

EL PAPEL DE LOS RESIDUOS AGRÍCOLAS EN LA EXTRACCIÓN DE NANOCRISTALES DE CELULOSA

Wendy Elizabeth Peralta Holguín*^{ID}, Carlos Alcibar Medina Serrano^{ID}

Grupo de Investigación de materiales avanzados (GIMA). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias. Riobamba. Ecuador.

*Autor para la correspondencia: wendy.peralta@esPOCH.edu.ec

Recibido: 08-02-2020 / Aceptado: 08-07-2021 / Publicación: 30-08-2021

Editor Académico: Diego Piccardo^{ID}

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue revisar fuentes documentales sobre el contenido lignocelulósico de los residuos agrícolas del cultivo de arroz, plátano, maíz, caña de azúcar, y piña para la obtención de nanocristales de celulosa. La investigación con enfoque cualitativo- documental descriptivo recopiló datos del objeto de estudio para su análisis y evaluación. Se analizaron diversos planteamientos teóricos, procedimentales y metodológicos para la obtención de nanocristales de celulosa; se identificó el tipo de residuo generado por cada cultivo en estudio, de los cuales se describió el contenido lignocelulósico que poseen con el propósito de establecer que por su composición se constituyen en un material potencial para la obtención de nanocelulosa; luego se analizaron los métodos empleados en la obtención de nanocristales de celulosa. Con base a los documentos revisados se concluye que los diferentes residuos agrícolas poseen un contenido celulósico relevante (28-100%), por tanto, convirtiéndolos en materiales aptos para ser aprovechados para obtener nanocristales de celulosa.

Palabras clave: Hidrólisis ácida, métodos de extracción, residuos lignocelulósicos.

THE ROLE OF AGRICULTURAL WASTE IN THE EXTRACTION OF CELLULOSE NANOCRYSTALS

ABSTRACT

The objective of this study was to review documentary sources on the lignocellulosic content of agricultural residues from the cultivation of rice, banana, corn, sugar cane, and pineapple to obtain cellulose nanocrystals. Research with a qualitative - documentary and descriptive approach, collected data from the object of study for analysis and evaluation. Various theoretical, procedural, and methodological approaches for obtaining cellulose nanocrystals were analyzed; the type of residue generated by each culture under study was identified, of which the lignocellulosic content that they possess was described. In order to establish that their composition constitutes a potential material for obtaining nanocellulose, the methods used in obtaining cellulose nanocrystals were then analyzed. Based on the revised documents, it is concluded that the different agricultural residues have a relevant cellulosic content (28-100%), therefore, converting them into materials suitable to be used to obtain cellulose nanocrystals.

Keywords: Acid hydrolysis, extraction methods, lignocellulosic residues.

O PAPEL DOS RESÍDUOS AGRÍCOLAS NA EXTRAÇÃO DE NANOCRISTAIS DE CELULOSE

RESUMO

O objetivo do presente estudo foi a revisão de fontes documentais sobre o conteúdo lignocelulósico dos resíduos agrícolas da cultura de arroz, banana, milho, cana-de-açúcar e abacaxi para a obtenção de nanocristais de celulose. A pesquisa com abordagem qualitativo - documental e descritiva coletou dados do objeto de estudo para sua análise e avaliação. Foram analisadas diversas abordagens teóricas, processuais e metodológicas para a obtenção de nanocristais de celulose; foi identificado o tipo de resíduo gerado por cada cultura em estudo, dos quais se descreveu o teor lignocelulósico que possuem, com o propósito de estabelecer que pela sua composição se constituem em um material potencial para a obtenção de nanocelulose; em seguida, analisaram-se os métodos utilizados na obtenção de nanocristais de celulose. Com base nos documentos revistos conclui-se que os diferentes resíduos agrícolas possuem um conteúdo celulósico relevante (28-100%), portanto, convertendo-os em materiais aptos a serem explorados para obter nanocristais de celulose.

Palavras chave: Hidrólise ácida, métodos de extração, resíduos lignocelulósicos.

1. INTRODUCCIÓN

Riera et al., 2018 afirman que, en el año 2018, Ecuador registró una producción de más de 23000 millones de kilogramos en cultivos agrícolas de: azúcar, banano, papa, cacao, naranja, palma aceitera, maíz duro seco. La producción de arroz, plátano y brócoli, representaron el 59,46% del total de la producción nacional. El sector agrícola es uno de los principales pilares de la economía ecuatoriana; pero esa a esta contribución financiera importante, se presenta un problema ambiental debido a que la agroindustria genera una acumulación de residuos gaseosos, líquidos, sólidos y orgánicos. (Riera, Maldonado, & Palma, 2018).

Este problema se puede mitigar aprovechando eficientemente este tipo de residuos, ya que las características químicas y biológicas que poseen estos residuos agroindustriales se pueden utilizar para diversas aplicaciones como: la obtención de productos de consumo y extracción de componentes, sin embargo, en el Ecuador no se registra el manejo de este tipo de residuos. (Riera et al., 2018).

La nanotecnología en la agricultura se está involucrando día a día en el crecimiento económico mundial; el cual entre otras aplicaciones permite la extracción de componentes de residuos orgánicos, entre ellos los nanocristales de celulosa (CNC), el cual es reconocido como un material innovador y de relevancia científica. Entre sus aplicaciones se puede mencionar películas para recubrimientos, refuerzo en polímeros, fibras y textiles, aplicaciones biomédicas, aplicaciones electrónicas, entre otras (Pech, 2018). La obtención de CNC a escala industrial a partir de desechos agrícolas para producir productos con valor agregado es aún un campo abierto para la investigación (Kaur, Kumari, & Sharma, 2018).

