

BIODEGRADABILIDAD DE BIOPOLÍMEROS A BASE DE ALMIDÓN DE YUCA (MANIHOT ESCULENTA CRANTZ) CON LÍQUIDO DE LA CÁSCARA DE NUEZ DEL ANACARDO

RECIBIDO: 24/01/2023 ACEPTADO: 20/03/2023 ÚLTIMA VERSIÓN: 10/04/2023

BIODEGRADABILITY OF BIOPOLYMERS BASED ON CASSAVA STARCH (MANIHOT ESCULENTA CRANTZ) WITH CASHEW NUTSHELL LIQUID

Yair Alfonso Vega Vega [1]
Profesor de Catedra del Departamento de Biología y Química

Álvaro Ángel Arrieta Almario [2]
Profesor de Planta del Departamento de Biología y Química

Sergio Luis Flórez Seña [3]
Profesor del Liceo Panamericano Campestre

RESUMEN

El almidón ha sido protagonista en diferentes estudios como producción de hidrogeles y en procesos de recubrimiento, específicamente en síntesis de biopelículas. Se ha observado que la temperatura y la humedad influyen desfavorablemente en el carácter hidrofílico del almidón, puesto que ocasionan una baja estabilidad y degradación acelerada a las biopelículas. Por esta razón, existe la necesidad de incorporar un nuevo componente que permita mitigar este inconveniente. Un buen candidato es el líquido obtenido de la cáscar a de nuez del anacardo, ya que posee una serie de compuestos fenólicos como el ácido anacárdico, cardol y cardanol, los cuales han arrojado resultados muy satisfactorios, gracias a sus propiedades. Por lo anterior, el propósito de esta investigación fue estudiar el proceso de biodegradabilidad de biopolímeros a base de almidón de yuca (Manihot esculenta crantz) con líquido de la cáscara de nuez del anacardo, teniendo en cuenta la composición y pH del biopolímero. Las biopelículas fueron caracterizadas por Espectroscopía de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR). Los espectros mostraron los grupos funcionales del almidón y líquido de la cáscara de nuez del anacardo presentes en el biopolímero, evidenciando la interacción química entre estos dos componentes. Además, la biodegradabilidad mostró dependencia con la composición y pH de las biopelículas, siendo pH 12 y mayor concentración de aceite de la cáscara de nuez del anacardo aquella que presentó mejor el proceso.

PALABRAS CLAVE

Almidón, líquido de la cáscara de nuez del anacardo, biopolímeros, biodegradabilidad.

[1] Profesor de Catedra del Departamento de Biología y Química - Universidad de Sucre, UDS, Colombia - yair.vega@unisucrevirtual.edu.co

[2] Profesor de Planta del Departamento de Biología y Química - Universidad de Sucre, UDS, Colombia - alvaro.arrieta@unisucre.edu.co

[3] Profesor del Liceo Panamericano Campestre - Departamento de Sucre, Colombia - docentesergio@gmail.com

ABSTRACT

Starch has been the protagonist in different studies such as the production of hydrogels and in coating processes, specifically in biofilm synthesis. It has been observed that temperature and humidity have an unfavorable influence on the hydrophilic character of starch, since they cause low stability and accelerated degradation of biofilms. For this reason, there is a need to incorporate a new component that can mitigate this drawback. A good candidate is the liquid obtained from the cashew nut shell, since it has a series of phenolic compounds such as anacardic acid, cardol and cardanol, which have yielded very satisfactory results, thanks to their properties. Therefore, the purpose of this research was to study the biodegradability process of biopolymers based on cassava starch (Manihot esculenta crantz) with cashew nutshell liquid, taking into account the composition and pH of the biopolymer. The biofilms were characterized by Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). The spectra showed the functional groups of the starch and cashew nutshell liquid present in the biopolymer, evidencing the chemical interaction between these two components. Furthermore, biodegradability showed dependence on the composition and pH of the biofilms, with pH 12 and the highest concentration of cashew nutshell oil being the one that presented the best process.

KEYWORDS

Starch, cashew nutshell liquid, biopolymers, biodegradability.

