

# Capítulo 6

---

## **Nanomateriales de celulosa obtenidos a partir de residuos agroindustriales y agroalimentarios de origen colombiano: un mundo de posibilidades**

*Robin Zuluaga<sup>1</sup>*

*Jorge Velásquez-Cock<sup>2</sup>*

*Catalina Gómez-Hoyos<sup>2</sup>*

*Marlon Osorio<sup>2</sup>*

*Carlos Molina-Ramírez<sup>3</sup>*

*Carlos Correa-Hernández<sup>4</sup>*

*Angélica Serpa<sup>1</sup>*

*Lina Vélez-Acosta<sup>1</sup>*

*Ricardo Santana<sup>4</sup>*

*Luis Carcamo<sup>4</sup>*

*Samuel Sierra<sup>4</sup>*

*Daniel Marín<sup>5</sup>*

*Daniel Builes<sup>6</sup>*

*Cristina Castro<sup>2</sup>*

*Piedad Gañán<sup>6</sup>*

<https://doi.org/10.61728/AE20246075>

---

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Agroindustrial; Universidad Pontificia Bolivariana; Medellín, Colombia.

<sup>2</sup> Facultad de Ingeniería Textil; Universidad Pontificia Bolivariana; Medellín, Colombia.

<sup>3</sup> Grupo Química y Bioprospección de Productos Naturales, Universidad del Magdalena; Santa Marta, Colombia.

<sup>4</sup> Grupo de Investigación en Nuevos Materiales; Universidad Pontificia Bolivariana; Medellín, Colombia.

<sup>5</sup> Andercol-Akzonobel; Medellín, Colombia.

<sup>6</sup> Facultad de Ingeniería Química; Universidad Pontificia Bolivariana; Medellín, Colombia.

## Resumen

La celulosa es una de las sustancias orgánicas más abundantes en la naturaleza y ha estado presente a lo largo de los siglos como componente de una infinidad de productos que van desde medicamentos hasta los más refinados papeles empleados por industrias que fabrican baterías o componentes electrónicos. Gracias a los avances en ciencia y tecnología, y con el especial impulso suministrado por la nanotecnología, en las últimas dos décadas se vienen llevando a cabo una amplia gama de estudios orientados hacia nuevas aplicaciones. Algunas de ellas abarcan campos tan disímiles como el ligado a la incorporación en matrices alimentarias, la elaboración de dispositivos biomédicos, la creación de soportes para el crecimiento de tejidos, el desarrollo de materiales que faciliten la remoción de contaminantes en aguas o suelos o la fabricación de nanocomposites. Esto supone que a medida que se incrementen los productos que incorporan nanomateriales de celulosa será preciso contar con suficientes suministros de materias primas de las cuales puedan ser obtenidos. En este sentido, los residuos agroindustriales y agroalimentarios ofrecen diferentes ventajas competitivas, como su bajo o casi nulo costo o su alto volumen, lo que supone que pueden ser considerados como fuentes alternativas para suplir este mercado en crecimiento. A su vez, su uso permite cerrar ciclos productivos al brindar nuevas vías de reciclaje para muchos de ellos, que debido a la cantidad excesiva en que son producidos anualmente y a las dificultades que existen en muchas zonas del mundo para su correcta disposición, vienen generando múltiples dificultades a nivel ambiental y social. Por lo anterior, en capítulo se comentan algunos aspectos sobre la obtención o aislamiento de nanomateriales de celulosa derivados de residuos agroindustriales y agroalimentarios generados por algunas industrias colombianas y se presentan algunos avances relacionados con su incorporación en diferentes sistemas, procurando que los beneficios de la celulosa efectivamente puedan verse reflejados en ellos, aprovechando así sus ventajas competitivas en clave de sostenibilidad.

## Introducción

La celulosa es reconocida como el tipo de polímero natural con mayor disponibilidad en la tierra al ser viable de obtener a partir de las más diversas fuentes renovables. Como se aprecia en la Figura 1, es posible extraerla o aislarla de todo tipo de cuerpos vegetales, ya que es un componente estructural de sus paredes celulares. En este caso se suele denominar como celulosa vegetal (CV). También está presente en las paredes de las células de algunos animales marinos como los tunicados o incluso en las de algunos tipos de algas. Múltiples tipos de microorganismos la generan como producto de sus actividades extracelulares. Los más conocidos y empleados actualmente corresponden a bacterias, razón por la cual suele conocerse como celulosa bacteriana (CB).

Para los escenarios latinoamericanos los tipos de fuentes más comunes y empleados hasta ahora, tanto en las investigaciones de carácter tanto científico como técnico, corresponden a los tipos de celulosa vegetal (CV) y bacteriana (CB). Esta situación está motivada principalmente por la disponibilidad de recursos vegetales, en especial la oportunidad que representan los residuos agroindustriales y agroalimentarios. En el caso de la CB se han venido realizando estudios en diferentes lugares, como en el caso de Colombia, que han permitido aislar cepas nativas, situación beneficiosa pues a la par que se reducen los costos ligados a la adquisición de una cepa específica permiten el aprovechamiento de las variedades locales (Castro et al., 2011).

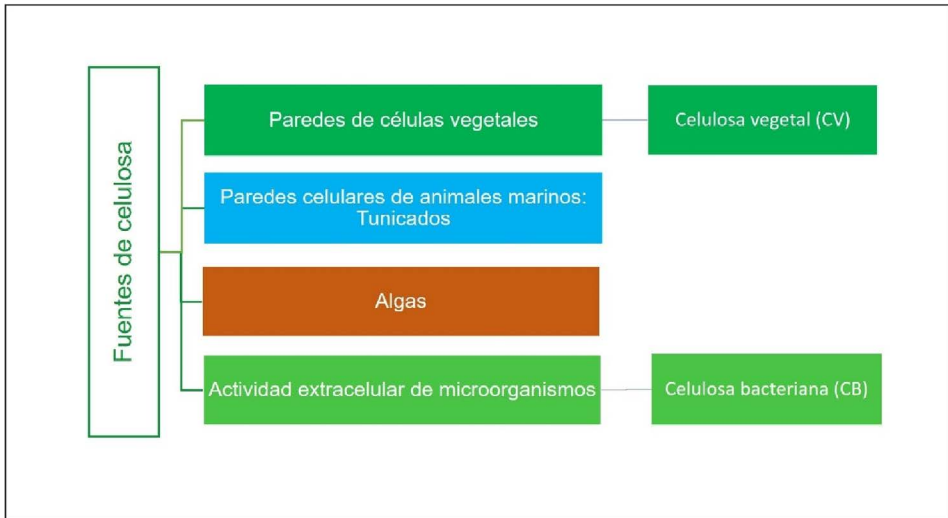


Figura 1. Fuentes de celulosa

Fuente: Elaboración propia.

Gracias a las ampliamente documentadas ventajas de la nanocelulosa y que incluyen además de su disponibilidad, sus propiedades mecánicas, térmicas y baja densidad, se suma las posibilidades de su incorporación en diferentes tipos de productos. Esto ha supuesto en los últimos años un significativo incremento de su consumo a nivel mundial, tal como indican las cifras de su mercado global en el año 2019 y que ascendió a USD 291,53 millones. Se espera que esta tendencia de consumo continúe creciendo en los próximos años, a tal punto que se espera que para el año 2027 se alcancen cifras del orden de USD 1 053,09 millones (Nanocellulose Market Size, 2021). Esto implica entonces la necesidad de contar tanto con empresas que se encuentren en capacidad de suministrar nanocelulosa a costos competitivos como con contar con suficientes fuentes de materias primas para su obtención y que a su vez no compitan con otros sectores como serían los ligados con la producción de alimentos y madera; o que representen potenciales daños ambientales derivados por aumentos en la deforestación, pues hasta ahora, son diferentes tipos de maderas las principales fuentes de las que se obtiene celulosa vegetal.

En este contexto, los residuos agroindustriales y los derivados de la producción de alimentos se vienen consolidando como esas fuentes alter-

nativas de las cuales sea posible obtener los nanomateriales de celulosa. Dentro de las ventajas que ofrecen se encuentra su ínfimo o nulo costo, pues en la mayoría de los casos son desechados generando a su vez problemas ambientales y sociales. Otra ventaja que suponen es el enorme volumen que tienen hoy en día. En el caso específico de los residuos agroalimentarios, por ejemplo, anualmente se pierde en el mundo el 40 % de los alimentos cultivados, bien sea porque no se consumieron, experimentaron daños durante su transporte, almacenamiento o venta minorista. Este volumen de desperdicios para el año 2020 fue del orden 2500 millones de toneladas (WWF, 2023). En el mundo se desperdician mil millones de toneladas de alimentos más de lo que se estimaba (WWF, 2023) y se espera que continúe incrementando en los próximos años.

Como se aprecia en la Figura 2, la viabilidad de emplear tanto los residuos agroindustriales como los agroalimentarios como fuentes de materias primas para obtener nanomateriales de celulosa se ha estudiado de forma continua y creciente en los últimos. Allí se resumen el comportamiento de 202 textos científicos identificados en la base de datos Scopus y disponibles para su consulta desde el año 1965 hasta junio del 2022 encontrados empleando esta ecuación de búsqueda: *cellulose and (isol\* or product\*) and nano\* and (wast\* or res\*) and (agro\*)*. Como se registra en la Figura 3, algo más del 70 % de los documentos han sido publicado entre el año 2018 y junio del 2022, denotando el grado de actualidad del tema. Un aspecto a resaltar de estas publicaciones tiene que ver con el que el 36n% de ellas corresponde a autores latinoamericanos, lo que sugiere tanto el creciente interés como el incremento del nivel tecnológico en temas de nanotecnología por parte de los investigadores de esta región.

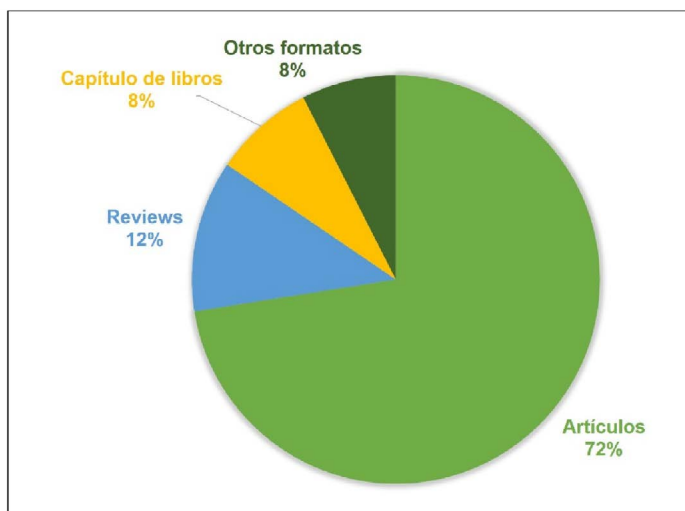


Figura 2. Tipos de documentos producidos entre 1965 – junio 2022 relacionados con nanocelulosa procedente de residuos agroindustriales que se encuentran en la base de datos Scopus  
Fuente: Elaboración propia.

Este interés por el uso de nanocelulosa a partir de residuos agroindustriales también se aprecia en el comportamiento de las patentes concedidas entre el año 1962 y junio de 2022 y que se pueden ubicar en la base de datos Scopus empleando la misma ecuación de búsqueda indicada anteriormente y que ascienden a 18 187. Como se puede observar en la distribución que se presenta en la Figura 4, más del 30 % de ellas se corresponden al periodo entre el año 2018 y junio del 2022, mostrando de nuevo la vigencia del tema. Por otro lado, más del 70 % de ellas han sido otorgadas por United States Patent & Trademark Office de los Estados Unidos, lo que supone el reto de continuar incentivando el trabajo por el registro de solicitudes de patentes por parte de los investigadores hispanoamericanos.