El presente estudio tiene como objetivo una revisión documental de los nanocristales de celulosa a partir de residuos agrícolas y sus métodos de extracción.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El presente estudio documental, busco establecer si residuos agrícolas pueden ser usados para obtener nanocristales de celulosa, esto se realizó a través de la consulta de una serie de documentos (libros, revistas, informes, y demás documentos bibliográficos.). Los documentos empleados para este trabajo fueron seleccionados y analizados según el objetivo del estudio; donde se empleó la técnica de bibliografía anotada, que consistió en elaborar un listado de los documentos recopilados con información completa de las fuentes, y su vez también la técnica de la información sintetizada que ayuda a la comprensión de la problemática en estudio. Para encontrar la información pertinente se revisó diversas bases de datos digitales; utilizando palabras claves como: nanotecnología, celulosa,

residuos agrícolas entre las principales, se seleccionó diversos artículos los cuales fueron recopilados, organizados por temas, analizados y sintetizada la información útil para el estudio.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

3.1.1. Residuos agrícolas

Los residuos o subproductos agroindustriales se generan en cualquier proceso de producción y generalmente no poseen utilidad posterior en la cadena de producción (Vargas & Pérez, 2018). Son materiales adicionales de cultivos cosechados que tienen diferentes usos y se derivan de los cultivos de cereales, frutas, legumbres entre otros. Estos materiales en su mayoría no son destinados al consumo humano; entre estos desechos se incluyen: los tallos, las hojas, las cáscaras, las semillas, entre las principales partes excluidas (Rezanezhad et al., 2013).

Estos desechos agrícolas son aprovechados en pequeñas cantidades como: alimento de animales, en la obtención de energía por procesos de combustión, en la preparación de abonos orgánicos, entre otros, sin embargo, la mayor parte de estos son incinerados en cielo abierto causando contaminación ambiental (Arias & Meneses, 2016), los cuales según Vargas y Pérez (2008) producen problemas en medios abióticos, bióticos y socioeconómicos.

Los residuos agroindustriales son de naturaleza predominantemente sólida y orgánica, rica en polímeros de celulosa y hemicelulosa, aproximadamente entre un 75 y 80 % (Vargas & Pérez, 2018). Para Arias y Meneses (2016) los residuos son considerados como una fuente de biomasa lignocelulósica y cuentan con un alto potencial para ser aprovechados en diferentes procesos que incluyen la elaboración de nuevos productos o la agregación de valor a los productos originales.

El uso de los residuos agroindustriales consta de aplicaciones prometedoras en diversos campos industriales (de Oliveira et al., 2017). Actualmente se impulsa el desarrollo de tecnologías para el uso sustentable de los recursos naturales; las aplicaciones que se trabajan básicamente son para los tres siguientes grupos (Vargas & Pérez, 2018):

- La valorización biológica y química que permite obtener gases, líquidos o sólidos comercializables como pectinas, enzimas, aceites esenciales, fibra para alimentación animal e incluso humana, también para la producción de hongos comestibles, flavonoides y carotenoides.

- La obtención de combustibles como el biogás empleado para diversos, tanto para el primer y este segundo grupo los productos se obtienen comúnmente por procesos biológicos, por mencionar algunos podemos señalar al compostaje y lombricultura.
- Valorización térmica que busca la reducción del volumen de los residuos y la recuperación de energía usando procesos como incineración y pirólisis.

Entre los desechos agrícolas podemos encontrar: tallos de girasol, fibras de cáñamo, pulpa de bambú, algodón, corteza de abeto, fibras de sisal, fibras de hoja de piña, piel de ajo, cáscara de soja, paja de arroz, fibras de cáscara de coco, semillas de mango, desechos de algas rojas, residuos de cáscara de banano, y demás. El estudio de estos residuos en otras investigaciones de estos materiales lignocelulósicos ha permitido establecer que sus materiales lignocelulósicos poseen un elevado nivel de biodegradabilidad, una baja densidad y excelentes propiedades mecánicas como: una gran rigidez y resistencia (Collazo-Bigliardi et al., 2018).

3.1.2. Residuos agrícolas del cultivo de arroz

En el proceso de cosecha del arroz se obtiene inicialmente la paja de arroz de la cual se obtiene una (1) tonelada por cada ocho (8) toneladas cultivadas de este cereal; posterior en el proceso de pilado (Figura 1) se obtiene el arroz pilado (65,3%), el polvillo (9%), la cascarilla (23,2%), y el arrocillo (2,5%) (Abril et al., 2009).

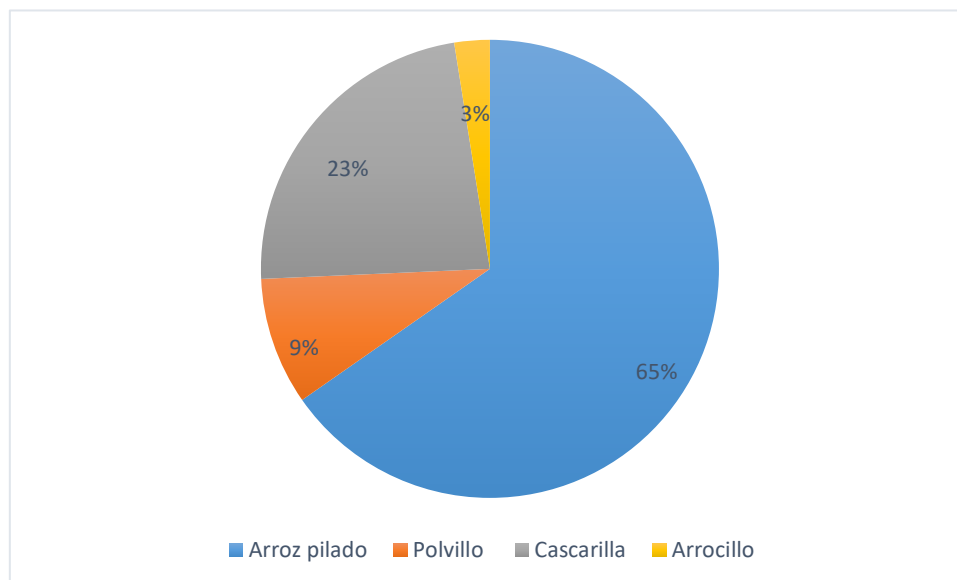


Figura 1. Productos del cultivo de arroz.
Fuente: (Peralta & Medina, 2021)

Entre las aplicaciones de la paja de arroz se pueden mencionar la incorporación directa a cultivos o en combinación con fertilizantes químicos; también, en compostaje por el alto contenido de silicio

que posee, para lo cual deben eliminarse los metales pesados con un tratamiento de lodos. Además, se puede mencionar su uso en la producción de energía, síntesis de compuestos a base de fibras naturales y plásticos, la extracción de pasta celulósica, hemicelulosa, lignina y derivados, y la producción de papeles (Abril et al., 2009).

