del agua y el saneamiento*). La estructura de nanofibras de la CB la convierte en un material ideal para su uso en sistemas de filtración, ya que permite eliminar eficazmente contaminantes del agua. Investigaciones recientes han demostrado que las membranas de CB pueden modificarse para captar metales pesados, como el plomo o el mercurio, lo que las hace especialmente útiles en procesos de purificación del agua. Además, al producirse a partir de residuos agrícolas o subproductos industriales, la fabricación de estas membranas se vuelve más económica y respetuosa con el medio ambiente. Esto facilita su implementación en comunidades con recursos limitados, especialmente en regiones en desarrollo, mejorando el acceso al agua potable y reduciendo la carga ambiental asociada a los sistemas convencionales de tratamiento.

- **Objetivo 8. Promover el crecimiento económico sostenido, inclusivo y sostenible, el empleo pleno y productivo, y el trabajo decente para todos** (*fomentar actividades económicas sostenibles y la creación de empleo*). La producción de CB a partir de residuos industriales

y agrícolas impulsa la creación de empleo verde en sectores como la biotecnología, la gestión de residuos o la ciencia de materiales. Este enfoque no solo promueve la innovación, sino que también favorece el desarrollo de productos ecológicos, como textiles sostenibles o dispositivos biomédicos de bajo impacto ambiental. Además, el modelo de producción de CB ofrece grandes oportunidades para pequeñas y medianas empresas (pymes), especialmente en regiones en desarrollo, al permitirles transformar residuos locales en productos de valor añadido. Esto contribuye a un crecimiento económico más inclusivo y ayuda a reducir desigualdades sociales y territoriales. Al integrarse en una economía circular, la CB permite a las industrias evolucionar de forma sostenible, asegurando su resiliencia a largo plazo frente a los retos ambientales y económicos del futuro.

- **Objetivo 9. Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible, y fomentar la innovación** (*prácticas industriales sostenibles e impulso a la innovación*). La obtención de CB a partir de residuos como cáscaras de frutas o subproductos de la industria cervecera permite a las industrias reducir su dependencia de materias primas vírgenes, disminuyendo al mismo tiempo su impacto ambiental. Este enfoque favorece un uso más eficiente de los recursos, impulsa la economía circular y refuerza la capacidad de adaptación del sector industrial. Las aplicaciones de la CB en ámbitos como los textiles, los envases o la biomedicina estimulan la innovación, al ofrecer alternativas ecológicas frente a materiales tradicionales. Asimismo, su producción abre nuevas oportunidades para que pequeñas y medianas empresas aprovechen residuos locales como materia prima, lo que contribuye a una industrialización más inclusiva, sostenible y adaptable a escala global.

- **Objetivo 12. Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles** (*adoptar prácticas sostenibles, reducir la generación de residuos y la contaminación, avanzar hacia ciclos de vida sin desperdicio e informar sobre el desarrollo sostenible*). El uso de residuos agroindustriales —como cáscaras de frutas, tallos de maíz o subproductos de la industria cervecera— para producir CB representa un ejemplo claro de producción responsable. Este enfoque permite a las industrias avanzar hacia un modelo de economía circular, al dar un nuevo propósito a materiales que, de otro modo, serían desechados. Además de reducir los costes asociados a la gestión de residuos, esta estrategia disminuye la dependencia de recursos naturales, haciendo que el ciclo de producción sea más eficiente, sostenible y respetuoso con el entorno. Dado que la CB es biodegradable, su aplicación en sectores como el del embalaje o el textil contribuye directamente a reducir la huella ecológica de industrias tradicionalmente dependientes de materiales no renovables, como los plásticos.

- **Objetivo 13. Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos** (*reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la huella de carbono*). La producción de CB a partir de residuos contribuye activamente a mitigar el cambio climático al reducir de forma significativa las emisiones de gases de efecto invernadero. A diferencia de métodos convencionales como el vertido o la incineración de residuos, que liberan grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, el aprovechamiento de estas corrientes residuales para generar CB transforma un problema ambiental en una solución sostenible. Además, el proceso de producción de CB requiere menos productos químicos y consume menos energía que la extracción tradicional de celulosa a partir de árboles, lo que se traduce en un menor impacto ambiental. A esto se suma el hecho de que disminuir la dependencia de la celulosa vegetal ayuda a frenar la deforestación y a conservar los bosques, que son fundamentales para la captura de carbono y la regulación del clima. En conjunto, estas acciones posicionan a la CB como una herramienta clave en la transición hacia tecnologías limpias y de baja emisión, alineadas con los objetivos globales para enfrentar la crisis climática.