Lo expuesto antes supone entonces, que efectivamente el aprovechamiento de los residuos agroindustriales y agroalimentarios se consolidan como un tema de interés tanto a nivel científico como tecnológico en hispanoamericana y que en la medida en que se generen más productos y será posible incrementar el trabajo a nivel de escalado y prototipado con miras a alcanzar la producción industrial con la respectiva comercialización, para que a su vez, puedan impactar en clave de sostenibilidad a nivel ambiental, económico y social múltiples comunidades.

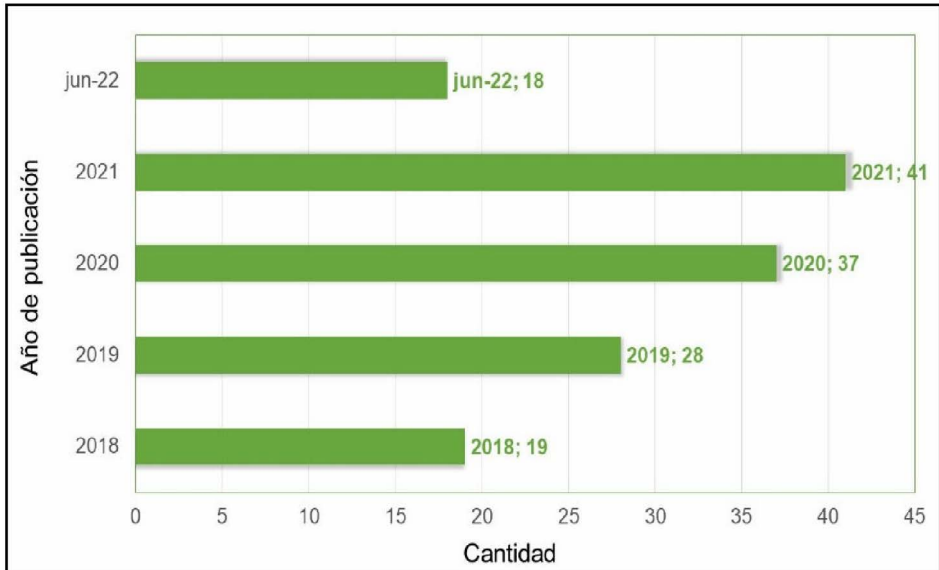


Figura 3. Relación de documentos producidos entre 2018 y junio 2022 relacionados con nanocelulosa procedente de residuos agroindustriales que se encuentran en la base de datos Scopus  
Fuente: Elaboración propia.

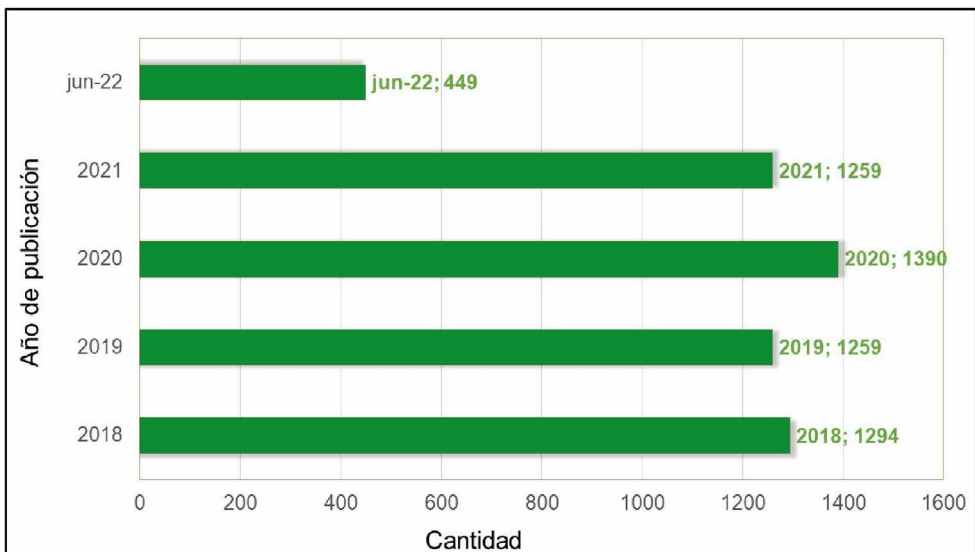


Figura 4. Relación de patentes concedidas entre 2018 y junio 2022 relacionados con nanocelulosa procedente de residuos agroindustriales que se encuentran en la base de datos Scopus  
Fuente: Elaboración propia.

En este capítulo se comentan algunas de las alternativas para obtener nanomateriales de celulosa desde residuos agroindustriales y agroalimentarios generados por empresas colombianas y se comentan tanto algunos desarrollos en productos como los retos que supone su producción para los entornos latinoamericanos. Pero previamente es necesario considerar que en función no solo del tipo de fuente empleada para la obtención de la celulosa, sino de acuerdo con los procesos seleccionados es posible contar con una gama de nanomateriales de celulosa. En este sentido, desde los primeros trabajos de los años sesenta, se han venido empleando una diversidad de términos, sin embargo, se ha tornado cada vez más necesario crear una armonización entre ellos que permita beneficiar los procesos de comunicación entre sectores diversos, y que a su vez contribuyan de forma más eficiente tanto con los intercambios científicos como los comerciales. Así que, en este sentido, también en este texto se incluye un apartado sobre este particular.

### **Nanomateriales de nanocelulosa**

Como se indicaba previamente en el apartado de introducción, dentro de los retos que se han venido abordado en torno al tema de la nanocelulosa, se encuentra la diversidad de conceptos que se han creado y empleado a lo largo de décadas, y que pueden generar dificultades al momento tanto de rastrear la información como de generar consensos entre las comunidades técnicas, científicas y los equipos de I+D+i de las entidades encargadas de generar, producir o comercializar nuevos productos. En este sentido, dentro de las iniciativas que han permitido una clara consolidación de términos se encuentra la norma ISO/TS 20477:2017 Nanotechnologies — Standard terms and their definition for cellulose nanomaterial (ISO, 2017) en la que es posible encontrar consolidado de una forma eficiente muchas de las variantes más comunes de nombres ligados a la celulosa en escala nanométrica o nanocelulosa que se han empleado hasta ahora. En la Figura 5 se presenta un resumen de sus principales aspectos de acuerdo con los cuales, los nanomateriales de celulosa se pueden agrupar en dos categorías principales que incluyen los denominados nanomateriales y los materiales nanoestructurados. Los nanomateriales de celulosa corresponden a aque-



llas presentaciones en las cuales al menos una de las dimensiones externas de las muestras que contienen celulosa y se encuentran en la nanoescala, esto es entre 1 y 100 nm (ISO, 2015). En el caso de los materiales nanoestructurados corresponden a cualquier material que tiene una nanoestructura interna o una superficie nanoestructurada (ISO, 2015).

Además, tal como se aprecia en la Figura 5, la diversidad de términos empleados hasta ahora tanto en la literatura científica como tecnológica para los nanoobjetos de celulosa se puede agrupar en dos categorías principales que corresponden a nanofibrillas (CNF) y nanocristales (CNC).

Como se indicaba antes, el tipo de fuente empleada para la obtención de los nanoobjetos de celulosa como los procesos empleados tienen una influencia significativa en la estructura y por ende en las propiedades que exhiben y que pueden aportar a los productos en los cuales puedan ser incluidos. Cuando se emplean residuos agroindustriales, el principal tipo de celulosa que se desea aislar corresponde a CV. Para tal fin es posible emplear una amplia gama de cuerpos vegetales que pueden incluir desechos de tallos, hojas, raíces, cáscaras o frutos deteriorados en campo debido a condiciones ambientales o problemas en la producción agrícola.

En el caso de emplear residuos agroalimentarios estos suelen ser más utilizados como sustratos para los microorganismos, que gracias a su actividad extracelular producen los nanoobjetos de CB.

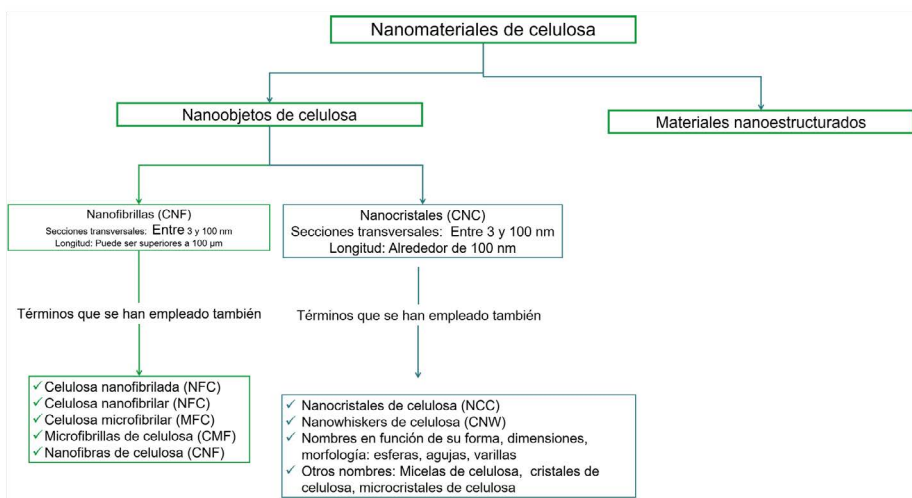


Figura 5. Nanomateriales de celulosa basado en la norma ISO/TS 20477:2017

Fuente: Elaboración propia.

## **Aislamiento de nanoobjetos de celulosa vegetal a partir de residuos agroindustriales**

Cuando se emplean residuos agroindustriales para obtener los nanomateriales de celulosa tipo vegetal es posible emplear una amplia gama de estrategias que a su vez se pueden enmarcar en los conocidos como procesos tipo *top-down*, pues se parten de cuerpos vegetales de múltiples tamaños en la macroescala y mediante la combinación de operaciones diversas tanto químico como mecánico o físico se logra alcanzar el rango nanométrico.

Las estrategias implementadas en este tipo de procesos *top-down* se pueden ajustar en función del tipo de planta de la que se parte y la respectiva porción del cuerpo vegetal. Esto a su vez se traduce en definir o tener presente el tipo de composición química en cuanto a cantidad de celulosa inicial y los componentes no celulósicos en las muestras de partida. Además, dichos procesos también se pueden amoldar o variar en función del tipo de nanomaterial de celulosa que se desea obtener, toda vez que pueden cambiar tanto en su estructura química como además de su forma y tamaño.

En estos procesos *top-down*, tal como se esquematiza en la Figura 6 es posible combinar tanto acciones químicas como enzimática, térmicas o mecánicas. En muchas ocasiones se realizan de forma sucesiva o repitiendo algunas etapas, y con todas ellas se buscan esencialmente dos objetivos que son: la reducción de los componentes no celulósicos y la respectiva disminución en el tamaño de las muestras de celulosa que permitan alcanzar el rango nanométrico. Durante estas operaciones es importante considerar tanto las variaciones que se pueden presentar en la relación de aspecto de los nanoobjetos obtenidos en cada una de las fases, así como las potenciales variaciones que experimenta la cristalinidad.