El polvillo es un producto derivado que se origina por la fricción del grano en las máquinas pulidoras, se encuentra entre la cascara y el endospermo del grano. (Vargas et al., 2013).

El arrocillo (granos quebrados de arroz pulido), puede contener entre 6 y 20% de partículas oscuras entre los que podemos encontrar granos dañados por el proceso de pulido, fermentación o la acción de hongos. (Vargas et al., 2013).

La cascarilla de arroz es un residuo lignocelulósico que se obtiene de la producción de arroz (Naveda et al., 2019). En el país se produce 123 millones de toneladas de cascarilla de arroz, lo que representa el 20 al 25% de la producción total de la gramínea (Llanos et al., 2016).

La cascarilla de arroz tiene una naturaleza fuerte, leñosa y abrasiva; por lo cual, es resistente a factores ambientales, durante el tiempo de desarrollo de la planta, no es apta para el consumo humano debido a su alto contenido de sílice (Vargas et al., 2013). Entre las aplicaciones de la cascarilla se tiene: la creación de paneles de construcción, elaboración de materiales aislante, fabricación de aglomerados, tostado para sustrato en el cultivo (Santos & Silva, 2019), conversión de la biomasa desde la obtención de azúcares a la conversión de etanol y furfural, elaboración de abonos orgánicos como el compost, material para el cultivo de hongos, obtención de papel, material de construcción.

También la cascarilla es utilizada en la alimentación para animales de granja, con la desventaja de que aporta poca fibra a la dieta; además, puede provocar la irritación de los tractos digestivos por el alto contenido de sílice. Por esta razón en muchos países se permite incluir entre un 5 al 25% de este desecho (Vargas et al., 2013); la cascarilla se la usa también como material para crear la cama para animales.

Debido al alto contenido de silicio, la cascarilla se la usa para obtener productos de silicio (Santos & Silva, 2019), y como material de abrasivo para la limpieza de ciertos metales como hierro, acero, aluminio, latón, bronce (Kaur et al., 2018).

3.1.3. Residuos agrícolas del cultivo del plátano

La De la cosecha de los racimos de bananos y/o plátanos se utiliza del 20 al 30% de su biomasa, quedando residuos de un 70 a 80% sin aplicaciones; estos residuos de biomasa son el pseudo - tallo, raquis o tallo floral, y hojas (Mazzeo et al., 2010). Los bananos y plátanos son un alimento que genera

como residuos hojas, pseudo - tallo, y vástago o raquis, actualmente las hojas son aprovechadas con gran aceptación por parte de los consumidores como un envoltorio natural de alimentos, el pseudo - tallo a pesar de poseer aplicaciones alimenticias es nulamente explotado el mismo caso para el vástago.

El pseudo - tallo es una fuente de fibra y es semejante a un tronco; su núcleo central es suave y está envuelto con hasta 25 vainas de hojas que se desenvuelven del tallo y se transforman en hojas cuando han madurado (CFN, 2017) (Subagyo & Chafidz, 2020). Después de la cosecha el residuo de pseudo - tallo se calcula que la cantidad que se obtiene esta entre 60 a 80 toneladas por hectárea (Thorat & Bobade, 2018). Este residuo también se emplea en la fabricación de telas, cordones, hilos, material de protección para el interior de los vehículos, productos sanitarios especializados y de alta calidad para bebés, en la elaboración de papeles como billetes de banco, bolsas de café y té, telas de filtro, fibras de refuerzo para yeso, tejidos desechables y tejidos de densidad ligera (Mazzeo et al., 2010) y (Subagyo & Chafidz, 2020). Además, debido a sus propiedades antioxidantes se utiliza en la industria farmacéutica en la fabricación de medicamentos para trastornos urinarios; problemas estomacales como: diarrea, disentería en la eliminación de cálculo a los riñones, vesícula biliar y también ayuda a controlar la obesidad (Thorat & Bobade, 2018). Otra aplicación es la elaboración de harinas para consumo humano debido a los macronutrientes que posee como el potasio (K), sodio (Na), calcio (Ca), magnesio (Mg), fósforo (P) y vitamina B6 (Mazzeo et al., 2010).

El núcleo del pseudo - tallo después de la cocción se puede consumir o también se pueden preparar harina. El residuo debe ser cortado en pequeñas dimensiones y posteriormente ser secadas a temperaturas de 40 a 70 °C. Se utiliza con una preparación variada en productos de panadería y lácteos (Thorat & Bobade, 2018).

El pseudo - tallo del plátano son residuos lignocelulósico-provenientes del cultivo del plátano. Las características con mayor importancia del pseudo - tallo del plátano es la diversidad de componentes químicos que tiene como son: Na, K, Ca, Mg, P, Fe, Zn, Mn, la mayoría en importantes porcentajes; razón por la cual, se lo puede catalogar como un material residual que puede ser empleado en la alimentación humana y animal de forma directa o mediante el procesamiento industrial (Thorat y Bobade, 2018).

El vástago o raquis de banano, más conocido como tallo floral, es junto a la cáscara uno de los últimos residuos que se produce después del consumo del banano, y se suele utilizar como alimento para ganado de forma directa o mediante la industrialización en forma de harinas. (CFN, 2017) Debido a la calidad de sus nutrientes, actualmente es usado para la alimentación humana; además, es materia

prima para fabricar materiales fibrosos como papeles, materiales de construcción y artesanías. (Thorat & Bobade, 2018)

El tallo floral también tiene un alto porcentaje de compuestos lignocelulósicos con contenido de lignina de 18,69%, celulosa de 29,86%, y hemicelulosa 34,09% (Carchi, 2014), lo que le permite su aplicación en la industria textil (ropa, hilos y materiales similares), dentro de la nueva tendencia tecnológica para crear nuevos materiales textiles; sin embargo, debido a las características mencionadas se lo considera también como una buena fuente de obtención de CNC.