- **Objetivo 14. Conservar y utilizar de forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos para el desarrollo sostenible** (*reducir la contaminación de los ecosistemas marinos, especialmente por plásticos*). Gracias a su carácter biodegradable, la CB representa una alternativa ecológica frente a los plásticos convencionales utilizados en el envasado, uno de los principales contaminantes de los entornos marinos. Sustituir estos materiales sintéticos por CB ayuda a reducir la acumulación de residuos que terminan en mares y océanos. Además, al fabricarse a partir de residuos agrícolas e industriales, la CB permite disminuir la dependencia de polímeros sintéticos derivados del petróleo, lo que reduce significativamente el riesgo de que estos terminen contaminando los ecosistemas acuáticos. La CB también puede emplearse en sistemas de filtración de agua, contribuyendo a la limpieza de los océanos mediante la eliminación de contaminantes presentes en vertidos industriales. Estas propiedades hacen que la CB apoye activamente los esfuerzos por minimizar la liberación de sustancias nocivas en el medio marino, favoreciendo la salud de los ecosistemas acuáticos y la conservación de la biodiversidad. Su naturaleza biodegradable y su proceso de producción sostenible la posicionan como una herramienta valiosa en la lucha contra la contaminación oceánica.

- **Objetivo 15. Proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener y revertir la degradación del suelo y frenar la pérdida de biodiversidad** (*reducir la deforestación y conservar la biodiversidad*). La producción de CB a partir de residuos orgánicos permite reducir la dependencia de la celulosa obtenida mediante la tala de árboles, contribuyendo así a frenar la deforestación. Este cambio de enfoque favorece la conservación de hábitats naturales y protege la biodiversidad que depende de ellos. La extracción tradicional de celulosa vegetal suele implicar la destrucción de bosques y la alteración de ecosistemas completos. En cambio, obtener CB a partir de fuentes renovables y residuos minimiza la degradación ambiental y favorece un equilibrio entre el desarrollo industrial y la conservación de los entornos naturales. Esta práctica sostenible apoya directamente la protección de los ecosistemas terrestres, fundamentales para preservar la biodiversidad del planeta y asegurar la resiliencia de los sistemas ecológicos frente a los desafíos globales.

### Posibles implicaciones para la toma de decisiones

#### 1. *A nivel individual*

a. A la hora de elegir entre CB y celulosa vegetal, muchas personas pueden tener en cuenta los beneficios medioambientales de la primera. La CB es biodegradable y se produce sin necesidad de talar árboles, lo que la convierte en una opción más respetuosa con el planeta. Sin embargo, factores como el precio o la facilidad para encontrar productos elaborados con este material también pueden influir en la decisión final. ¿Compensa el impacto ambiental positivo frente al posible coste económico?

b. Quienes priorizan el consumo responsable y buscan reducir su huella ecológica pueden sentirse atraídos por los productos hechos con CB. Este material tiene aplicaciones en ámbitos tan diversos como los dispositivos médicos, los envases o el sector textil. En estos casos, conviene valorar si sus propiedades —como la durabilidad, la flexibilidad y el bajo impacto ambiental— se ajustan a las necesidades personales y a los valores del consumidor, por ejemplo, al elegir ropa sostenible o material sanitario.

c. En el ámbito de la salud, la CB también puede influir en las decisiones individuales. Su alta biocompatibilidad y su carácter no tóxico la convierten en una opción segura para usos médicos, como apósitos o tratamientos para heridas. Para quienes buscan soluciones

## Un marco educativo centrado en el alumnado para la enseñanza de la microbiología

que sean tanto eficaces como sostenibles, la CB representa una alternativa confiable y respetuosa con el entorno.