En la Figura 7 se incluyen, a modo de ejemplo, imágenes realizadas mediante microscopía de fuerza atómica (AFM) de nanofibrillas de celulosa obtenidas de dos tipos de residuos agroindustriales diferentes y que corresponde a las obtenidas de capacho de maíz (Figura 7a) y raquis de banano (Figura 7b). En ambos casos se emplearon sucesivas etapas de tratamientos químicos empleando KOH al 5 % finalizando con acciones mecánicas empleando equipos tipo molino ultra fino.

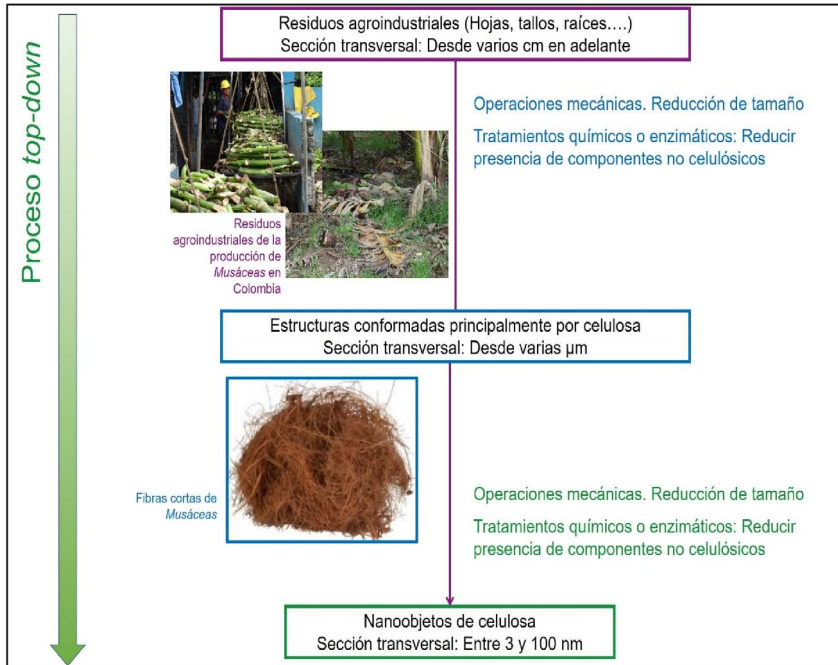


Figura 6. Aislamiento de nanoobjetos de celulosa desde residuos agroindustriales  
Fuente: Elaboración propia.

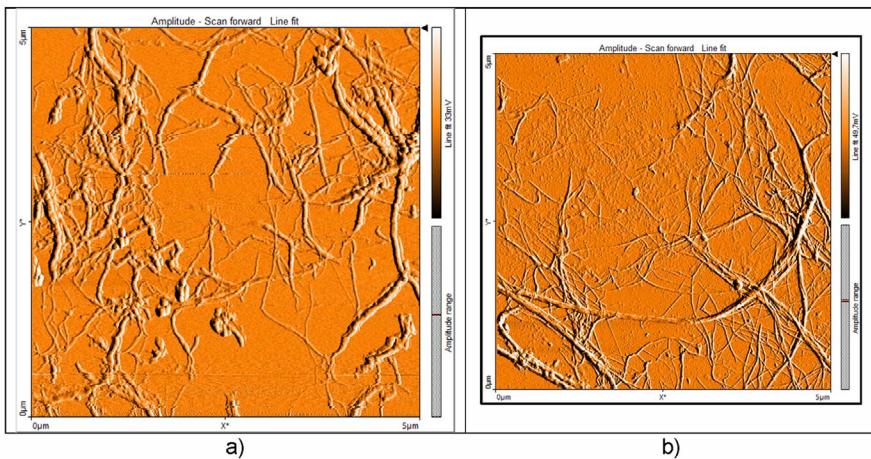


Figura 7. Imágenes de AFM (señal amplitud) de nanofibrillas aisladas de diferentes tipos de residuos procedentes de a) capacho de maíz; b) raquis de banano  
Fuente: Elaboración propia.

## Producción de nanomateriales de celulosa empleando residuos agroalimentarios

En el caso de los residuos agroalimentarios, tal como se indicó antes, pueden ser empleados como sustratos durante la producción de nanomateriales de celulosa tipo bacteriano y que se derivan de la actividad extracelular de múltiples tipos de microorganismos. Tal como se aprecia en el esquema de la Figura 8, estos pueden ser considerados desde una perspectiva tipo bottom-up. De acuerdo con ello, los microorganismos toman los nutrientes del sustrato y gracias a sus procesos metabólicos generan las nanofibrillas de celulosa, conocidas también como nanocintas, que son extruidas hacia el medio líquido. Una vez fuera de la célula y bajo condiciones de cultivo estáticas, se ensamblan formando una membrana con un espesor de varios milímetros y que se ubica en la superficie del medio de cultivo, en la zona de la interfase líquido/aire. Estas membranas se pueden remover o cosechar entre 8 y 20 días tras el inicio de la fermentación.

Las membranas cosechadas se suelen someter a diferentes procesos de limpieza que buscan remover la presencia de los microorganismos y los residuos del cultivo. Dependiendo de la aplicación se puede emplear como tal o implementar, como se aprecia en la Figura 8, o pueden ser sometidas a operaciones mecánicas que permiten romperla y liberar las nanocintas, y disponer de estos nuevos nanoobjetos.

Cuando se emplean modos de fermentación agitados, las membranas no se alcanzan a consolidar y las nanocintas de celulosa se encuentran dispersas en el medio de cultivo. Esto implica también especial atención a los procesos de purificación requeridos tanto para remover el medio de cultivo como la presencia de los microorganismos.

Existe una amplia gama de microorganismos que producen nanocelulosa, entre ellas se encuentran las bacterias del tipo gram negativas del género *Komagataeibacter* como la *K. medellinensis*, cepa nativa aislada en Colombia y que trabajan bajo condiciones aerobias y con capacidad de soportar pH en niveles entre 3 y 7, lo que permite emplear residuos agroalimentarios, incluidos aquellos que no se encuentran en condiciones aptas para el consumo humano (Molina-Ramírez et al., 2017).

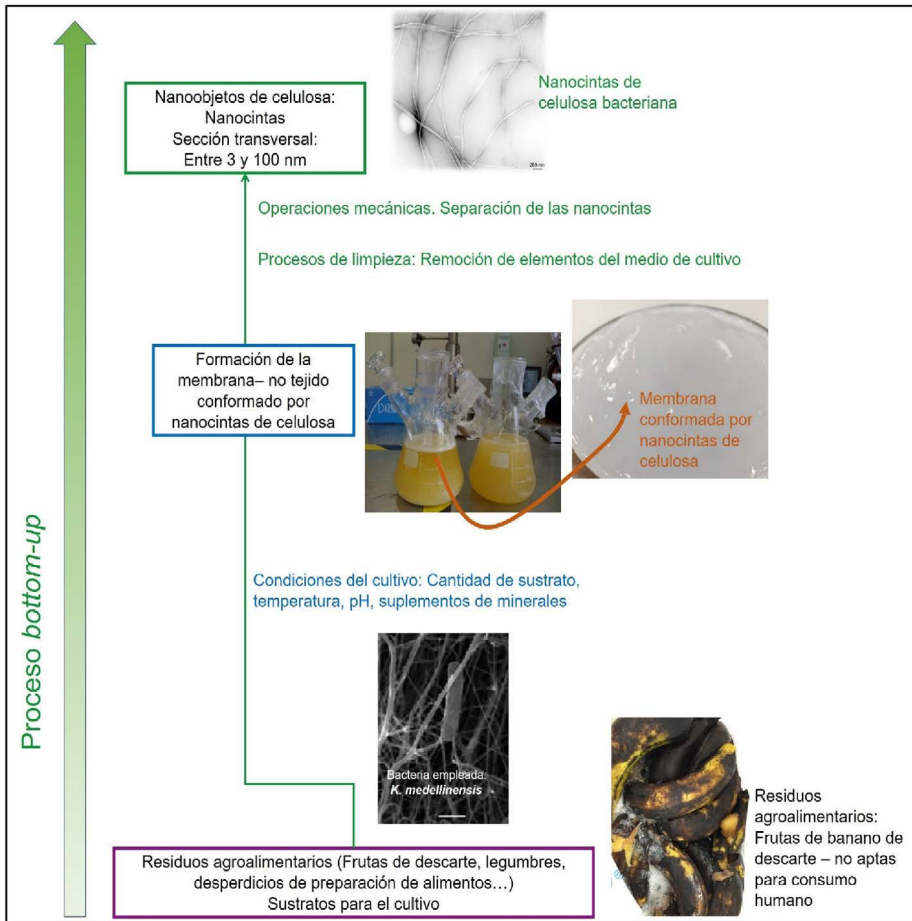


Figura 8. Producción de nanoobjetos de celulosa bacteriana empleando residuos agroindustriales bajo modo de fermentación estática

Fuente: Elaboración propia.

Los residuos agroalimentarios como sustratos para la producción de nanocelulosa bacteriana suministran diversas fuentes de carbono como son la glucosa, la sacarosa y la fructosa (Molina-Ramírez et al., 2017); y en algunas ocasiones también aportan nitrógeno y algunas sales requeridas por los microorganismos. Estos nutrientes condicionan a su vez la formación de las membranas, así como la estructura cristalina y el grado de polimerización que alcanza la celulosa.

Dentro de los principales retos que se tienen actualmente sobre la producción de nanoobjetos de CB se encuentra el escalado, por ello es necesario considerar cuales son las principales variables durante la fermentación, de tal forma que sea posible no solo cumplir con los aspectos viabilidad técnica sino también económica y ambiental. En este sentido, en la Figura 9 se presentan los que deben ser analizadas y evaluados cada vez que se considere un nuevo tipo de materia prima como potencial sustrato para el cultivo.

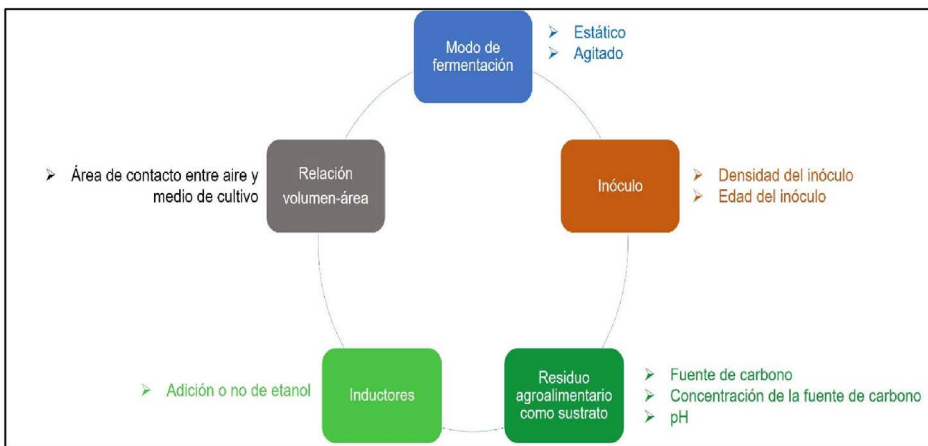


Figura 9. Aspectos que se deben considerar durante la producción de nanoobjetos de celulosa bacteriana a partir de residuos agroalimentarios

Fuente: Elaboración propia.