RESUMO

O amido tem sido protagonista em diversos estudos como na produção de hidrogéis e em processos de revestimento, especificamente na síntese de biofilmes. Observou-se que a temperatura e a umidade influenciam desfavoravelmente o caráter hidrofílico do amido, pois causam baixa estabilidade e degradação acelerada dos biofilmes. Por esta razão, existe a necessidade de incorporar um novo componente que possa mitigar esta desvantagem. Um bom candidato é o líquido obtido da casca da castanha de caju, pois possui uma série de compostos fenólicos como ácido anacárdico, cardol e cardanol, que têm produzido resultados muito satisfatórios, graças às suas propriedades. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi estudar o processo de biodegradabilidade de biopolímeros à base de fécula de mandioca (Manihot esculenta crantz) com líquido de casca de castanha de caju, levando em consideração a composição e o pH do biopolímero. Os biofilmes foram caracterizados por Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). Os espectros mostraram os grupos funcionais do amido e do líquido da casca da castanha de caju presentes no biopolímero, evidenciando a interação química entre esses dois componentes. Além disso, a biodegradabilidade apresentou dependência da composição e do pH dos biofilmes, sendo o pH 12 e a maior concentração de óleo de casca de castanha de caju o que apresentou melhor processo.

PALAVRAS-CHAVE

Amido, líquido da casca da castanha de caju, biopolímeros, biodegradabilidade.

SUMARIO

1. Introducción. 1.1. Almidón. 1.1.1. Estructura y características. 1.1.2. Métodos de extracción. 1.1.3. Técnicas de caracterización. 1.1.4. Aplicabilidad. 1.2. Líquido de la cáscara de nuez del anacardo. 1.2.1. Generalidades del líquido de la cáscara de nuez del anacardo. 1.2.2. Obtención y recolección de la materia prima. 1.3. Biodegradabilidad. 2. Método. 2.1. Extracción de los principales componentes del biopolímero. 2.1.1. Almidón. 2.1.2. Líquido de la cáscara de nuez del anacardo. CNSL. 2.2. Síntesis de biopolímeros. 2.3. Caracterización espectroscópica. 2.4. Proceso de biodegradabilidad. 3. Resultados. 3.1. Extracción y caracterización de los componentes. 3.1.1. Almidón. 3.1.2. Líquido de la cáscara de nuez del anacardo. 3.2. Síntesis y caracterización de biopolímeros. 3.3. Proceso de biodegradabilidad. 4. Discusión y conclusiones. 4.1. Discusión. 4.1.1. Extracción y caracterización de los componentes. 4.1.1.1. Almidón. 4.1.1.2. Líquido de la cáscara de nuez del anacardo. 4.1.2. Síntesis y caracterización de biopolímeros. 4.1.3. Proceso de biodegradabilidad. 4.2. Conclusiones. 5. Referencias bibliográficas.

CONTENTS

1. Introduction. 1.1. Starch. 1.1.1. Structure and characteristics. 1.1.2. Extraction methods. 1.1.3. Characterization techniques. 1.1.4. Applicability. 1.2. Cashew nutshell liquid. 1.2.1. Generalities of cashew nutshell liquid. 1.2.2. Obtaining and collecting raw material. 1.3. Biodegradability. 2. Method. 2.1. Extraction of the main components of the biopolymer. 2.1.1. Starch. 2.1.2. Cashew nutshell liquid. CNSL. 2.2. Synthesis of biopolymers. 2.3. Spectroscopic characterization. 2.4. Biodegradability process. 3. Results. 3.1. Extraction and characterization of the components. 3.1.1. Starch. 3.1.2. Cashew nutshell liquid. 3.2. Synthesis and characterization of biopolymers. 3.3. Biodegradability process. 4. Discussion and conclusions. 4.1. Discussion. 4.1.1. Extraction and characterization of components. 4.1.1.1. Starch. 4.1.1.2. Cashew nutshell liquid. 4.1.2. Synthesis and characterization of biopolymers. 4.1.3. Biodegradability process. 4.2. Conclusions. 5. Bibliographic references.