### **2. Políticas comunitarias**

a. Las administraciones locales pueden plantearse implementar políticas que fomenten el uso de CB como alternativa a materiales tradicionales, como el plástico en envases. Al ser biodegradable, la CB contribuye a reducir los residuos que acaban en vertederos o en sistemas acuáticos. Por ello, las comunidades podrían incentivar su adopción por parte de la industria como una medida concreta para disminuir la contaminación y avanzar hacia ecosistemas más limpios.

b. Dado que la CB tiene aplicaciones relevantes en el ámbito de la salud —por ejemplo, en apósitos o estructuras de soporte celular—, su producción local podría beneficiar especialmente a aquellas comunidades con acceso limitado a materiales médicos costosos. Fomentar la fabricación de suministros sanitarios a base de CB puede reducir costes en el sistema de salud y mejorar la disponibilidad de productos médicos sostenibles.

c. Las comunidades también pueden apoyar el uso de CB promoviendo el emprendimiento local y la producción responsable. Respaldar a pequeñas empresas que trabajen con este material en sectores como el embalaje, el textil o la fabricación de productos ecológicos puede ser clave. Políticas públicas orientadas a incentivar la manufactura sostenible ayudarían a consolidar una economía circular a nivel local.

### **3. Políticas nacionales**

a. Los gobiernos pueden desarrollar políticas nacionales que promuevan activamente el uso de la CB como material sostenible, con el fin de reducir la deforestación, la contaminación y las emisiones de gases de efecto invernadero. Al disminuir la dependencia de la celulosa derivada de la madera y de los plásticos tradicionales, la CB podría posicionarse como un aliado clave en la lucha contra el cambio climático.

b. Establecer políticas que incentiven la utilización de residuos como materia prima para la producción de CB —por ejemplo, subproductos agrícolas o residuos industriales— favorecería los objetivos de la economía circular. Este tipo de medidas animaría a las industrias a utilizar recursos abundantes y de bajo coste, reduciendo tanto el impacto ambiental como los costes de producción.

c. La CB ha supuesto una auténtica revolución en el ámbito biomédico, especialmente en el tratamiento de heridas y la ingeniería de tejidos. Por ello, los sistemas nacionales de salud podrían apoyar la fabricación y el uso de dispositivos médicos elaborados con CB, lo que permitiría mejorar los resultados clínicos y, al mismo tiempo, promover prácticas sanitarias más sostenibles y económicas.

d. Asimismo, los gobiernos pueden desempeñar un papel fundamental financiando e impulsando la investigación y el desarrollo de nuevas aplicaciones basadas en CB. Esto permitiría ampliar su uso en sectores de alta tecnología, como la electrónica flexible, la filtración de agua o los envases biodegradables. Fomentar la innovación en los métodos de producción fortalecería a las industrias nacionales comprometidas con la sostenibilidad y la transición ecológica.

## Participación del alumnado

### **1. Debate en clase sobre los retos asociados a la producción de celulosa**

a. ¿Cuáles son las principales diferencias entre la CB y la celulosa de origen vegetal?

## Un marco educativo centrado en el alumnado para la enseñanza de la microbiología

- b. ¿Cómo se comparan los impactos ambientales de la celulosa obtenida de la madera frente a los de la producción de CB?
- c. ¿Por qué se considera que la CB es una opción más sostenible?

### 2. *Concienciación del alumnado como agentes con capacidad de decisión*

- a. La CB presenta muchas ventajas desde el punto de vista medioambiental, pero también tiene limitaciones en cuanto a coste y escalabilidad. Como grupo, ¿qué aspectos de su producción o uso consideráis más relevantes o prioritarios?
- b. ¿Se os ocurren formas de fomentar el uso de CB en sectores como el textil o el sanitario? ¿Qué papel podrían jugar la escuela o la comunidad en ello?
- c. A nivel individual, ¿qué acciones podríais llevar a cabo para elegir materiales más sostenibles en vuestra vida cotidiana?

### 1. *Ejercicios para trabajar en el aula*

- a. En grupos, investigar los impactos ambientales asociados a la producción tradicional de celulosa (como la deforestación o la contaminación). Después, presentar alternativas sostenibles, como la CB, que ayuden a reducir esos efectos negativos.
- b. Además de en medicina y textiles, ¿en qué otros campos creéis que podría aplicarse la CB? ¿Cómo podrían esas nuevas aplicaciones contribuir a minimizar el daño ambiental?
- c. Analizar cómo se relaciona la producción de CB con diferentes Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como la acción por el clima (ODS 13), el consumo responsable (ODS 12) o la vida submarina (ODS 14).
- d. Diseñar un plan de ciudad sostenible que integre la producción y el uso de CB para reducir la contaminación y los residuos en distintos sectores, como el tratamiento del agua o los envases.