Para establecer cuál es el modo de fermentación más apropiado, esto es decidir entre emplear el estático o el agitado, se ha documentado por parte de autores como (Krystynowicz et al., 2002) que las bacterias pueden experimentar mutaciones debido a la condición agitada, mientras que para la condición estática, es preciso considerar la importancia que tendrá la interface líquido/aire, pues la formación de la membrana tendrá lugar en la superficie del medio de cultivo, pues es allí en donde los microorganismos tienen mayor acceso al oxígeno (Augimeri et al., 2015). De acuerdo con esto, la instalación para la condición estática puede estar condicionada por el tamaño de los recipientes en los que tendrá lugar la fermentación, mientras que en el agitado será preciso estar atento a los momentos en que sea necesario cambiar el tipo de microorganismos empleados.

Respecto a otros aspectos indicados en la Figura 9, como son la densidad celular, la edad del inóculo y la concentración de la fuente de carbono, estos deben ser considerados debido a los efectos significativos que tienen sobre el rendimiento del cultivo. En el caso del uso o no de los inductores, estas sustancias pueden promover la oxidación parcial de los azúcares y alcoholes, contribuyendo a la producción de ATP (molécula energética) y permitiendo que el consumo de las fuentes de carbono disponibles en el medio sea orientado hacia la producción de las nanocintas de celulosa y no hacia otras actividades metabólicas. En este sentido, una de las sustancias más empleadas para este fin corresponde al etanol y algunos estudios (Rani y Appaiah, 2011) reportan que, tras su adición, en el cultivo se presentaron rendimientos en la producción de la CB de cerca de un 400 % comparados con los cultivos en los cuales no fue adicionado.

Otro aspecto clave con miras al escalado (ver Figura 9) tiene que ver con la relación volumen-área, debido a que, en las etapas iniciales de la producción de las nanocintas, el oxígeno es el reactivo límite, máxime cuando solo se encuentra en el medio de cultivo hasta 0,1 mm de la superficie. Así que, en los modos de fermentación estáticos, los más viables de implementar en debido a sus menores costos y versatilidad, a medida que se forma la membrana se reduce la presencia del oxígeno en el medio y se ralentiza la producción (Hornung et al., 2006; Verschuren et al., 2000). Este parámetro es importante evaluarlo tanto desde el punto de vista de producción y rendimiento del cultivo como desde las consideraciones de espacio físico y costos de producción y mantenimiento de la instalación.

### **Aplicaciones de los nanomateriales de celulosa**

Gracias entonces a la cada vez mayor disponibilidad de contar con nanoobjetos o nanomateriales de celulosa que son viables de obtener desde una amplia oferta de residuos agroindustriales y agroalimentarios, además de las variadas estrategias de uso, ha crecido en los últimos años los estudios relacionados con la elaboración de prototipos de productos en los cuales son posibles de incorporar, donde se busca aprovechar sus diversas ventajas como su densidad, su desempeño mecánico, óptico, térmico y reológico. Sumado a lo anterior, este mayor uso de los nanomateriales de

celulosa también es importante para incrementar la presencia de carbono biobasado y con ello anclarse en las diferentes estrategias que a nivel mundial se vienen liderando en torno al desarrollo de materiales que sean más amigables con el ambiente (Zuluaga et al., 2019).

De la amplia gama en la cual los nanomateriales de celulosa se pueden emplear, Figura 10 se presentan algunos de los principales campos de aplicación en los cuales se vienen realizando promisorios avances en su incorporación.

A continuación, se mencionan algunas de las aproximaciones realizadas empleando nanomateriales de celulosa obtenidos a partir de residuos agroindustriales y agroalimentarios generados por diferentes sectores productores colombianos.

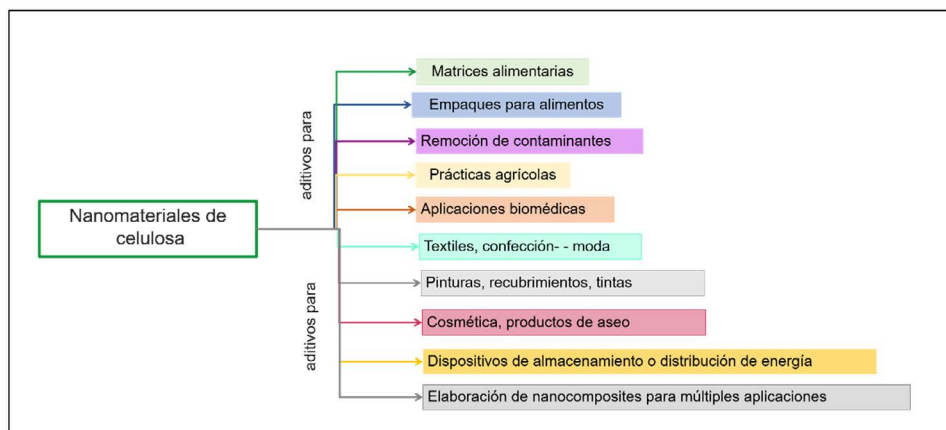


Figura 10. *Aplicaciones de nanomateriales de celulosa*

Fuente: Elaboración propia.

### *Incorporación en matrices alimentarias*

Los nanomateriales de celulosa exhiben una serie de ventajas que permiten su incorporación como estabilizante o ingrediente funcional en un amplio rango de matrices alimentarias. Algunos ejemplos en este sentido se encuentran en la Figura 11, mientras que en las Figuras 12 a 14 se presentan algunos desarrollos llevados a cabo por los grupos Grain y Ginuma



de la UPB-Medellín/Colombia a través de los cuales es posible probar su eficiente incorporación en una variada gama de productos.

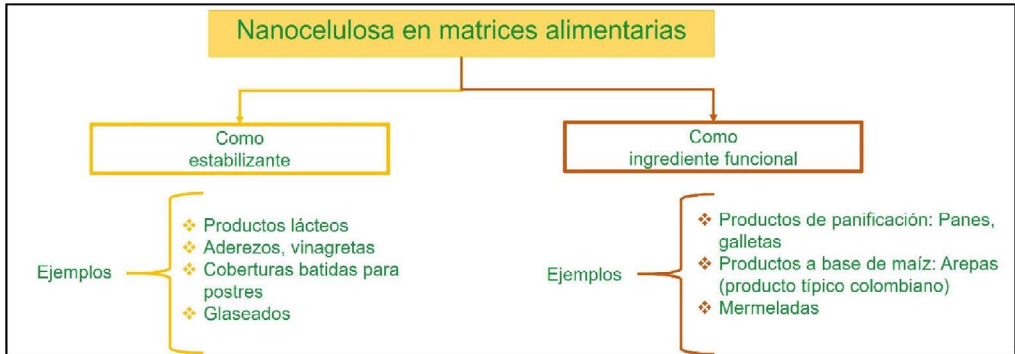


Figura 11. Inclusión de nanocelulosa en matrices alimentarias

Fuente: Elaboración propia.

A lo anterior es posible agregar que la presencia de la nanocelulosa contribuye a reducir la cantidad de grasa presente (Gómez H. et al., 2016); o que suministra posibilidades adicionales como en el caso del desarrollo de productos lácteos que como un helado bajo en grasa (Ver Figura 12a-b) gracias a la adición de nanofibrillas de celulosa aisladas de vástagos de banana es posible incrementar el tiempo que tarda, a temperatura ambiente, en fundirse. En la Figura 12a-b se observa que, a similares periodos de evaluación, las muestras con las nanofibrillas (Figura 12b) tienen mayor consistencia que aquellas en las que no fue adicionado (Figura 12a). La mejora en este aspecto es una parte importante dentro del control de calidad de este tipo de alimentos.

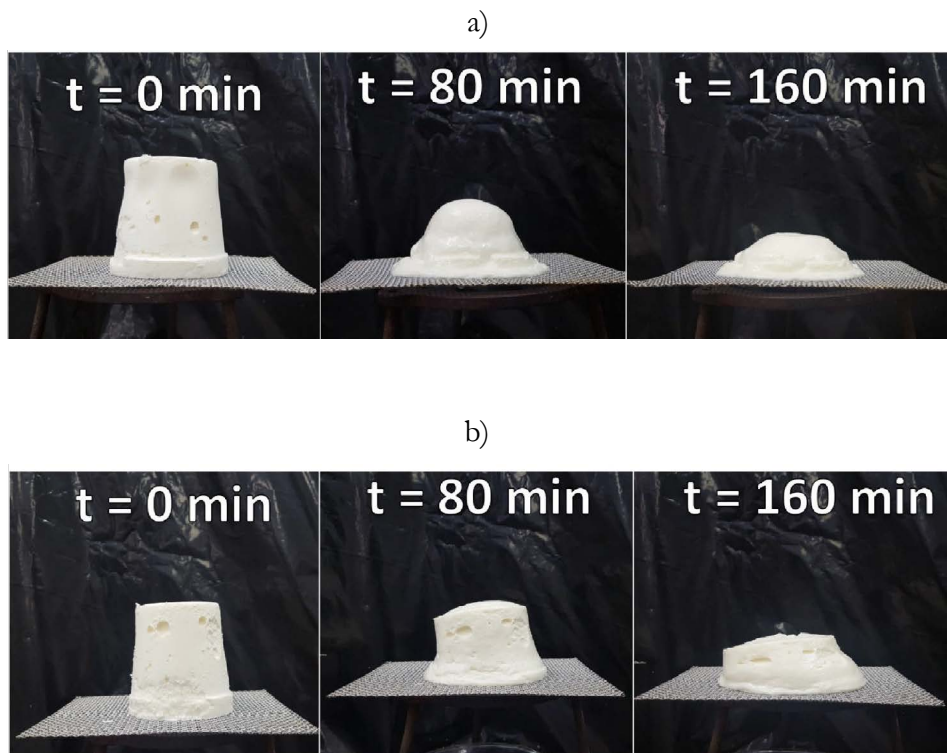


Figura 12. Evaluación del efecto de las nanofibrillas de celulosa aisladas de vástago de celulosa sobre la fusión de un helado bajo en grasa. Temperatura ambiente: 23 °C. a) Muestra sin nanofibrillas de celulosa; b) Muestra con nanofibrillas de celulosa al 0.3 %  
Fuente: Elaboración propia.

Como estabilizantes, los nanomateriales de celulosa han demostrado su eficiencia en la preparación de emulsiones a base de aceites y grasas diversas. Gracias a ello es viable su incorporación en la elaboración de coberturas batidas, coberturas para pastelería, pudines y salsas (Gómez H. et al., 2016). Adicionalmente, mediante la utilización de estos sistemas es posible también dispersar componentes complejos lo que facilita su incorporación en las matrices alimentarias a la par que suministran mayor estabilidad química e inclusión generan la posibilidad de contar también con la liberación controlada de algunas sustancias. En este sentido, en las Figuras 13 y 14 se aprecian ejemplos de dos sistemas diferentes que corresponden a suspensiones de cúrcuma (ver Figura 13) y *pickering* empleando aceite de girasol/

agua (O/W) de licopeno (ver Figura 14), ambas se han podido realizar exitosamente gracias a la presencia de las nanofibras de celulosa.