3.1.4. Residuos agrícolas del cultivo del maíz

Los residuos del maíz tienen limitadas aplicaciones como el uso de las mazorcas como material de construcción y carbón activado; las hojas de maíz son utilizadas como materia prima para azúcares fermentables y fuente de fibra suplementaria para papel; los tallos de maíz se usan como alimento para el ganado y biofertilizante (Maté, 2017). Estos residuos también son usados como fuente de energía a través de la conversión termoquímica en procesos de gasificación y pirólisis. Su envoltura se utiliza en preparaciones alimenticias o en la elaboración de artesanías (muñecas y otras decoraciones); se menciona también su uso como un té, debido a sus propiedades diuréticas (Maté, 2017).

3.1.5. Residuos agrícolas del cultivo de caña de azúcar

La caña de azúcar produce grandes cantidades de biomasa, pero solo una pequeña fracción tiene aplicación; entre algunos de los subproductos obtenidos se puede mencionar a la melaza, que es un jarabe oscuro que se utiliza para la preparación de alimentos, en aplicaciones industriales, la obtención de etanol y la elaboración de bebidas alcohólicas (Burgos, 2015) y (Quezada, 2015). Además de la melaza se aprovecha el bagazo, que es el residuo sólido resultante de la extracción del jugo de los tallos de la caña de azúcar, el cual contiene un material lignocelulósico, que se obtiene después de la filtración del jugo de caña de azúcar. Aproximadamente por cada 1000 toneladas de caña de azúcar procesada se generan alrededor de 270 toneladas de bagazo, y 34 toneladas de una especie de lodo (Martinez-Hernandez et al., 2018).

Las industrias encargadas del procesamiento de la caña de azúcar son los ingenios azucareros, industrias que utilizan el bagazo de caña como fuente primaria de combustible en forma de vapor para producir energía eléctrica, proceso que depende de la tecnología utilizada y de las características físicas que posee el residuo al momento de ser empleado. Sin embargo, este uso no es ideal en el manejo de residuos orgánicos debido a que la combustión produce emisiones muy contaminantes (Teixeira et al., 2015).

Otras aplicaciones del bagazo es la generación de biodiesel con pretratamiento e hidrólisis, seguido de un proceso de fermentación y deshidratación. También se lo utiliza como sustrato sólido para hongos en el crecimiento microbiano, fabricación de papel, alimento para el ganado, envase de alimentos desechables, producción de proteínas de células individuales, etanol, enzimas y aditivos alimentarios como la vainillina, xilitol y furfural (Martinez-Hernandez et al., 2018).

3.1.6. Residuos agrícolas del cultivo de piña

Durante el procesamiento de esta fruta quedan desechos de sus hojas y las cáscaras, estos residuos son poco utilizados, pero existen aplicaciones como: en compostaje, en producción de textiles, fabricación de pulpa y papel, alimentación animal, obtención de bromelina, producción de energía y refuerzo en compuestos poliméricos; sin embargo, la mayoría de estas fibras aún se queman (Prado & Spinacé, 2018).

3.2. Contenido lignocelulósico de los residuos agrícolas

El contenido lignocelulósico de la cascarilla de arroz está representado en contenido por lignina (9-26,10%), holocelulosa (56,71%), celulosa (28% - 41,20%), hemicelulosa (12% a 23,23%) (Santos & Silva, 2019) (Nascimento et al., 2016) (Llanos et al., 2016) (J. Vargas et al., 2013) (UPU, n.d.)

En el pseudotallo de plátano resalta la relevante cantidad de celulosa desde (31,21 % a 63,9%), y hemicelulosa desde (10,33 % a 26,67%) (Subagyo y Chafidz, 2020) (Carchi, 2014). El tallo floral también tiene un alto porcentaje de compuestos lignocelulósicos con contenido de lignina de 18.69%, celulosa de 29,86%, y hemicelulosa 34,09% (Carchi, 2014), lo que le permite su aplicación en la industria textil (ropa, hilos y materiales similares), dentro de la nueva tendencia tecnológica para crear nuevos materiales textiles; sin embargo, debido a las características mencionadas se lo considera también como una buena fuente de obtención de CNC.

Entre las características relevantes de la hoja de mazorca de maíz se pueden mencionar el elevado contenido de material lignocelulósico que está representado por celulosa 43,14%, holocelulosa 78.86%, y lignina 23,00% (Prado-Martínez et al., 2012), debido a esta características se lo cataloga como una importante materia prima para la elaboración de fibras suplementarias para el papel; sin embargo, este residuo no tiene mucha explotación; razón por lo cual, puede ser empleado en la obtención de nanocristales de celulosa con el fin de aprovechar satisfactoriamente este residuo agrícola.

El bagazo de caña de azúcar por su elevado contenido de material lignocelulósico que incluye a celulosa (32,44% a 55%), holocelulosa (desde 59-76%), hemicelulosa (de 20 a 27,5%), es un material óptimo para la extracción de CNC. Además, debido a estas propiedades es empleado en la fabricación

de papel y otros materiales biodegradables como: envase de alimentos; por otra parte, su procedencia la hace un material excelente para la proliferación de hongos, proteínas, enzima y otros aditivos. (Prado & Spinacé, 2018) (Teixeira et al., 2015)

La hoja y cascara de piña son residuos provenientes de la producción de piña, y entre sus características se puede encontrar pectina (2,32% y 2,49%, respectivamente) (Sánchez et al., 2014), por lo que estos residuos pueden ser aplicados en la industria alimenticia. En estos residuos también se resalta el gran contenido de material lignocelulósico la hoja de piña con 43,53 % de celulosa, lignina 13,88%, y hemicelulosa en 21,88%; y la cáscara de piña con celulosa de 40,55% a 74%, lignina 10%, y hemicelulosa 28,69%, (Sánchez et al., 2014) (TICSO, 2014), por lo cual, se puede establecer que estos residuos tienen potencial para ser aplicados en la obtención de CNC.

En la **Figura 2** se presenta los porcentajes de celulosa que contienen los residuos estudiados, en el caso de la cascarilla de arroz va desde 28% a 41,20%, el pseudotallo del plátano entre 31,21% a 63,90%, tallo floral de plátano 29.86%, la hoja de mazorca de maíz contiene 43,14%, el bagazo de la caña de azúcar posee 32,44% al 55%, la hoja y cascara de piña 43.53%, 40.55%, respectivamente.