## Base empírica, lecturas complementarias y material didáctico

### *Riesgos derivados de la deforestación*

- Posición de la Unión Europea: [https://environment.ec.europa.eu/topics/forests/deforestation\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/forests/deforestation_en)
- Acción de la UE para proteger y restaurar los bosques del mundo: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1565272554103&uri=CELEX:52019DC0352>
- Regulación de la UE en 2023 respecto a los productos libres de deforestación: [https://environment.ec.europa.eu/topics/forests/deforestation/regulation-deforestation-free-products\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/forests/deforestation/regulation-deforestation-free-products_en)
- Por qué la deforestación importa y qué podemos hacer para detenerla (con un video explicativo): <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/deforestation>
- Informe sobre los frentes de la deforestación, por WWF: <https://files.worldwildlife.org/wwfcomsprod/files/Publication/file/ocuoxxmdil Deforestation fronts drivers and responses in a changing world full report 1 .pdf>

### *Celulosa de plantas*

- Un juego de mesa sobre celulosa: <https://youtube.com/shorts/AduyU-Phmy8?si=bgqstyN2NlkRU7-A>

## Un marco educativo centrado en el alumnado para la enseñanza de la microbiología

- Cómo se hace el papel a partir de celulosa: <https://youtu.be/-XdwsChJTwU?si=8oNIEyRawogpvNZd>
- Videos de celulosa: <https://www.bbc.co.uk/bitesize/articles/z2d2gdm#zxpmm39>
- ¿Son las fibras de celulosa seguras para ser ingeridas? <https://www.healthline.com/nutrition/cellulose-fiber>
- Gopi, S., Balakrishnan, P., Chandradhara, D., Poovathankandy, D., & Thomas, S. (2019). General scenarios of cellulose and its use in the biomedical field. *Materials Today Chemistry*, 13, 59-78. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2019.04.012>

### *Celulosa bacteriana (CB)*

- Comparación de la celulosa de plantas y de bacterias: [https://youtu.be/P3bXclXWOTw?si=kiZTVVeYI\\_re3Zqu](https://youtu.be/P3bXclXWOTw?si=kiZTVVeYI_re3Zqu)
- Lee, K. Y., Buldum, G., Mantalaris, A., & Bismarck, A. (2014). More than meets the eye in bacterial cellulose: biosynthesis, bioprocessing, and applications in advanced fiber composites. *Macromolecular bioscience*, 14(1), 10-32. <https://doi.org/10.1002/mabi.201300298>
- Campano, C., Balea, A., Blanco, A., & Negro, C. (2016). Enhancement of the fermentation process and properties of bacterial cellulose: a review. *Cellulose*, 23, 57-91. <https://doi.org/10.1007/s10570-015-0802-0>
- Imágenes de bacterias secretando fibrillas de celulosa por sus poros: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020195205030>

### *Estructura interna de la celulosa bacteriana*

- Cómo las bacterias producen BC con capas y túneles: Campano, C., Rivero-Buceta, V., Fabra, M. J., & Prieto, M. A. (2022). Gaining control of bacterial cellulose colonization by polyhydroxyalkanoate-producing microorganisms to develop bioplasticized ultrathin films. *International journal of biological macromolecules*, 223, 1495-1505. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.11.120>
- Gromovkyh, T. I., Pigaleva, M. A., Gallyamov, M. O., Ivanenko, I. P., Ozerova, K. E., Kharitonova, E. P., ... & Kiselyova, O. I. (2020). Structural organization of bacterial cellulose: The origin of anisotropy and layered structures. *Carbohydrate polymers*, 237, 116140. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116140>
- Thompson, N. S., Carlson, J. A., Kaustinen, H. M., & Uhlin, K. I. (1988). Tunnel structures in *Acetobacter xylinum*. *International Journal of Biological Macromolecules*, 10(2), 126-127. [https://doi.org/10.1016/0141-8130\(88\)90021-9](https://doi.org/10.1016/0141-8130(88)90021-9)

### *Mecanismo genético de los productores de celulosa bacteriana*

- Hernández-Arriaga, A. M., Del Cerro, C., Urbina, L., Eceiza, A., Corcuera, M. A., Retegi, A., & Prieto, M. (2019). Genome sequence and characterization of the bcs clusters for the production of nanocellulose from the low pH resistant strain *Komagataeibacter medellinensis* ID 13488. *Microbial Biotechnology*, 12(4), 620-632. DOI: 10.1111/1751-7915.13376
- Manan, S., Ullah, M. W., Ul-Islam, M., Shi, Z., Gauthier, M., & Yang, G. (2022). Bacterial cellulose: Molecular regulation of biosynthesis, supramolecular assembly, and tailored structural and functional properties. *Progress in Materials Science*, 129, 100972. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100972>