Traducción de Yair Vega (Magister en ciencias químicas, Universidad de Sucre)

1. INTRODUCCIÓN

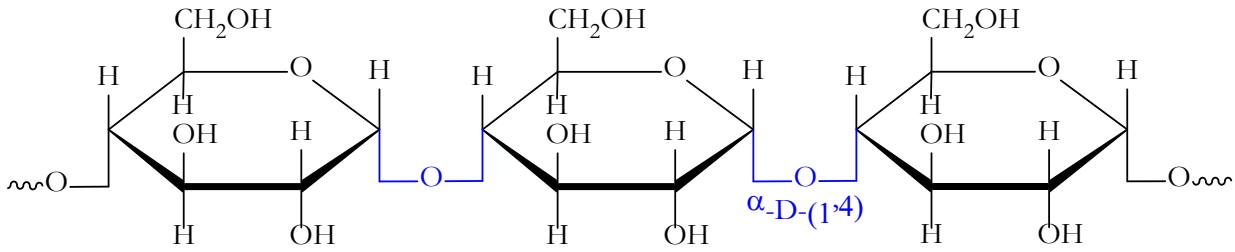
1.1. ALMIDÓN

1.1.1. ESTRUCTURA Y CARACTERÍSTICAS

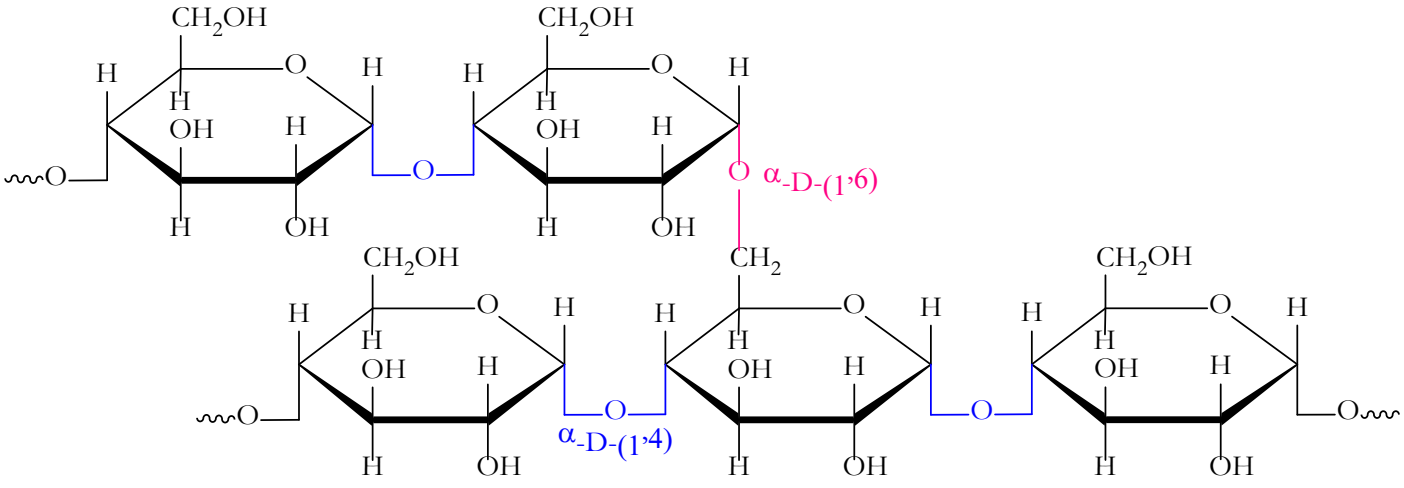
El almidón es un polímero natural con un alto porcentaje de abundancia, puede estar presente en diferentes fuentes vegetales como la yuca, maíz, arroz, trigo, papa, patata, aguacate, entre otras (Araújo et al., 2020; Chiaregato & Faez, 2021). Esta macromolécula es disponible, renovable, versátil, biodegradable y, sobre todo, económica. Está formada por monómeros de D-glucosa que se unen mediante enlaces glucosídicos α-D-(1➔4) y/o α-D-(1➔6), así mismo, la estructura del almidón consta principalmente de amilosa y amilopectina, que representan alrededor del 98-99 % de la masa del almidón y algunos componentes minoritarios como proteínas, lípidos y minerales que pueden ser extraídos con alta pureza (Araújo et al., 2020; Chen et al., 2018; Qamruzzaman et al., 2022).