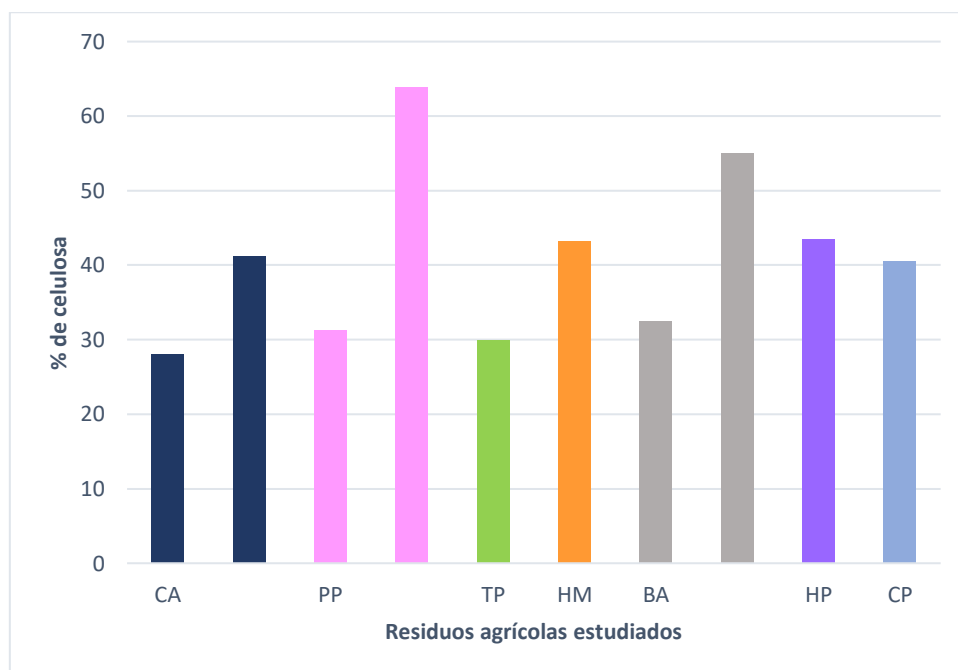


Figura 2. Contenido de celulosa de los residuos agrícolas CA (Cascarilla de arroz), PP (Pseudotallo de plátano), TP (Tallo foral de plátano), HM (Hoja de mazorca de maíz), BA (Bagazo de la caña de azúcar), HP (Hoja de piña), CP (Cascara de piña).

Fuente: (Peralta & Medina, 2021)

3.3. Nanocelulosa

La nanocelulosa se refiere a extractos celulósicos o materiales procesados; se puede dividir en tres tipos:

- Nano fibrillas de celulosa (CNF) o celulosa nano fibrilada (NFC).
- Celulosa bacteriana (BC)
- Nanocristales de celulosa (CNC), celulosa nanocristalina (NCC) o celulosa nanowhiskers (CNW)

Los diferentes tipos de nanocelulosa exhiben distintas propiedades para su aplicabilidad y funcionalidad (Abitbol et al., 2016). En comparación con las nanofibrillas de celulosa y celulosa bacteriana, la funcionalización de nanocristales de celulosa están generando mayor interés en su uso, principalmente debido a sus sorprendentes propiedades mecánicas e interesantes propiedades ópticas (Abitbol et al., 2016).

En la actualidad existe una gran demanda de materiales de alto rendimiento con propiedades mecánicas y físicas, requerimientos que han hecho de la nanocelulosa un material renovable atractivo (Abitbol et al., 2016).

La investigación de la producción de nanocelulosa y su aplicación en materiales compuestos, han ganado cada vez más atención científica, esto se debe a la serie de características físico – químicas presentes en la nanocelulosa, que incluyen: la renovabilidad, el bajo costo de la materia prima para su obtención, su relación superficie vs. volumen, la alta resistencia y rigidez, el bajo coeficiente de expansión térmica y peso, la baja densidad, la alta relación de aspecto, y la biodegradabilidad, entre otros (Kar et al., 2015).

3.3.1. Nanocristales de celulosa

Los nanocristales de celulosa (CNC) son partículas rígidas en forma de varilla (Belitz et al., 2009) y consisten en segmentos de celulosa con una estructura cristalina casi perfecta. Estas varillas poseen diámetros entre 3 a 20 nm (Pech, 2018) y longitudes de 100 a 1000 nm (Pereira & Arantes, 2018), pero varían en sus dimensiones según la fuente de origen (Pech, 2018). En comparación con la celulosa a granel que tiene mayores fracciones amorfas, estos nanocristales exhiben alta resistencia específica, área de superficie alta y propiedades cristalinas líquidas únicas (Belitz et al., 2009).

Los nanocristales de celulosa (CNC) han sido reconocidos como uno de los nanorrellenos más prometedores en la ciencia y la tecnología modernas debido a sus características sobresalientes las cuales dependen de su genética y también del proceso de aislamiento (Verma et al., 2021).

En los últimos años se ha informado un número excepcional de usos de nanocristales de celulosa (Kar et al., 2015), además son uno de los nanomateriales más destacados; adquiere varias propiedades, en particular en biodegradabilidad y bajo costo con estabilidad química. Estas propiedades hacen de los CNC un recurso prometedor para reemplazar los recursos fósiles para la producción de materiales

industriales, químicos y biocombustibles. Los CNC han atraído una gran atención debido a su naturaleza única, como renovable, no tóxico, de alta superficie y la utilización de grupos hidroxilo por su potencial de funcionalización para desarrollar diversos productos y reemplazar materiales tradicionales petroquímicos y no biodegradables. (Aziz et al., 2021).

Entre las aplicaciones de los CNC se puede mencionar la fotónica, películas, espumas, hidrogeles y cristales líquidos, optoelectrónica (Abitbol et al., 2016), y fortalecedores para compuestos, modificación de reología, biomateriales de envasado, cosméticas (Salas et al., 2014). También se utiliza en las preparaciones transdérmicas para mejorar los resultados clínicos (Aziz et al., 2021).

3.3.1.1. Extracción de los nanocristales de celulosa

Se han utilizado diversos materiales ricos en celulosa como materias primas en el proceso de síntesis de CNC, con diferentes enfoques para la preparación de CNC; estos métodos determinan el tamaño, la forma, la morfología y las propiedades estructurales de los nanomateriales de celulosa. (Pandi et al., 2021)

Los métodos para obtener los nanocristales de celulosa se basan en la eliminación de sitios amorfos que conforman las nanofibrillas de la fibra celulósica.