### ***Reprogramando celulosa bacteriana mediante biología sintética***

- Singh, A., Walker, K. T., Ledesma-Amaro, R., & Ellis, T. (2020). Engineering bacterial cellulose by synthetic biology. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(23), 9185. <https://doi.org/10.3390/ijms21239185>
- Florea, M., Hagemann, H., Santosa, G., Abbott, J., Micklem, C. N., Spencer-Milnes, X., ... & Ellis, T. (2016). Engineering control of bacterial cellulose production using a genetic toolkit and a new cellulose-producing strain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(24), E3431-E3440. <https://doi.org/10.1073/pnas.1522985113>

### **Celulosa bacteriana para la cura de heridas**

- Bionext company: <https://www.bennetthealth.net/es/bionext-es/>
- Petersen, N., & Gatenholm, P. (2011). Bacterial cellulose-based materials and medical devices: current state and perspectives. *Applied microbiology and biotechnology*, 91(5), 1277-1286. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3432-y>
- Czaja, W., Krystynowicz, A., Bielecki, S., & Brown Jr, R. M. (2006). Microbial cellulose—the natural power to heal wounds. *Biomaterials*, 27(2), 145-151. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.07.035>
- Kucińska-Lipka, J., Gubanska, I., & Janik, H. J. P. B. (2015). Bacterial cellulose in the field of wound healing and regenerative medicine of skin: recent trends and future prospectives. *Polymer Bulletin*, 72, 2399-2419. <https://doi.org/10.1007/s00289-015-1407-3>

### ***Cómo hacer ropa a partir de bacterias***

- Suzanne Lee: [https://youtu.be/u9u\\_m\\_QzXSI?si=fWoUPIP\\_y8Xby-v](https://youtu.be/u9u_m_QzXSI?si=fWoUPIP_y8Xby-v)
- TED talk of Suzanne Lee: <https://youtu.be/3p3-vl9VFYU?si=I4b6QOeR3mozvL-s>
- da Silva, C. J. G., de Medeiros, A. D. L. M., de Amorim, J. D. P., do Nascimento, H. A., Converti, A., Costa, A. F. S., & Sarubbo, L. A. (2021). Bacterial cellulose biotextiles for the future of sustainable fashion: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 2967-2980. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01214-x>

### **Restauración de libros antiguos**

- Santos, S. M., Carbajo, J. M., Gómez, N., Ladero, M., & Villar, J. C. (2017). Paper reinforcing by in situ growth of bacterial cellulose. *Journal of Materials Science*, 52, 5882-5893. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-0824-0>
- Santos, S. M., Carbajo, J. M., Gómez, N., Quintana, E., Ladero, M., Sánchez, A., ... & Villar, J. C. (2016). Use of bacterial cellulose in degraded paper restoration. Part II: application on real samples. *Journal of materials science*, 51, 1553-1561. <https://doi.org/10.1007/s10853-015-9477-z>

### **Valorización de residuos de alimentos**

- Chua, G. K., Mahadi, N. I. F., & Tan, F. H. Y. (2021). Bacterial cellulose production from agro-industrial and food wastes. *Bio-valorization of Waste: Trends and Perspectives*, 169-186. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-9696-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9696-4_7)
- Provin, A. P., & de Aguiar Dutra, A. R. (2021). Circular economy for fashion industry: Use of waste from the food industry for the production of biotextiles. *Technological Forecasting and Social Change*, 169, 120858. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120858>