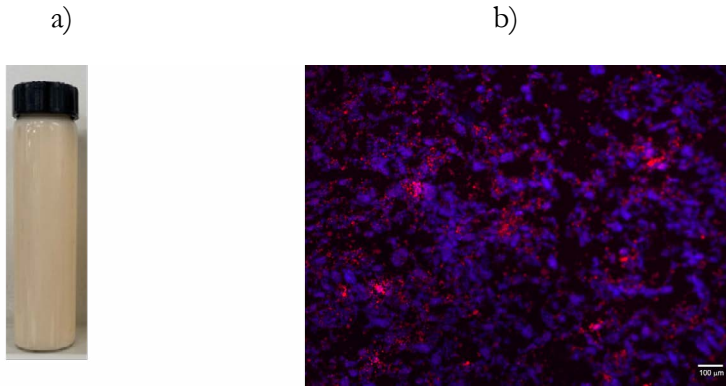


Figura 13. a) Emulsión pickering O/W con fase oleosa de aceite de girasol con licopeno de guayaba y nanofibras de celulosa procedentes de residuos de banano al 0.5 %; b) Imagen realizada por microscopía por fluorescencia: nanofibras en color morado y aceite en color rojo

Fuente: Elaboración propia.

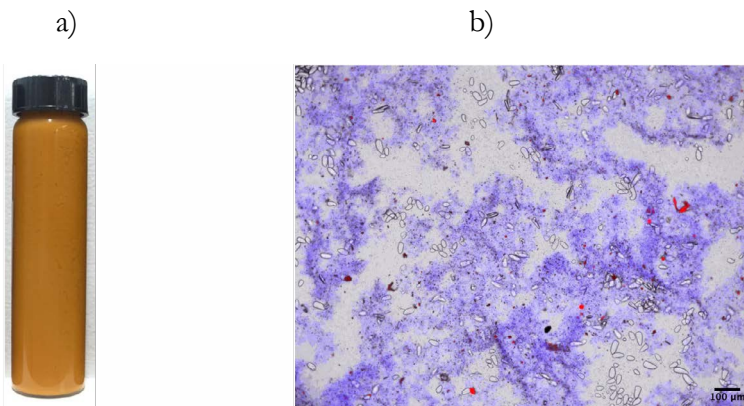


Figura 14. a) Suspensión de *Curcuma Longa* L. con nanofibras de celulosa procedentes de residuos de banano al 0,9 %; b) Imagen realizada por microscopía por fluorescencia: nanofibras en color morado y curcumina en color rojo

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a su uso ingrediente funcional, permiten incrementar la presencia de fibra dietaria, la cual a su vez se ha documentado trae significativos

beneficios para la salud humana entre los que se encuentran la reducción en los riesgos de enfermedades crónicas como la obesidad, diabetes, diverticulitis o padecimientos cardíacos (Gómez H. et al., 2016). De allí los beneficios de considerar incluir la nanocelulosa en productos de panificación u otros alimentos de consumo masivo. Así mismo, gracias a su resistencia térmica, y tal como se aprecia en la Figura 15, es posible emplearla para proteger nutrientes que tienen baja estabilidad térmica y que como el ácido fólico y la riboflavina se podrían descomponer durante los procesos de elaboración de algunos alimentos (Figura 15a-b), como podría ocurrir en el caso de un asado simple como el que requiere, por ejemplo, un tipo producto alimenticio típicamente colombiano a base de masa de maíz como es una arepa.

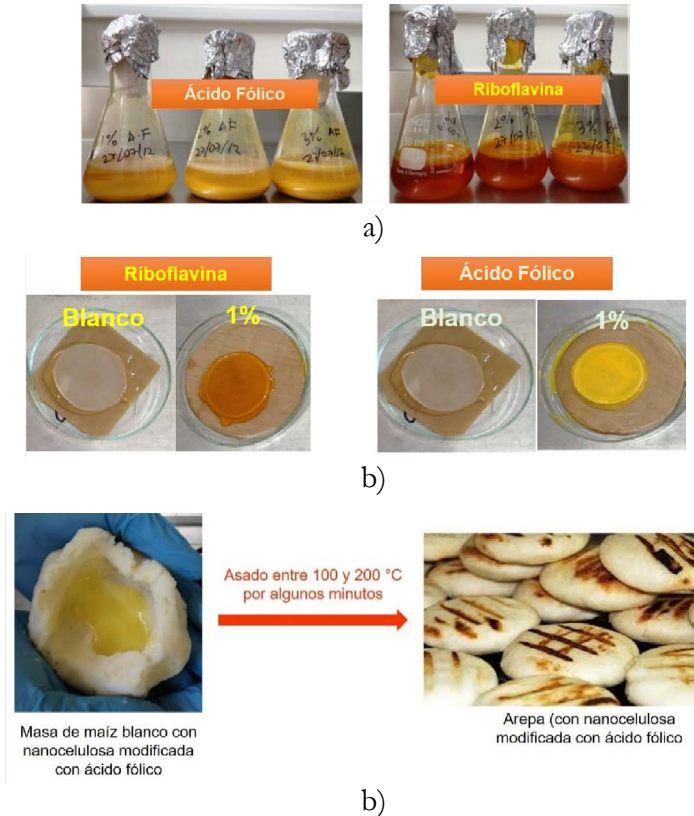


Figura 15. Aplicaciones de la nanocelulosa bacteriana como ingrediente funcional. a) inclusión de algunos nutrientes en las membranas de celulosa bacteriana; b) membranas de celulosa bacterianas con y sin nutrientes; c) elaboración de arepas (producto típico colombiano) con nutrientes  
Fuente: Elaboración propia.

En este desarrollo se aprecia que la nanocelulosa permite convertir un alimento de bajas prestaciones nutricionales en uno fortificado, pues contiene o encapsula estos componentes que tienen ventajas fisiológicas (Gómez H. et al., 2016) y que tal como se evidencia en la Figura 15c es posible incorporarla de forma adecuada sin que experimenten mayores cambios debido al calentamiento que es necesario de realizar. En este caso, la vía más simple para estos procesos es usar las membranas de celulosa bacteriana a las que se ponen en contacto con la sustancia a proteger (Figura 15a), una vez se ha comprobado la inclusión del componente (Figura 15b),

se procede con la elaboración de la masa del producto, en este caso a base de maíz blanco y luego a darle la forma del alimento respectivo y posteriormente pasar al proceso térmico que concluye el proceso de formación del producto (Figura 15c).

### **Empaques para alimentos**

Uno de los campos más activos en el desarrollo de aplicaciones que involucren el uso de nanoobjetos tiene que ver con el desarrollo de empaques, en especial para alimentos. En este sentido, la inclusión de nanomateriales de celulosa es de interés en la medida en que pueda brindar algunas de los atributos que se resumen en la Figura 16.

Para el desarrollo de empaques que incluye nanocelulosa y tal como se aprecia en la Figura 17 es posible tener presente dos tipos de aproximaciones, la inclusión de los nanomateriales en matrices biodegradables que incluyen tanto a partir de polímeros sintéticos como el PLA como derivados de almidón (Montoya et al., 2014, 2019) o la inclusión de algunos polímeros en el medio de cultivo de CB que permitan que el material que se puede emplear potencialmente como empaque se pueda formar a la par que se sintetizan las nanocintas de tal forma que la membrana que finalmente se cosecha contenga los componentes básicos del sistema. Este método es viable de emplear con polímeros a base de almidón o polivinilalcohol (PVA). Tal como se aprecia en la Figura 18 una de las principales ventajas que tiene este último método se relaciona con la distribución homogénea de los componentes, sin embargo, pese a lo promisorio de esta alternativa, es preciso continuar investigando su efectividad no solo para la conformación del empaque además de su comportamiento en uso.

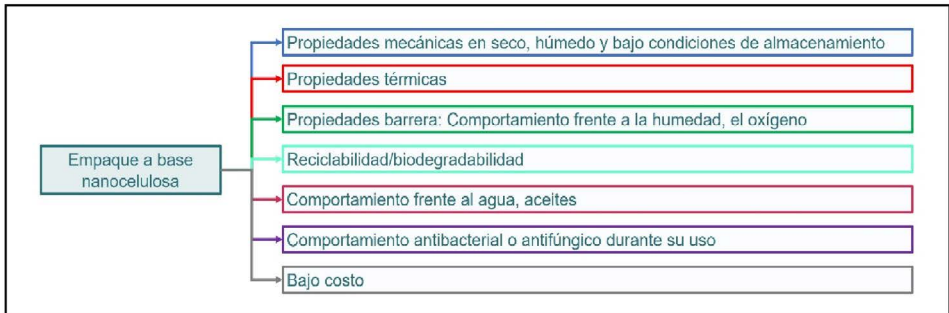


Figura 16. *Atributos que debe cumplir un empaque biodegradable para alimentos*

Fuente: Elaboración propia.

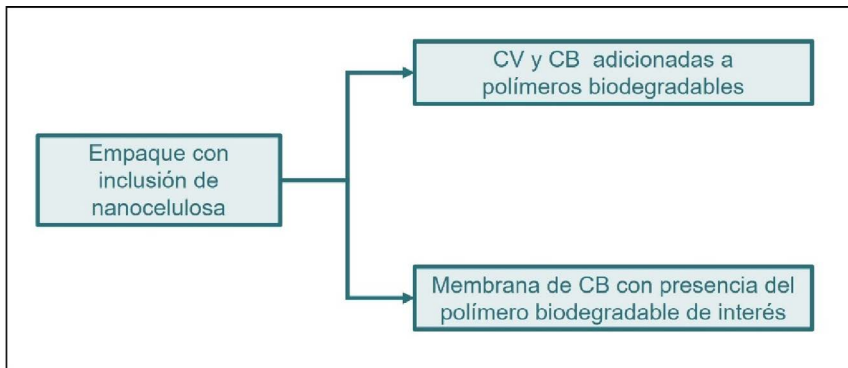


Figura 17. *Tipos de empaques para alimentos a base de nanocelulosa*

Fuente: Elaboración propia.

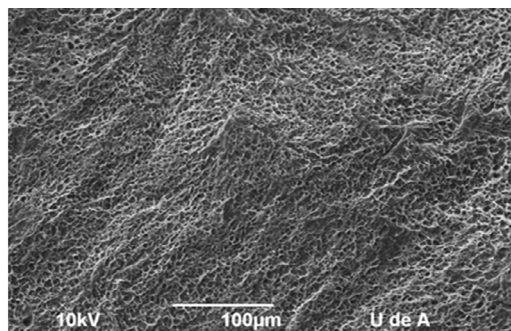


Figura 18. *Imagen de microscopía electrónica de barrido de membrana de CB y PV/A que fue incluido en el medio de cultivo*

Fuente: Elaboración propia.

### *Remoción de contaminantes*

Respecto al tema de la remoción de contaminantes que como el mercurio y otros metales pesados se encuentran presentes tanto en el suelo como en algunos cuerpos de agua, los nanomateriales de celulosa han venido demostrando su eficacia. En especial cuando las muestras de celulosa han sido sometidas a tratamientos previos que permiten introducir grupos funcionales que facilitan la absorción de los iones de los metales y contaminantes que se desean remover (Suárez-Avendaño et al., 2022). Este campo surge como un escenario promisorio para diferentes alternativas que incluyen no solo la remoción en sí misma de estas sustancias nocivas, sino que adicionalmente abren la posibilidad de evaluar la factibilidad de recuperar algunos de ellos, en especial cierto tipo de metales, que a su vez puedan ser empleados en otras aplicaciones industriales. Este tipo de estrategias permitiría implementar conceptos de ingeniería verde como la relacionada con el cierre de los ciclos de materia y energía del proceso y diseñar procesos o sistemas considerando la reutilización de los componentes una vez concluya el uso del producto.