Los tratamientos del método químico son los más aplicados, mientras que los mecánicos y de conservación pueden ser aplicados solos o en conjunto según las condiciones del investigador.

a) Métodos químicos

1. Tratamiento de blanqueo: Es un tratamiento ampliamente utilizado para eliminar la mayor parte de lignina (sustancia de la pared celular de muchas células vegetales, las cuales da dureza y resistencia) y otros componentes con la ayuda de la combinación de agua destilada, después de la agitación de clorito de sodio y ácido acético con la biomasa lignocelulósica (Phanthong et al., 2018).

Las sustancias usadas en este tratamiento (clorito de sodio y ácido acético) suelen agregarse en intervalos de tiempo para controlar el valor del pH, a la mezcla que se mantiene agitada, le sigue un lavado con agua destilada hasta alcanzar un pH neutro (Phanthong et al., 2018).

Los productos sólidos obtenidos se denominan holocelulosa, son de color blanco e incluye hemicelulosa y celulosa (Phanthong et al., 2018); estas fibras se secan a temperaturas entre los 60°C y 130°C, en tiempos que varían de los 90 minutos hasta 6 horas.

2. Tratamiento alcalino: La fibra obtenida de este tratamiento es la celulosa, su proceso consiste en eliminar el polímero amorfo de hemicelulosa, los materiales no celulósicos y el resto de lignina. El alcalino generalmente utilizado es el hidróxido de sodio; con el cual los autores

indican procesos de agitación que van desde 90 minutos a 24 horas. Luego, los productos sólidos obtenidos se lavan por destilación con agua hasta alcanzar el pH neutro (Phanthong et al., 2018); finalmente, la muestra se seca.

3. Hidrólisis ácida: Este método químico involucra la digestión de la celulosa por una solución de ácido a temperaturas que van de los 45 a 60°C en un intervalo de tiempo de 15 minutos a 24 horas, luego la muestra se diluye con agua y se purifica mediante la centrifugación; posteriormente, se aplica sonicación con el fin de romper los agregados y generar una suspensión coloidal; para finalizar el proceso, se somete a la muestra a una diálisis con el fin de eliminar los iones e impurezas con bajo peso molecular (Blanco et al., 2018).

Este método facilita la eliminación de sitios amorfos que se distribuyen regularmente a lo largo de las microfibrillas (Belitz et al., 2009); la reacción de sustitución introduce grupos funcionales en la superficie de los nanocristales de celulosa que ayudan a la estabilización de las suspensiones de nanocelulosa, esto se produce debido a la elevada reactividad del grupo hidroxilo de la celulosa (Castro & Delgado, 2016).

El ácido sulfúrico y clorhídrico suelen ser los reactivos más utilizados (Pech, 2018) debido a que pueden penetrar fácilmente en las regiones amorfas que tienen un bajo nivel de orden e hidrolizadas, sin afectar las regiones cristalinas (Belitz et al., 2009). El ácido sulfúrico ocasiona la protonación del oxígeno cíclico y finalmente la ruptura de enlaces glucosídicos, este proceso produce cadenas más pequeñas de la estructura básica, dependiendo de las condiciones de hidrólisis se producen diferentes rendimientos de celulosa, también se usa los ácidos fosfórico y maleico (Pech, 2018).

b) Métodos mecánicos

1. La ultrasonicación: Es un proceso mecánico en el que se usa el poder oscilante para aislar la nanocelulosa por efecto de las fuerzas hidrodinámicas que son alimentadas por el ultrasonido; para este tratamiento se requiere una baja consistencia de la suspensión de celulosa. Procedimentalmente la suspensión de pulpa diluida se expone a ondas ultrasónicas que a la vez crean ondas alternas de baja presión y alta presión, las que crean y colapsan a la vez pequeñas burbujas de vacío; su eficiencia varía con la concentración y tamaño de la nanocelulosa; así como, la potencia, la temperatura y el tiempo después de la ultrasonicación, finalmente las suspensiones son centrifugadas para recuperar el sobrenadante (Blanco et al., 2018). Autores aplican potencia desde 0,02KHz hasta 25Khz a temperaturas inferiores a 4°C con un tiempo de aplicación de 4 minutos a 12 horas. (Mueller et al., 2014) (Huang et al., 2017) (Meng et al., 2018)
2. El cryocrushing: En este proceso las fibras de celulosa se congelan con nitrógeno líquido y se trituran por la fuerza de cizallamiento con bajo impacto mecánico, donde los cristales de hielo

ejercen presión sobre las paredes celulares, haciendo que se rompan y liberen los fragmentos de nanocelulosa de la pared celular (Blanco et al., 2018).

c) Método de conservación: a este método corresponde la liofilización

1. Liofilización: Es un método que permite prolongar el tiempo de vida útil del elemento, conservando las propiedades físicas y fisicoquímicas. Consiste en una congelación rápida y a baja temperatura para una posterior eliminación por sublimación del agua libre de la fase sólida acompañada de la evaporación de algunas porciones de agua no congelable, los materiales resultantes de este proceso poseen baja actividad de agua, bajos cambios en su volumen y forma, alta capacidad de rehidratación, aumento de porosidad, además presentan estado vítreo. (Ayala et al., 2010).

3.4. Discusión

Los residuos agrícolas arroz, maíz, plátano, caña de azúcar y piña generan biomasa residual en las diferentes etapas del proceso de producción con características físicas y composición química diferente, todos estos residuos son materiales que contienen cantidades importantes de componentes celulósicos, los cuales, con métodos y tratamientos químicos, mecánicos y de conservación en conjunto, permiten la obtención de nanocristales de celulosa.