La amilosa y amilopectina presentan diferencias es su estructura, ver Figura 1, ya que la amilosa (que constituye alrededor del 25-30 % del gránulo de almidón) posee una cadena lineal formada por unidades de D-glucosa interconectadas por enlaces glucosídicos α-D-(1➔4) (región amorfa), por su parte, la amilopectina (que constituye alrededor del 70-75 % del gránulo de almidón) presenta una estructura ramificada con cadenas cortas de D-glucosa interconectadas por enlaces glucosídicos α-D-(1➔4), donde los enlaces glucosídicos α-D-(1➔6) conectan la cadena corta en los llamados puntos de ramificación, que ocurren cada 25-30 unidades de glucosa (región cristalina) (Chen et al., 2020; Chiaregato & Faez, 2021; Gautam et al., 2021; Ghobashy, 2019; Sarkar et al., 2021; G. M. de S. Silva et al., 2020). Según la fuente vegetal de almidón, la proporción relativa de amilosa y amilopectina difiere y afecta tanto el orden molecular como la cristalinidad. Por tanto, las propiedades físicas y químicas del almidón están determinadas por su composición y estructura (Qamruzzaman et al., 2022; Supare & Mahanwar, 2022).

Ilustración 1. Estructura de la amilosa y amilopectina en el almidón



a. Amilosa



b. Amilopectina

Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

En la Figura 1, se observa que tanto la amilosa como la amilopectina presentan grupos hidroxilo (–OH) en sus estructuras, esto proporciona al almidón una alta reactividad ya que puede oxidarse, reducirse y formar enlaces de hidrógeno. Además, gracias a estos grupos –OH, el almidón posee un carácter hidrofílico, permitiendo así que las moléculas de agua pueden cambiar la interacción interna y los arreglos morfológicos del mismo. Por esta razón, varias propiedades del almidón, como las propiedades físicas y mecánicas y la temperatura de transición vítrea, dependen del contenido de agua. Una de las propiedades importantes del almidón es su completa biodegradabilidad en diferentes ambientes, esto se debe a la vulnerabilidad que tiene frente a los microorganismos (acción microbiana), o bien, por reacción enzimática, en las cuales la glucosa se obtiene por hidrólisis (Qamruzzaman et al., 2022).

1.1.2. MÉTODOS DE EXTRACCIÓN

Cada materia prima requiere de un proceso adecuado para extraer el almidón, puesto que difieren en el contenido de este compuesto (Vilpoux et al., 2018). Algunos métodos de extracción requieren de azufre, otros utilizan enzimas, álcalis, o bien, extracción acuosa (Correia & Beirão-Da-Costa, 2012). Siendo esta última la más común y, dependiendo de la fuente de almidón puede dar como resultado gránulos con proteínas y lípidos residuales (Salgado-Ordosgoitia et al., 2018). Ahora, la extracción alcalina con hidróxido de sodio (NaOH), dimetilsulfóxido (DMSO) y metabisulfito de sodio (Na2S2O5), da como resultado gránulos con bajos niveles de proteína y lípidos residuales, además, proporciona un mayor rendimiento y mejora las propiedades del almidón (Falade & Okafor, 2015; Jiang et al., 2013). Así, la selección del método de extracción depende del rendimiento, de la materia prima utilizada y de las propiedades deseadas para las aplicaciones del almidón (Pires et al., 2021).

Teniendo en cuenta lo anterior, en un estudio realizado por Torres et al., 2020, se desarrolló un método de extracción convencional para la respectiva extracción del almidón presente en las patatas. Dicho proceso se dividió en varias etapas: Primeramente, se peló, cortó y trituró la papa; a continuación, se mezcló la pulpa molida con agua en proporción 1:2 (sólido: líquido) durante 60 min a 200 rpm. Luego, con la ayuda de un tamiz de malla de 80 µm, se filtró con el fin de separar la pulpa del líquido. Posteriormente, se lavó la pulpa para retirar el almidón restante y se dejó enfriar el sistema por 24 h, pasado este tiempo, se eliminó el sobrenadante y se recogió el sedimento, almidón. Por último, se secó el almidón a 40 °C durante 48 h, y se almacenó en recipientes de plástico cerrados a temperatura ambiente para su posterior análisis (Torres et al., 2020).