### Glosario

- **Amigable con el medio ambiente:** que no es peligroso ni dañino para el medio ambiente, o que intenta ayudar al mismo.
- **Arquitectura viva:** están formadas por células integradas en matrices autorregenerativas, ya sean propias o sustentadas en andamiajes artificiales.
- **Biocompatibilidad:** Habilidad para estar en contacto con un Sistema vivo sin causar ningún efecto adverso.
- **Biodiversidad:** la variedad de animales, plantas, hongos e incluso microorganismos como bacterias que viven en un habitat natural.
- **Biofilm:** una comunidad de microorganismos inmovilizados en una superficie inerte o en una matriz producida por ellos mismos.
- **Biología sintética:** Es un campo multidisciplinar que se centra en sistemas y organismos vivos, y que aplica principios de ingeniería para desarrollar nuevas partes biológicas, dispositivos y sistemas o para rediseñar sistemas que actualmente se encuentran en la naturaleza.
- **Biomasa:** material orgánico renovable que viene de plantas y animales.
- **Biomedicina:** es una rama de la medicina que aplica principios biológicos y fisiológicos a la práctica clínica.
- **Cambio climático:** El cambio climático hace referencia a las variaciones a largo plazo en la temperatura, los patrones de precipitación y otras condiciones atmosféricas de la Tierra. Aunque estos cambios pueden producirse de forma natural —por ejemplo, debido a erupciones volcánicas o fluctuaciones en la radiación solar—, en las últimas décadas han sido las actividades humanas las que han acelerado significativamente este proceso. La quema de combustibles fósiles, la deforestación y las emisiones industriales son algunos de los principales factores responsables de este ritmo de cambio sin precedentes. Esta transformación rápida del clima afecta a los ecosistemas, al nivel del mar, a los patrones meteorológicos y a la biodiversidad. Entre sus consecuencias más visibles se encuentran el aumento de fenómenos meteorológicos extremos, el ascenso de las temperaturas globales y la alteración de hábitats naturales, poniendo en riesgo el equilibrio del planeta.
- **Celulosa:** un polisacárido formado por cadenas lineales de varios cientos o miles de unidades de D-glucosa unidas mediante enlaces  $\beta(1\rightarrow4)$ . La celulosa es un componente estructural fundamental de la pared celular primaria en las plantas verdes, así como en muchas algas, los oomicetos y algunas especies de bacterias, que la secretan para formar biopelículas. Es el polímero orgánico más abundante en la Tierra.
- **Copolímero:** es un polímero derivado de más de un tipo de monómero.
- **Deforestación:** Es la eliminación y destrucción de un bosque o conjunto de árboles en un terreno que posteriormente se destina a un uso no forestal.
- **Economía circular:** Es un modelo de producción y consumo que se basa en compartir, alquilar, reutilizar, reparar, reacondicionar y reciclar materiales y productos existentes durante el mayor tiempo posible.
- **Electrónica flexible:** También conocida como circuitería flexible, es una tecnología que permite ensamblar circuitos electrónicos mediante la colocación de componentes sobre sustratos plásticos flexibles, como poliimida, PEEK o películas de poliéster conductoras transparentes.
- **Envejecimiento (papel):** El envejecimiento del papel hace referencia al deterioro químico y físico gradual que este sufre con el paso del tiempo. Este proceso está influenciado por diversos factores, como la composición del propio papel, las condiciones ambientales (luz, humedad, temperatura) y la exposición a contaminantes. Como resultado del envejecimiento, el papel suele

## Un marco educativo centrado en el alumnado para la enseñanza de la microbiología

presentar signos visibles como amarilleamiento, fragilidad y pérdida de intensidad en los textos impresos o manuscritos.