4. CONCLUSIONES

La revisión documental de los nanocristales de celulosa a partir de residuos agrícolas de la producción de arroz, maíz, plátano, caña de azúcar, y piña, determinó que los mismos tienen un contenido celulósico relevante de aproximadamente el 28%, esto permite señalar que estos residuos son aptos para ser aprovechados en la obtención de nanocristales de celulosa. Es importante indicar que, debido a la elevada producción de estos cultivos, lo que a su vez involucra la ventaja de adquisición de considerables cantidades de residuo, la obtención de nanocristales de celulosa a escala industrial podría tomarse a consideración; además actualmente los nanocristales se presentan en el mercado como un material innovador con gran aceptación. Los métodos de extracción de los nanocristales de celulosa revisados fueron los métodos químicos, mecánicos y de conservación, e incluyen una aplicación conjunta en el proceso de obtención de nanocristales de celulosa a partir de los residuos agroindustriales; entre los procedimientos químicos que se pueden aplicar se encuentran: el tratamiento de blanqueo, el alcalino, y la hidrólisis ácida, los cuales son indispensables en el proceso; entre los métodos mecánicos que se pueden realizar está el tratamiento de ultrasonido y el cryocrushing; y finalmente como un método de conservación, pero no obligatorio se puede utilizar la liofilización.

5. REFERENCIAS

- Abitbol, T., Rivkin, A., Cao, Y., Nevo, Y., Abraham, E., Ben-Shalom, T., Lapidot, S., & Shoseyov, O. (2016). Nanocellulose, a tiny fiber with huge applications. *Current Opinion in Biotechnology*, 39, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.01.002>
- Abril, D., Navarro, E., & Abril, A. (2009). La paja de arroz. Consecuencias de su manejo y alternativas de aprovechamiento. *Revista de La Facultad de Agronomía*, 17, 69–79. https://www.researchgate.net/publication/268872442_La_paja_de_arroz_Consecuencias_de_su_manejo_y_alternativas_de_aprovechamiento
- Arias, R., & Meneses, J. (2016). Caracterización residuos agroindustriales (cascarilla de arroz y cascarilla de café), como materia prima potencial para la obtención de bioetanol. [Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua, Managua]. <https://repositorio.unan.edu.ni/3793/1/53860.pdf>
- Ayala, A., Serna, L. C., & Mosquera, E. (2010). Liofilización de la pitahaya amarilla (*Selenicereus megalanthus*). 121–127. <https://www.redalyc.org/pdf/1698/169815396002.pdf>
- Aziz, T., Ullah, A., Fan, H., Ullah, R., Haq, F., Khan, F. U., Iqbal, M., & Wei, J. (2021). Cellulose Nanocrystals Applications in Health, Medicine and Catalysis. *Journal of Polymers and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02045-1>
- Belitz, H.-D. (Hans-D., Grosch, W. (Werner), & Schieberle, P. (2009). *Food Chemistry*. Springer-Verlag. <https://books.google.com.ec/books?id=IPELBwAAQBAJ&pg=PA92&dq=Food+Chemistry&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjVyv32s-bpAhVSoFsKHUahDsoQ6AEIMjAB#v=onepage&q=Food+Chemistry&f=false>
- Blanco, A., Monte, M. C., Campano, C., Balea, A., Merayo, N., & Negro, C. (2018). Nanocellulose for Industrial Use : Cellulose Nanofibers (CNF), Cellulose Nanocrystals (CNC), and Bacterial Cellulose (BC). In *Handbook of Nanomaterials for Industrial Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813351-4.00005-5>
- Burgos, J. (2015). Estudio de la lámina óptima de riego para el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) en la parroquia San Carlos del cantón Naranjal - provincia del Guayas [Universidad de Guayaquil]. http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/8373/1/Burgos_Valencia_Julio.pdf
- Carchi, D. (2014). Aprovechamiento de los Residuos Agrícolas provenientes del cultivo de Banano para obtener Nanocelulosa [Universidad de Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/5292/1/tesis.pdf>
- Castro, F., & Delgado, F. (2016). La nanocelulosa : propiedades y aplicaciones. <https://www.ineel.mx/boletin022016/divulga.pdf>
- CFN. (2017). Ficha sectorial: Banano y plátanos. <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/2017/09/Ficha-Sectorial-Banano.pdf>
- Collazo-Bigliardi, S., Ortega-Toro, R., & Chiralt, A. (2018). Isolation and characterisation of microcrystalline cellulose and cellulose nanocrystals from coffee husk and comparative study with rice husk. *Carbohydrate Polymers*, 191, 205–215. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.022>
- de Oliveira, J., Pinheiro, G., Oliveira, K., Mello, S., Sileira da Rosa, G., Guerra, A., & da Rosa Zavareza, E. (2017). Cellulose fibers extracted from rice and oat husks and their application in hydrogel. *Food Chemistry*, 221, 153–160. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.048>
- Huang, S., Zhou, L., Mei-Chun, L., Wu, Q., & Zhou, D. (2017). Cellulose Nanocrystals (CNCs) from Corn Stalk :Activation Energy Analysis. *Materials*, 1–13. <https://doi.org/10.3390/ma10010080>
- Kar, K., Pandey, J., & Rana, S. (2015). *Handbook of Polymer Nanocomposites. Processing, Performance and Application*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-45229-1>
- Kaur, M., Kumari, S., & Sharma, P. (2018). Chemically Modified Nanocellulose from Rice Husk : Synthesis and Characterisation. *AIR*, 13(3), 1–11. <https://doi.org/10.9734/AIR/2018/38934>
- Llanos, O., Ríos, A., Jaramillo, C., & Rodríguez, L. (2016). La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación. *Producción + Limpia*, 11(2), 150–160. <https://doi.org/10.22507/pml.v11n2a12>
- Martinez-Hernandez, E., Amezcua-Allieri, M., Sadhukhan, J., & Anell, J. A. (2018). Sugarcane Bagasse Valorization Strategies for Bioethanol and Energy Production. In *Sugarcane - Technology and Research*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72237>
- Maté, B. (2017). Usos de las hojas del maíz. *EHow En Español*. https://www.ehowenespanol.com/usos-hojas-del-maiz-info_50053/
- Mazzeo, M., Libardo, L., Luis, M., Guerrero, L., & Botero, J. (2010). Aprovechamiento industrial de residuos de cosecha y poscosecha del plátano en el departamento de caldas. *Revista Educación En Ingeniería*, 128–139. https://www.acofi.edu.co/revista/Revista9/2010_I_02.pdf
- Meng, F., Wang, G., Du, X., Wang, Z., Xu, S., & Zhang, Y. (2018). Preparation and characterization of cellulose nanofibers and nanocrystals from liquefied banana pseudo-stem residue. *Composites Part B : Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.048>
- Mueller, S., Weder, C., & Foster, E. J. (2014). RSC Advances Isolation of cellulose nanocrystals from pseudostems of banana plants. *Royal Society of Chemistry*, 907–915. <https://doi.org/10.1039/c3ra46390g>