Así mismo, Silva et al., 2020 logró extraer el almidón de acuerdo con el siguiente procedimiento: inicialmente los tubérculos fueron separados de contaminantes e impurezas, seleccionados y desinfectados en agua clorada (100 ppm) por 15 min, lavados con agua potable, pelados y molidos en licuadora industrial. La pulpa suspendida se tamizó a través de mallas de 0.149 mm y 0.079 mm, el residuo se descartó. Luego, el sedimento se lavó 4 veces con agua fría y se purificó con alcohol absoluto, se filtró y se secó a 35 °C durante 12 h en un horno de circulación de aire. El almidón seco obtenido se molió (malla 48) y se envasó en bolsas de polietileno para su posterior análisis. El rendimiento de extracción se analizó por la relación entre la masa de almidón extraído y la masa de materia prima estudiada, siendo expresada en porcentaje (G. M. de S. Silva et al., 2020). Procedimientos análogos fueron realizados por Da Silva et al., 2020 (L. R. da Silva et al., 2020) y Zoungranan et al., 2020 (Zoungranan et al., 2020), con algunas pequeñas modificaciones.

Ahora, como la idea está encaminada en la optimización de nuevas metodologías para la extracción del almidón, resulta conveniente resaltar la técnica de extracción asistida por microondas, la cual se considera como un “método verde” y segura para extraer polímeros como el almidón debido a su facilidad y posibilidad de usar, solamente, agua como solvente de extracción (Galanakis, 2012; Lara-Flores et al., 2018). El mecanismo de extracción por microondas se fundamenta en el calentamiento inducido por la radiación de microondas, que crea un momento dipolar provocado por la agitación de las moléculas de agua dentro del material de extracción, esto genera poros o rotura del material vegetal y, en consecuencia, una mayor liberación de compuestos (Kala et al., 2016). Este tipo de extracción presenta varias ventajas respecto a otros métodos como reducción de los tiempos de extracción, mayor rendimiento de extracción y menor consumo de solventes (Araújo et al., 2020).

Otro método para extraer el almidón que brinda mayor eficiencia y muy amigable con el medio ambiente (ya que no utiliza solventes orgánicos), es la extracción asistida por ultrasonido (UAE). Esta técnica de extracción utiliza el efecto de cavitación causado por ondas ultrasónicas en un medio líquido para romper la pared celular (Chemat et al., 2011, 2017). Como los gránulos de almidón en la yuca quedan atrapados por las fibras de celulosa unidas con pectina en las paredes celulares (Setyaningsih et al., 2021), la UAE desencadena la rápida liberación de analitos en el solvente de extracción (Azmir et al., 2013). Este método fue desarrollado por Setyaningsih et al., 2021, utilizando una sonda ultrasónica UP200St 200 W, 26 kHz (Hielscher, Alemania). En este estudio, se pesaron 15 g de harina de yuca y se depositaron en un vaso de precipitado. A continuación, se adicionó una cantidad específica de agua destilada, como solvente de extracción. Luego, la mezcla se extrajo durante 10 min a temperatura ambiente usando UAE. La solución resultante, se filtró para eliminar el material sólido y, el extracto se depositó y se secó en un secador de gabinete (AM-TD24, Yogyakarta, Indonesia) a 50 °C por 24 h. Por último, el almidón obtenido se empacó en bolsas de polietileno para su posterior análisis (Setyaningsih et al., 2021).

En un estudio reciente realizado por Zukryandry et al., 2021, se logró extraer almidón de una muestra de yuca utilizando un baño ultrasónico. La metodología utilizada en este trabajo fue dividida en dos etapas, en la primera, se pesaron 150 gramos de yuca rallada y se depositaron en un vaso de precipitado, posteriormente, se adicionaron 300 ml de agua destilada, luego se filtró y se recogió el filtrado. El filtrado se colocó en un tubo (diámetro interior de 20 mm) y se introdujo en un sistema de baño ultrasónico a 40 °C por 0, 10, 20, 30 y 40 min (según tratamiento) al 80 % de potencia máxima. A continuación, los resultados de la extracción se filtran mediante un evaporador al vacío hasta obtener un extracto espeso. El siguiente proceso es una deposición de 1 h. El almidón obtenido se secó en un secador de armario a una temperatura de 55 °C hasta alcanzar un contenido de humedad del 12-14 %. Después del secado, el almidón fue molido y tamizado con un tamiz de malla 90 µm. Finalmente, el almidón obtenido se guardó en bolsas de polietileno para su posterior análisis (Zukryandry et al., 2021).