### *Prácticas agrícolas*

Dentro de las múltiples oportunidades que tiene el uso de materiales a base de celulosa en las labores agrícolas, la Figura 19 resume dos posibilidades de bajo costo que han sido estudiadas para dos tipos de necesidades diferentes y que corresponden a la evaluación de soportes a base de celulosa para el crecimiento de semillas y la protección de plantas durante su crecimiento mediante la utilización de coberturas o mantos. En estos casos se han empleado membranas de CB debido a la facilidad de producirlas y emplearlas.

La última estrategia, la ligada con el uso de coberturas para el suelo, ha sido analizada para la protección de cultivos que se pueden ubicar en espacios urbanos. Los resultados obtenidos son promisorios, pues permitieron el crecimiento apropiado de las plantas, máxime cuando se encontraban expuestas a múltiples factores como son la polución ambiental, las variaciones en las condiciones de riego o el impacto de las aves (Cárcamo et al., 2021).



Los ejemplos registrados en la Figura 19 muestran que el uso de nanomateriales de celulosa permite un adecuado crecimiento de las plantas. Por otro lado, gracias a que tanto la CB como la CV pueden ser manipuladas de tal forma que sea posible contar con diferentes configuraciones que van desde geles hasta películas de cierta longitud, y que sumado a su paulatina degradación conforme tiene lugar el desarrollo de la planta, es posible considerar su uso tanto para cultivares de pequeña como de mediana escala, ofreciendo así una alternativa a algunas de los productos que se encuentran en el mercado mundial y que tienen bien sea costos mayores o presentan dificultades para su disposición final.

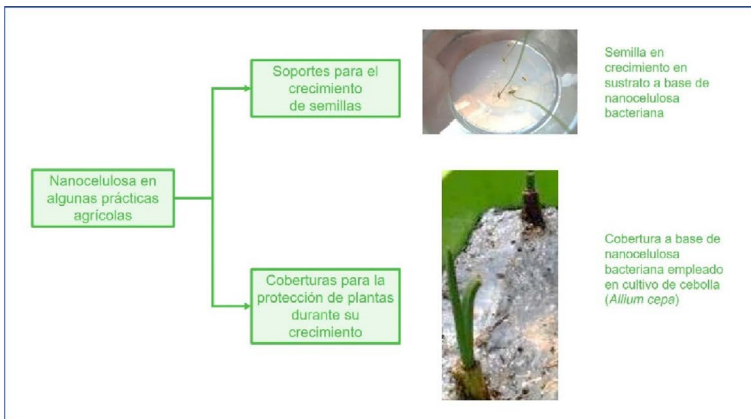


Figura 19. Ejemplos de aplicaciones en prácticas agrícolas de nanocelulosa bacteriana  
Fuente: Elaboración propia.

### Aplicaciones biomédicas

Uno de los aspectos claves que deben cumplir los materiales que se emplean en aplicaciones biomédicas tiene que ver con la biocompatibilidad, que a su vez involucra aspectos morfológicos, de propiedades química, mecánicas y térmicas. Según la aplicación a desarrollar, debe permitir el anclaje de las células, promoviendo su proliferación. En este sentido, diferentes tipos de materiales a base de nanocelulosa han sido probados con éxito en estudios tanto *in vitro* como *in vivo* (Osorio et al., 2020), lo que sugiere que es posible emplearlos para una variada gama de productos, que se pueden agrupar en tres categorías tal como se aprecia en la Figura 20.

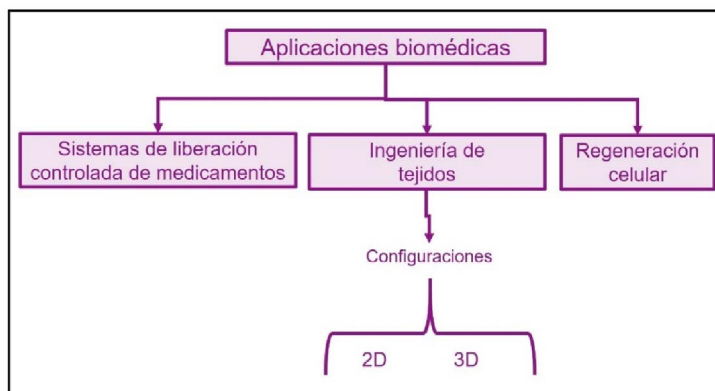


Figura 20. *Aplicaciones biomédicas de los nanomateriales de celulosa*

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de las aplicaciones relacionadas con la liberación controlada de medicamentos, se han venido realizando avances en el desarrollo de sistemas tipo hidrogeles que con presencia de variadas sustancias como lidocaína o ibuprofeno (Osorio et al., 2020). Esto se debe a que la celulosa puede absorber una amplia gama de compuestos tanto naturales como sintéticos de naturaleza polar como no polar que pueden ser liberados gracias a variación en el pH que motiva la relajación y el hinchamiento de las nanofibras. Esto es particularmente útil cuando la celulosa realiza su trayecto a través del sistema digestivo, tal como se esquematiza en la Figura 21 en donde se registra la inclusión de compuestos en la celulosa y su posterior liberación controlada en el colon debido a las modificaciones en el pH.

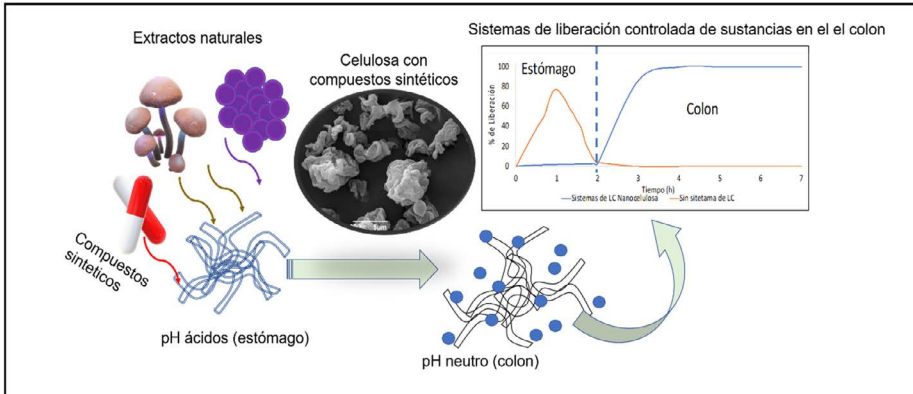


Figura 21. Esquema sobre la liberación de compuestos a lo largo del tracto digestivo

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las aplicaciones en ingeniería de tejidos, las membranas de celulosa bacteriana suelen ser las más empleadas debido a sus diversas ventajas que incluyen: su morfología a base de nanocintas interconectadas que tienen una estructura que recuerdan la que tiene el colágeno y que permite el anclaje de las células. Sumado a lo anterior, debido a su naturaleza química y la porosidad de la membrana, es posible que pueda adsorber nutrientes que permitan el crecimiento y desarrollo de las células.

Los nanomateriales a base de celulosa que se emplean en ingeniería de tejidos pueden adoptar dos configuraciones (ver Figura 20) bien sea en dos dimensiones (2D) y en tres dimensiones (3D). Además, los nanomateriales se pueden desarrollar bien sea exclusivamente a base de nanocelulosa o combinándola con materiales de naturaleza cerámica o polimérica (Osorio et al., 2020). En el caso de los sistemas en 2D, es posible realizar modificaciones en el cultivo que permitan, por ejemplo, la adición de algunos polímeros como el PVA permitiendo contar con una modificación in-situ. Esto contribuye a mejorar el desempeño del sistema. En la Figura 22 se aprecia que existe adhesión de las células como los fibroblastos sobre soportes realizados a partir de CB y materiales a base de PVA y CB. En ambos casos, las células son morfológicamente normales.

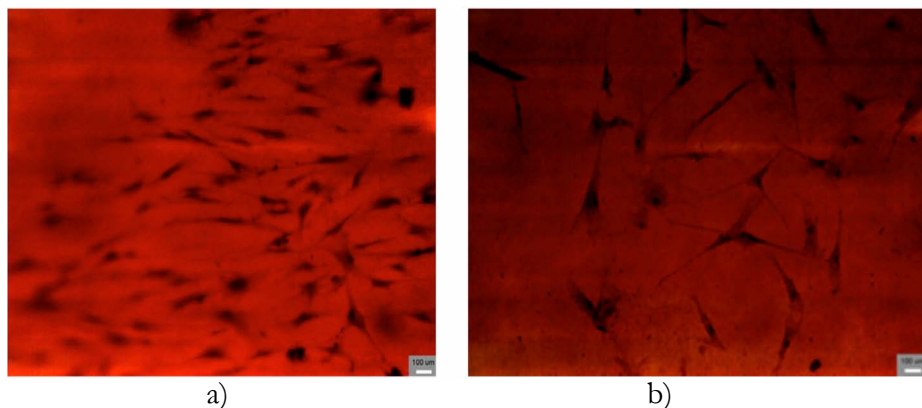


Figura 22. Ensayos de viabilidad celular de fibroblastos sobre diferentes tipos de soportes. a) CB; b) Materiales a base de PVA y CB

Fuente: Elaboración propia.

Sobre los sistemas en 3D, son de interés gracias a las microporosidades que presentan y que al ser de tamaño superior a las células contribuyen a mejorar la motilidad celular tanto a nivel individual como colectiva, contribuyendo a su vez a la diferenciación celular (Osorio et al., 2020).

La evaluación de este tipo de procesos se esquematiza en la Figura 23. De acuerdo con esto, de un paciente se realiza el aislamiento de células correspondientes a un tejido dañando. Luego estas se expanden y se ponen en contacto con la celulosa que les servirá de soporte o andamio, de tal forma que sea posible recuperar el tejido. Una vez se cuente con el tejido reconstruido este puede ser implantado en la misma persona de la cual proceden las muestras iniciales.

En el caso de la regeneración celular, la CB ha mostrado que tiene potencial para aplicaciones ligadas al manejo terapéutico de heridas cutáneas que incluyen tratamiento de quemaduras e incluso para el desarrollo de implantes, debido entre otras ventajas al hecho que el cuerpo humano no cuenta con los mecanismos enzimáticos que degradan la celulosa y esto permite que los apósitos o dispositivos creados en celulosa puedan permanecer por periodos de tiempo superiores a los sistemas bioabsorbibles contribuyendo así con reemplazo o aumento de tejido blando a largo plazo (Osorio et al., 2020). Para mejorar su desempeño, es posible modificar estos sistemas mediante la incorporación de otras nanoestructuras que su-

ministren otras ventajas, como por ejemplo suministrar comportamiento antimicrobial (Osorio et al., 2020).

Como se aprecia en la Figura 24, estas alternativas en medicina regenerativa también pueden ser empleadas para el caso de tejido óseo. En este caso se ubican los biomateriales a base de celulosa en la zona afectada, y esta motiva a que las células del cuerpo se dirijan hacia él, lo que hace que actúe como una matriz extracelular temporal. Las células continúan realizando su trabajo y regeneran el tejido dañado.