- Nascimento, P., Marim, R., Carvalho, G., & Mali, S. (2016). Nanocellulose Produced from Rice Hulls and its Effect on the Properties of Biodegradable Starch Films. *Materials Research*, 19(1), 167–174. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2015-0423>
- Naveda, R., Jorge, P., Flores del Pino, L., & Lizardo, V. (2019). Remoción de lignina en el pretratamiento de cascarilla de arroz por explosión con vapor. *Revista Social Química de Perú*, 85(3), 352–361. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1810-634X2019000300007&script=sci_arttext
- Pandi, N., Sonawane, S. H., & Anand Kishore, K. (2021). Synthesis of cellulose nanocrystals (CNCs) from cotton using ultrasound-assisted acid hydrolysis. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105353. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105353>
- Pech, S. C. (2018). Obtención y modificación de nanocristales de celulosa de residuos de Agave Tequilana Weber para la producción de nanorefuerzos para Poli (ácido láctico) [Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.]. https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1271/1/PCM_D_Tesis_2018_Soledad_Pech.pdf
- Pereira, B., & Arantes, V. (2018). Nanocelluloses From Sugarcane Biomass. In *Advances in Sugarcane Biorefinery: Technologies, Commercialization, Policy Issues and Paradigm Shift for Bioethanol and By-Products* (pp. 179–196). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804534-3.00009-4>
- Phanthong, P., Reubroycharoen, P., Hao, X., Xu, G., Abudula, A., & Guan, G. (2018). Nanocellulose: Extraction and application. *Carbon Resources Conversion*, 1(1), 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2018.05.004>
- Prado-Martínez, M., Anzaldo-Hernández, J., Becerra-Aguilar, B., Palacios-Juárez, H., Vargas-Radillo, J., & Rentería-Urquiza, M. (2012). Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta. *Madera y Bosques*, 18(3), 37–51. <http://myb.ojs.inecol.mx/index.php/myb/article/view/357>
- Prado, K., & Spinacé, M. (2018). Isolation and characterization of cellulose nanocrystals from pineapple crown waste and their potential uses. *International Journal of Biological Macromolecules*. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.187>
- Quezada, J. (2015). Determinación e información del consumo de jugo de caña pasteurizado y embotellado, en la ciudadela urdesa de la ciudad de Guayaquil y la elaboración de un plan de mercadeo [Universidad de Guayaquil]. http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/7987/1/TESIS_JONATHAN.pdf
- Rezanezhad, S., Nazanezhad, N., & Asadpur, G. (2013). Isolation of Nanocellulose from Rice Waste via Ultrasonication. *Lignocellulose*, 2(Bharadwaj 2004), 282–291.
- Salas, C., Nypelö, T., Rodríguez-Abreu, C., Carrillo, C., & Rojas, O. J. (2014). Nanocellulose properties and applications in colloids and interfaces. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 19(5), 383–396. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2014.10.003>
- Sánchez, M., Ramos, M., Mora, R., & Jimenéz, E. (2014). Chemical Characterisation of the Industrial Residues of the Pineapple (*Ananas comosus*). *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 3, 53–56. <https://doi.org/10.4236/jacen.2014.32B009>
- Santos, J., & Silva, C. (2019). Obtención de celulosa a partir de cascarilla de arroz mediante hidrólisis ácida.
- Subagyo, A., & Chafidz, A. (2020). Banana Pseudo-Stem Fiber: Preparation, Characteristics, and Applications. In *Banana Nutrition - Function and Processing Kinetics*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.82204>
- Teixeira, S., Arenales, A., Eunice De Souza, A., Da Silva Magalhães, R., Vilche, A., Aquino, D., & Freire, R. (2015). Sugarcane bagasse: Applications for energy production and ceramic materials. *Journal of Solid Waste Technology and Management*, 41(3), 229–238. <https://doi.org/10.5276/JSWTM.2015.229>
- Thorat, R., & Bobade, H. (2018). Utilization of banana pseudo stem in food applications. *Internacional Journal Agricultural Engineering*, 11, 86–89. <https://doi.org/10.15740/HAS/IJAE/11>
- TICSO. (2014). Aprovechamiento residuos biomasa de producción de piña (ananas comosus) para municipio de aguazul casanare. http://aguazulcasanare.micolombiadigital.gov.co/sites/aguazulcasanare/content/files/000022/1068_docfinalbio masapia_1.pdf
- UPU. (n.d.). Cascarilla de arroz. Retrieved July 13, 2020, from <http://www.upv.es/resiagri/ficheros/i0106.pdf>
- Vargas, J., Alvarado, P., Vega-Baudrit, J., & Porras, M. (2013). Caracterización del subproducto cascarillas de arroz en búsqueda de posibles aplicaciones como materia prima en procesos. *Revista Científica*, 23(1). <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5069938.pdf>
- Vargas, Y., & Pérez, L. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 1(1). <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>
- Verma, C., Chhaged, M., Gupta, P., Roy, S., & Maji, P. K. (2021). Isolation of cellulose nanocrystals from different waste bio-mass collating their liquid crystal ordering with morphological exploration. *International Journal of Biological Macromolecules*, 175, 242–253. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.038>

Contribución de autores

| Autor | Contribución |
|---------------------------------|---|
| Wendy Elizabeth Peralta Holguín | Concepción, adquisición de datos e información bibliográfica, diseño de metodología, redacción del artículo, construcción de gráficos, análisis e interpretación. |
| Carlos Alcibar Medina Serrano | Revisión del documento y validación. |

Citación sugerida: Peralta, W., Medina, C. (2021). El papel de los residuos agrícolas en la extracción de nanocristales de celulosa. Revista Bases de la Ciencia, 6(2), 57-74. DOI: https://doi.org/10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v%vi%i.3009
Recuperado de: <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Basedelaciencia/article/view/3009>