- **Enzima:** Es una proteína producida por un organismo vivo que actúa como catalizador para acelerar o facilitar una reacción bioquímica específica.
- **Exudado:** Es un líquido que se filtra desde los vasos sanguíneos hacia los tejidos cercanos. Está compuesto por células, proteínas y materiales sólidos. El exudado puede salir de cortes, heridas o zonas afectadas por infecciones o inflamación. También se le conoce comúnmente como pus.
- **Fibrillas (celulosa):** una cadena lineal de glucosa unida covalentemente.
- **Flexibilidad:** Se refiere a la capacidad de un material para deformarse sin sufrir daños ni cambios permanentes cuando se le aplica una fuerza externa..
- **Hemicelulosa:** Las hemicelulosas son un grupo de polisacáridos complejos presentes en las paredes celulares de las plantas, donde actúan junto con la celulosa y la lignina para aportar estructura y soporte. A diferencia de la celulosa, que está formada por largas cadenas lineales de moléculas de glucosa, las hemicelulosas son más cortas, ramificadas y están compuestas, además de por glucosa, por distintos tipos de azúcares, como xilosa, manosa y arabinosa. Son más fáciles de descomponer que la celulosa y desempeñan un papel clave en la flexibilidad y la resistencia de los tejidos vegetales.
- **Herramientas basadas en CRISPR:** Son tecnologías de ingeniería genética que utilizan el sistema CRISPR (Repeticiones Palindrómicas Cortas Agrupadas y Regularmente Interespaciadas) para editar, modificar o regular con precisión el ADN en organismos vivos. Originalmente descubierto como un mecanismo de defensa natural en bacterias, el sistema CRISPR permite cortar y modificar secuencias específicas de genes de forma dirigida. Mediante enzimas especializadas, como Cas9, que son guiadas hacia ubicaciones concretas del ADN, esta herramienta permite a los científicos añadir, eliminar o alterar material genético con un alto grado de precisión.
- **Hidrolizado:** El término hidrolizado hace referencia a cualquier producto resultante de un proceso de hidrólisis. En el caso específico del hidrolizado de proteínas, su uso es especialmente relevante en medicina deportiva, ya que permite una absorción más rápida de los aminoácidos por parte del organismo en comparación con las proteínas intactas, lo que optimiza el aporte de nutrientes a los tejidos musculares. Además, en la industria biotecnológica, los hidrolizados se utilizan como suplemento en cultivos celulares, favoreciendo el crecimiento y mantenimiento de las células.
- **Kit de ADN molecular:** Es un conjunto de secuencias de ADN estandarizadas e intercambiables, junto con herramientas moleculares, diseñadas para facilitar la ingeniería genética y la biología sintética. Cada módulo, o "pieza" de ADN, cumple una función específica, como activar la expresión de genes, regular la producción de proteínas o marcar moléculas. Estos módulos pueden combinarse de múltiples formas para construir nuevas rutas biológicas o modificar las ya existentes.
- **Kombucha:** es una bebida obtenida mediante la fermentación de té endulzado con una colonia de levaduras y bacterias.
- **Lignina:** Es un polímero orgánico complejo presente en las paredes celulares de las plantas, especialmente en la madera y la corteza, donde aporta rigidez, resistencia y protección frente a la descomposición. La lignina se une a la celulosa y a las hemicelulosas para formar una estructura sólida y protectora, que permite a las plantas mantenerse erguidas y facilitar el transporte eficiente de agua. Además, se caracteriza por ser altamente resistente a la degradación.
- **Materiales auto-sensibles:** Son materiales avanzados capaces de detectar y responder a cambios en su entorno mediante el monitoreo de su propio estado, como el estrés, la

deformación, la temperatura o posibles daños. Estos materiales cuentan con capacidades de detección integradas, a menudo a través de sensores incorporados o componentes conductores, lo que les permite proporcionar información en tiempo real sobre su integridad estructural.

- **Polímero cristalino:** un polímero con alineación parcial de sus cadenas moleculares.
- **Quitina:** Es el segundo polisacárido más abundante en la naturaleza, solo por detrás de la celulosa. Constituye un componente principal de las paredes celulares de los hongos (especialmente los filamentosos y los formadores de setas), así como del exoesqueleto de artrópodos como los crustáceos y los insectos. También está presente en estructuras como las rádulas, los picos y las plumas internas (gladius) de los moluscos cefalópodos, y en algunos nematodos y diatomeas.
- **Regeneración de la piel:** Es el proceso natural mediante el cual el cuerpo repara y regenera el tejido cutáneo dañado o perdido, generalmente como resultado de una lesión, una quemadura o una intervención quirúrgica. Este mecanismo implica la activación de diversas células de la piel, como queratinocitos, fibroblastos y células madre, que se encargan de producir nuevas células, colágeno y otros componentes estructurales necesarios para restaurar la integridad y funcionalidad de la piel.
- **Residuos agro-industriales:** los residuos agroindustriales son subproductos o materiales de desecho generados durante el procesamiento de cultivos, plantas o productos de origen animal en distintas industrias. Estos residuos incluyen materiales orgánicos como cáscaras, pieles, tallos, bagazo y estiércol, que quedan una vez se han extraído o procesado los productos principales.
- **Resistencia a la tracción:** Es la máxima tensión que un material puede soportar al ser estirado o traccionado antes de romperse.
- **Sintasa:** Es una enzima que cataliza la formación de enlaces químicos para generar nuevas moléculas, a menudo sin necesidad de un aporte de energía en forma de ATP.
- **Soporte biomédico:** Un andamiaje (o scaffold) que actúa como una plantilla estructural que permite la adhesión celular y la formación de tejidos. Está diseñado para definir la forma, el tamaño y las propiedades estructurales del tejido en desarrollo.