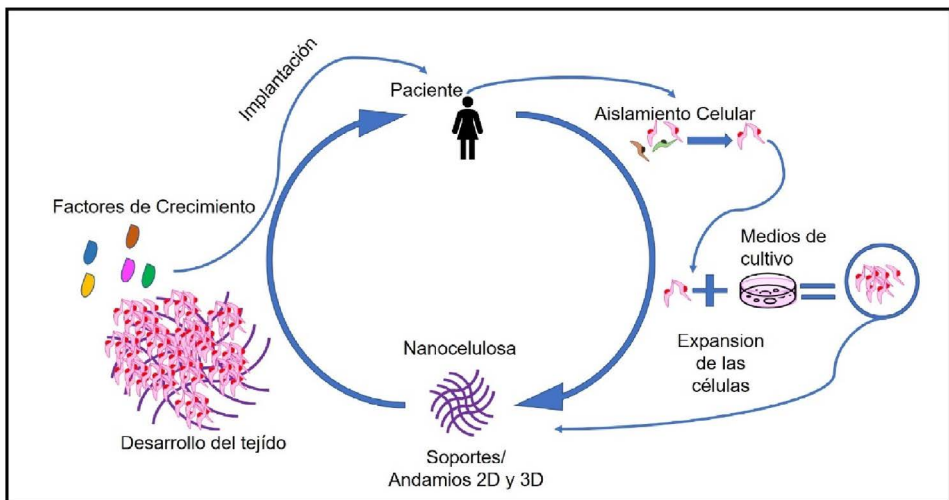


Figura 23. Esquema del uso en ingeniería de tejidos de soportes o andamios tipo 2D y 3D a base de celulosa

Fuente: Elaboración propia.

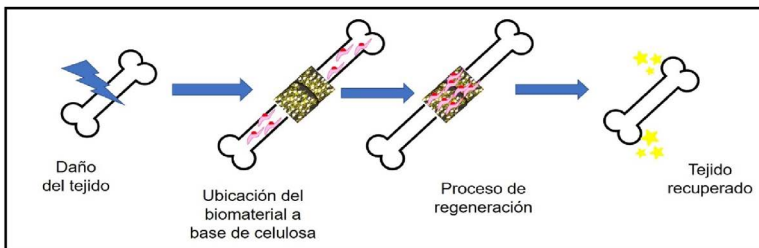


Figura 24. Esquema del uso medicina regenerativa de tejido óseo de biomateriales a base de celulosa

Fuente: Elaboración propia.

### Elaboración de nanocomposites para múltiples aplicaciones

En algunos de los ejemplos comentados hasta el momento, los nanomateriales de celulosa han sido incluidos en otros sistemas, conformando a su vez nanocomposites. Pero en esta línea de materiales compuestos es posible continuar fabricando muchos tipos de composites, en especial frente a la amplia gama de matrices poliméricas en las que pueden ser incluidos.

Dentro de los retos que supone su uso bien sea como reforzante principal o complementario, e incluso como carga es preciso considerar al momento de diseñar el composite la naturaleza polar de la nanocelulosa. Esto supone que previo a su inclusión en las matrices poliméricas es necesario realizar algunas operaciones previas. Así que la Figura 25 en la que se esquema general para la fabricación piezas o muestras de materiales compuestos a base de nanocelulosa, inicia con la consideración justamente de estos procesos previos. Ellos incluyen bien sea la reducción del tamaño, la modificación química o superficial de los nanoobjetos para mejorar el comportamiento interfacial nanoobjetos/matriz, su dispersión en solventes afines a la matriz o incluso, de ser posible implementar acciones de secado.

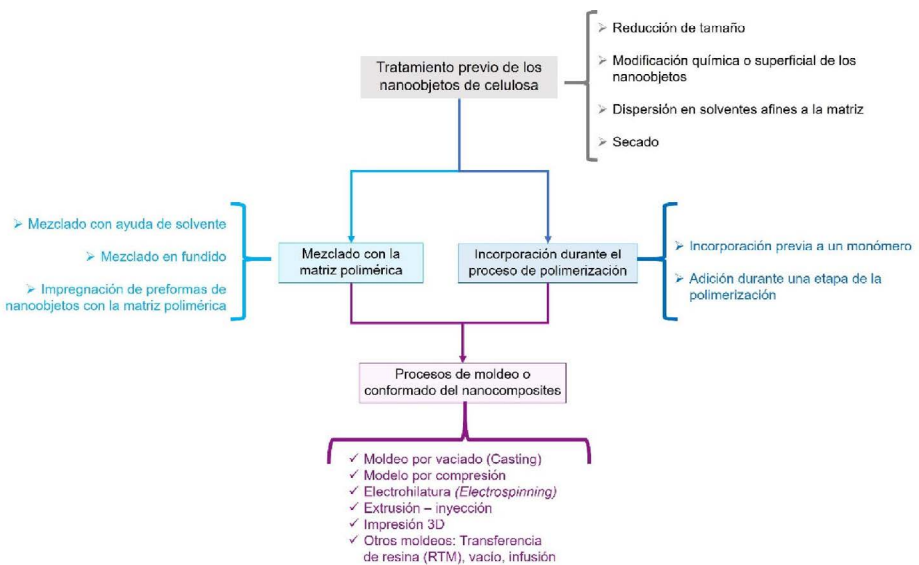


Figura 25. Rutas para la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica con presencia de nanocelulosa.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que las muestras de nanocelulosa han sido sometidas a las acciones previas, la siguiente etapa corresponde a su inclusión en la matriz. Como se observa en la Figura 25, actualmente existen al menos dos rutas. Una de ellas se basa en la utilización de diferentes estrategias de mezclado de los nanoobjetos con la matriz y que pueden tener lugar bien sea bajo condiciones líquidas en presencia de un solvente adecuado, empleando los procesos de mezclado en fundido y que son más afines a las matrices termoplásticas y finalmente realizar preformas a base de los nanoobjetos de celulosa e impregnarlos con la matriz.

Por otro lado, una estrategia que se viene haciendo camino tiene que ver con la incorporación de los nanoobjetos de celulosa en uno de los monómeros de partida o adicionarlos al reactor de polimerización en las etapas previas del proceso. Dentro de las ventajas que este proceso brinda se encuentran las mejoras ostensibles en la dispersión de los componentes y que se mantienen tras el proceso de moldeo del composite. Esta alternativa novedosa se torna particularmente útil cuando se emplean algunos polímeros termorrígidos, que como en el caso del poliéster insaturado (UP) ha presentado significativas dificultades para la incorporación de los nanoobjetos de celulosa, debido a que a la más mínima presencia de agua experimenta una separación de fases, lo que genera problemas de porosidades y de distribución de los componentes. Para ejemplificar esta situación, en la Figura 26 se visualiza una muestra de un tipo de resina UP que ha sido sintetizada en presencia de nanofibrillas de celulosa vegetal, Allí se aprecia que efectivamente se ha logrado obtener un material adecuadamente disperso (Figura 26a) y que se mantiene una vez el polímero ha sido curado (Figura 26b).

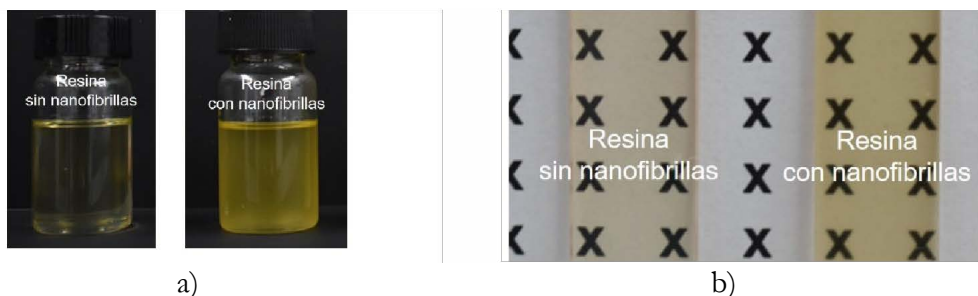


Figura 26. Muestras de UP sin y con presencia de 0.5 % de nanofibrillas de celulosa. a) antes del curado; b) después del curado  
Fuente: Elaboración propia.

Tras la fase de mezclado es posible emplear, en función del tipo de forma deseada, diversos procesos de moldeo de composites. Dentro de los más empleados hasta y ahora debido a la facilidad de su manejo y menor requerimiento en equipamiento o infraestructura se encuentran el vaciado o casting; este puede ser combinado en algunas ocasiones con otros como es el caso de la compresión. Así mismo es posible emplear alternativas como la electrohilatura, la impresión 3D y las técnicas más convencionales de materiales compuestos tanto para matrices termoplásticas como la extrusión o la inyección como para las termorrígidas que incluyen el moldeo por transferencia de resina (RTM), por vacío o infusión.

### **Retos para el desarrollo de las aplicaciones de los nanomateriales de celulosa**

Tal como se ha comentado a lo largo del presente documento, los nanomateriales de celulosa derivados de los residuos agroindustriales y agroalimentarios constituyen una alternativa viable para desarrollar una amplia gama de productos que pueden ser valiosos para múltiples tipos de públicos a nivel mundial, generando a su vez nuevas posibilidades industriales y comerciales tanto para las empresas ya constituidas como para aquellas que pueden ser derivadas de los resultados de investigación.

Los avances comentados indican también que es preciso continuar trabajando en algunos puntos claves que permitan no solo perfeccionar las técnicas de producción, sino que contribuyan con su escalado, producción



industrial, comercialización, así como la respectiva aceptación y consumo del público.

Algunos de los principales retos giran en torno a los siguientes aspectos:

### *Nuevas estrategias para la obtención de nanoobjetos de celulosa a partir de residuos agroindustriales y agroalimentarios*

- Es importante continuar realizando investigaciones en este sentido que procuren contribuir en alguna de las siguientes líneas:
- Reducir el consumo de agua, y con ello la huella hídrica del proceso. Este aspecto es particularmente clave de controlar tanto en algunas etapas de los procesos químicos como de limpieza o remoción de componentes no celulósicos.
- Optimizar o reducir los consumos de energía ligados a las operaciones de reducción de tamaño. En este sentido, alternativas como la mecanoquímica pueden ser consideradas de incorporar, al menos en las fases iniciales de los procesos.
- Analizar la viabilidad de extraer de los residuos del aislamiento de CV moléculas no celulósicas, que, como las pectinas, pueden tener interés comercial. Esto supone rediseñar algunas etapas en clave de química verde e incluso explorar las posibilidades de avanzar hacia la conformación de biorefinerías.
- Pese al éxito que ha demostrado la combinación de los procesos químicos y mecánicos para la producción de nanoobjetos de celulosa, existen nuevas tecnologías que surgen como promisorias y que pueden ser analizadas. Ellos incluyen métodos basados en radiación con el apoyo de microondas o el uso de solventes eutécticos (Pradhan et al., 2022).

### *Escalabilidad*

Considerando las escalas establecidas para los niveles de madurez de una tecnología conocidos en su forma abreviada como TRL, los ejemplos presentados en este texto se encuentran entre los niveles TRL3 y TRL4. Con miras a que efectivamente puedan tener un impacto sobre el mercado, es necesario continuar trabajando en temas de investigación y desarrollo que

permitan analizar cuando de ellos, y otros comparables, puedan avanzar, y porque no alcanzar en un futuro cercano un TRL9. Esta meta supondría que son productos probados en entornos reales y que pueden ir hacia producción a escala industrial para su posterior comercialización con el respectivo impacto sobre las comunidades.

### *Normativa*

Dentro de los retos que siguen vigentes en este sentido algunos tiene que ver con las potenciales barreras comerciales o normativas que frente a los nanomateriales de celulosa se puedan presentar en algunos países. Esto es particularmente importante para su inclusión en las matrices alimentarias y las aplicaciones biomédicas. Por ello la importancia de continuar trabajando en la creación de normativas tanto de carácter nacional como internacional, tipo ISO, que contribuyan a facilitar el uso y el consumo de este tipo de sustancias. En la actualidad en Latinoamérica existen avances en este campo, ejemplo de ello tiene que ver con lo que ocurre con la creación e implementación de comités técnicos de norma, así como en la definición y establecimiento de normas en países como México y Colombia. Pero es necesario no solo continuar y fortalecer los existentes, sino promover su creación en otros países de la región.

Para avanzar en este sentido es preciso que participen todos los actores involucrados en las cadenas productivas en las cuales son posibles de emplear los nanomateriales de celulosa y que implica entonces la presencia de entidades de investigación, universidades, sectores productivos, comercializadores de nanocelulosa, asociaciones de consumidores o entidades que cumplan con esta función en los diferentes países y las entidades gubernamentales encargadas de regular, generar normas y procedimiento de control y vigilancia.

### *Manejo seguro*

Esta es una creciente preocupación a nivel mundial debido a los múltiples accidentes e incidentes que han venido teniendo lugar alrededor del mundo y que han disparado las alarmas del manejo seguro tanto de las sustan-

cias involucradas en múltiples procesos industriales como la protección apropiada de las personas involucradas los procesos productivos. En este sentido, es preciso implementar más estrategias en torno a las cadenas de producción de nanomateriales de nanocelulosa. Aunque ya existe una serie de normativas tanto internacionales como la norma ISO/TR 12885:2018 “Nanotechnologies — Health and safety practices in occupational settings” (ISO, 2018) o algunas nacionales como en el caso de Colombia con la NTC-ISO-TR 13121:2018 “Nanotecnología. Evaluación del riesgo de los nanomateriales” (Nanotecnología. Evaluación del Riesgo de los Nanomateriales, 2018), se encuentran orientadas al uso de los nanomateriales en general. De allí la necesidad de evaluarlas a la luz del aislamiento, producción y uso de la nanocelulosa y establecer, en caso de ser necesario, normativas específicas.

### *Toxicidad y citotoxicidad de algunos productos*

Otro importante reto que deben afrontar los nanomateriales de celulosa tiene que ver con continuar demostrando su nivel de inocuidad y seguridad que permita su inclusión en diversas matrices alimentarias y en otros tipos de productos que se encuentran en contacto directo tanto con la piel o con fluidos corporales humanos. En este aspecto es necesario seguir trabajando tanto a nivel de investigación como de legislación para asegurar que efectivamente no existen riesgos mayores derivados de su uso que puedan generar problemas de seguridad pública.

## **Determinación de nanomateriales en productos terminados**

Con miras al consumidor, quien finalmente validará si las ventajas del uso de la nanocelulosa le generan o no mejoras en su calidad de vida, es necesario continuar trabajando en el complejo reto de establecer en los productos terminados la presencia de los nanomateriales de nanocelulosa y en qué forma y cantidad se encuentran. Esto supone un intenso trabajo para los investigadores dedicados a las áreas de caracterización y metrología. Los avances en estos campos condicionarán algunos procesos de

regulación y normativa como, por ejemplo, informar o no al consumidor, a través de la etiqueta, que el producto que está adquiriendo tiene nanocelulosa.

### *Etiquetado*

Pese a que aún existen muchas reticencias en algunos lugares del mundo frente al tema del etiquetado para productos que contienen nanomateriales, en especial por las dificultades técnicas relacionadas con la posibilidad de medir o identificar el estado, forma o tamaño que tiene las nanoestructuras en el producto terminado, ya existen algunas legislaciones en el mundo que sugieren que se comiencen a declarar de forma explícita en las etiquetas de los productos su presencia. Esto supone varios retos, uno de ellos mencionado antes relacionado con las formas de caracterizar los productos finales y otro ligado a la recepción que pueda tener el público frente a esta información. Lo que indica que es necesario abordar una mayor estrategia de culturización orientada al público en general en temas ligados a la nanotecnología y la nanocelulosa en particular. Las acciones en este sentido pueden ofrecer muchas oportunidades para el trabajo interdisciplinario, pues es indispensable considerar tanto los aspectos técnicos como los ligados al campo bioético, ético, legal, de comunicación y marketing.

## **Conclusiones**

Como se ha presentado en este capítulo los residuos agroindustriales y agroalimentarios son materias primas promisorias para obtener y aislar nanomateriales de celulosa que puedan ser incluidos en el desarrollo de una amplia gama de aplicaciones. Pese a ello, existen una serie de retos sobre los que se deben ir abordando para que efectivamente puedan impactar de forma positiva tanto a nivel económico, como social a las comunidades involucradas en estos procesos. Esto implica que los avances en los temas de nanocelulosa requerirán no solo un arduo trabajo de investigación científica y técnica sino la necesidad de crear equipos de trabajo cada vez más interdisciplinarios.

## Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento tanto a la Red Nanocelia del Programa Cyted, como a las diferentes entidades que han contribuido con el desarrollo de algunos de los productos comentados en este capítulo y entre las cuales se encuentran CIDI-UPB, Programa G8+1 y MinCiencias - Colombia.

## Referencias

- Augimeri, R. V., Varley, A. J., & Strap, J. L. (2015). Establishing a Role for Bacterial Cellulose in Environmental Interactions: Lessons Learned from Diverse Biofilm-Producing Proteobacteria. *Frontiers in Microbiology*, 6(NOV). <https://doi.org/10.3389/FMICB.2015.01282>
- Cárcamo, L., Sierra, S., Osorio, M., Velásquez-Cock, J., Vélez-Acosta, L., Gómez-Hoyos, C., Castro, C., Zuluaga, R., & Gañán, P. (2021). Bacterial Nanocellulose Mulch as a Potential Greener Alternative for Urban Gardening in the Small-Scale Food Production of Onion Plants. *Agricultural Research*, 10(1), 66–71. <https://doi.org/10.1007/S40003-020-00479-Y/TABLES/1>
- Castro, C., Zuluaga, R., Putaux, J. L., Caro, G., Mondragon, I., & Gañán, P. (2011). Structural characterization of bacterial cellulose produced by *Gluconacetobacter swingsii* sp. from Colombian agroindustrial wastes. *Carbohydrate Polymers*, 84(1), 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.10.072>
- Gómez H., C., Serpa, A., Velásquez-Cock, J., Gañán, P., Castro, C., Vélez, L., & Zuluaga, R. (2016). Vegetable nanocellulose in food science: A review. *Food Hydrocolloids*, 57, 178–186. <https://doi.org/10.1016/J.FOODHYD.2016.01.023>
- Hornung, M., Ludwig, M., Gerrard, A. M., & Schmauder, H. P. (2006). Optimizing the production of bacterial cellulose in surface culture: Evaluation of substrate mass transfer influences on the bioreaction (Part 1). *Engineering in Life Sciences*, 6(6), 537–545. <https://doi.org/10.1002/ELSC.200620162>

- ISO. (2015). ISO/TS 80004-1:2015(en), Nanotechnologies — Vocabulary — Part 1: Core terms. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:80004:-1:ed-2:v1:en>
- ISO. (2017). ISO/TS 20477:2017(en), Nanotechnologies — Standard terms and their definition for cellulose nanomaterial. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:20477:ed-1:v1:en>
- ISO. (2018). ISO/TR 12885:2018 - Nanotechnologies — Health and safety practices in occupational settings. <https://www.iso.org/standard/67446.html>
- Krystynowicz, A., Czaja, W., Wiktorowska-Jeziarska, A., Gonçalves-Miśkiewicz, M., Turkiewicz, M., & Bielecki, S. (2002). Factors affecting the yield and properties of bacterial cellulose. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 29(4), 189–195. <https://doi.org/10.1038/SJ.JIM.7000303>
- Molina-Ramírez, C., Castro, M., Osorio, M., Torres-Taborda, M., Gómez, B., Zuluaga, R., Gómez, C., Gañán, P., Rojas, O. J., & Castro, C. (2017). *Effect of Different Carbon Sources on Bacterial Nanocellulose Production and Structure Using the Low pH Resistant Strain Komagataeibacter Medellinensis*. *Materials* (Basel, Switzerland), 10(6). <https://doi.org/10.3390/MA10060639>
- Montoya, Ú., Zuluaga, R., Castro, C., Goyanes, S., & Gañán, P. (2014). Development of composite films based on thermoplastic starch and cellulose microfibrils from Colombian agroindustrial wastes. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 27(3), 413–426. [https://doi.org/10.1177/0892705712461663/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177\\_0892705712461663-FIG5.JPG](https://doi.org/10.1177/0892705712461663/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_0892705712461663-FIG5.JPG)
- Montoya, Ú., Zuluaga, R., Castro, C., Vélez, L., & Gañán, P. (2019). Starch and Starch/Bacterial Nanocellulose Films as Alternatives for the Management of Minimally Processed Mangoes. *Starch - Stärke*, 71(5–6), 1800120. <https://doi.org/10.1002/STAR.201800120>
- Nanocellulose Market Size, Share & COVID-19 Impact Analysis, By Type (Microfibrillated Cellulose, Cellulose Nanofibrils, Cellulose Nanocrystals, Bacterial Cellulose and Others), Application (Cement & Composite Materials, Textiles & Nonwovens, Paper & Packaging, Food Products, Cosmetics & Toiletries, Filter Materials, and Others), and Regional Forecast, 2020-2027. (2021, February).

- Nanotecnología. Evaluación del riesgo de los nanomateriales. (2018). <https://tienda.icontec.org/gp-nanotecnologia-evaluacion-del-riesgo-de-los-nanomateriales-ntc-iso-tr13121-2018.html>
- Osorio, M., Cañas, A., Sanchez, D., Naranjo, T., Gañán, P., Zuluaga, R., Ortiz, I., Rojas, O. J., & Castro, C. (2020). *Lignocellulosic Materials for Biomedical Applications. Lignocellulosics: Renewable Feedstock for (Tailored) Functional Materials and Nanotechnology*, 209–248. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804077-5.00013-0>
- Pradhan, D., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2022). Emerging technologies for the production of nanocellulose from lignocellulosic biomass. *Carbohydrate Polymers*, 285. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2022.119258>
- Rani, M. U., & Appaiah, A. (2011). Optimization of culture conditions for bacterial cellulose production from *Gluconacetobacter hansenii* UAC09. *Annals of Microbiology*, 61(4), 781–787. <https://doi.org/10.1007/s13213-011-0196-7>
- Suárez-Avendaño, D., Martínez-Correa, E., Cañas-Gutierrez, A., Castro-Riascos, M., Zuluaga-Gallego, R., Gañán-Rojo, P., Peresin, M., Pereira, M., & Castro-Herazo, C. (2022). Comparative Study on the Efficiency of Mercury Removal From Wastewater Using Bacterial Cellulose Membranes and Their Oxidized Analogue. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. <https://doi.org/10.3389/FBIOE.2022.815892>
- Verschuren, P. G., Cardona, T. D., Nout, M. J. R., De Gooijer, K. D., & Van Den Heuvel, J. C. (2000). Location and limitation of cellulose production by *Acetobacter xylinum* established from oxygen profiles. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 89(5), 414–419. [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(00\)89089-1](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(00)89089-1)
- Zuluaga, R., Osorio, M., Velásquez-Cock, J., Gómez, C., Molina-Ramírez, C., Correa-Hernández, C., Vélez-Acosta, L., Castro, C., Ruiz-Ramírez, L., Serpa, A., Restrepo, A., Álvarez, C., Betancourt, S., Montoya, Ú., Kerguelen, H., Salazar, S., Posada-Mona, P., Santana, R., Marin, D., & Gañán, P. (2019). *Compendio de las alternativas para el desarrollo de materiales que brindan las estructuras celulósicas aisladas de residuos de la agroindustria de musáceas*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/122024>