1.1.3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

El almidón extraído de diferentes fuentes vegetales puede ser caracterizado por diferentes técnicas como espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), resonancia magnética nuclear de carbono 13 (RMN 13C), análisis termogravimétrico (TGA), microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (XRD), espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis), espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS), análisis térmico diferencial (DTG) y calorimetría diferencial de barrido (DSC). (Chiaregato & Faez, 2021; L. R. da Silva et al., 2020; Dong et al., 2021; Junlapong et al., 2020; Pires et al., 2021; Qiao et al., 2016, 2019; G. M. de S. Silva et al., 2020; Zhang et al., 2020).

1.1.4. APLICABILIDAD

En los últimos años, el almidón (y sus derivados) se ha convertido en blanco de interés para un sin número de investigadores, gracias a las diversas propiedades tanto físicas como químicas que le brindan credibilidad para ser utilizado en diferentes aplicaciones de investigación científica. Por tanto, las propiedades espesantes, gelificantes, estabilizadoras y aglutinantes hacen del almidón un ingrediente ampliamente utilizado en alimentos, cosméticos, productos farmacéuticos, textiles, materiales biodegradables y otros productos industriales (Araújo et al., 2020). Además, el almidón extraído de diferentes fuentes vegetales, ha sido protagonista en la formación de hidrogeles, procesos de recubrimientos, o bien, procesos de encapsulación de liberación lenta y/o controlada (Chiaregato & Faez, 2021; Ibrahim et al., 2019; Junlapong et al., 2020; Salimi et al., 2020; Sarkar et al., 2021; Savitri et al., 2019; Supare & Mahanwar, 2022; Vudjung & Saengsuwan, 2018; Zafar et al., 2021), puesto que la adición de almidón en los procesos de liberación lenta podría tener ventajas prometedoras como i) reducción del costo de producción, ii) mejora de la propiedad de biodegradación, iii) promoción del crecimiento de las plantas y iv) desarrollo de métodos sostenibles y ecológicos (Salimi et al., 2020). Por ejemplo, Vudjung et al., 2018 desarrolló hidrogeles biodegradables de red polimérica interpenetrante (IPN) basados en caucho natural prevulcanizado (NR) y almidón de yuca (St) utilizando azufre (S) y glutaraldehído (GA) como reticulantes en forma de solución como membrana de recubrimiento para fertilizantes nitrogenados de liberación lenta. Como resultados de esta investigación, se encontró que la fracción soluble, el hinchamiento del agua y la permeabilidad al agua del hidrogel IPN NR/St aumentaron con la proporción de St, mientras que la fracción de gel disminuyó. La biodegradación del hidrogel IPN NR/St mejoró significativamente con el aumento del contenido de St. El IPN NR/St óptimo fue 70:30. La liberación de urea del material W-IPN-CUB podría prolongarse hasta 24 días en comparación con la UB nativa (3 días) (Vudjung & Saengsuwan, 2018).

En otro estudio realizado por Savitri et al., 2019 se estudió el comportamiento de liberación controlada de fósforo recubierto con material a base de almidón-quitosano mediante la técnica de pulverización. En dicha investigación se encontró que la absorción de agua del fertilizante recubierto era mayor respecto al fertilizante convencional sin recubrimiento. Además, la condición óptima del recubrimiento a base de almidón-quitosano fue de 30:70 y 2 % del porcentaje de almidón. Por otro lado, el microscopio electrónico de barrido (SEM) mostró que cuanto mayor era el contenido de quitosano, mayor era la capacidad de absorción de agua (Savitri et al., 2019).

Otro estudio que involucra al almidón fue desarrollado por Junlapong et al., 2020, el cual sintetizó hidrogeles superabsorbentes a base de poliacrilamida (PAM) y almidón de yuca (CS), utilizando el método de polimerización radical. En este estudio, se observó el injerto exitoso del PAM en el almidón gracias a los espectros FTIR. Además, las micrografías SEM revelaron una estructura porosa interconectada que exhibió una red de poros más densa y una disminución en el tamaño de los poros a medida que aumentaba la cantidad de CS. Como resultado más relevante de este estudio, se encontró que el hidrogel que contenía 50 % en peso de CS (CS50) mostró una excelente absorción de agua de > 8000 %, que fue mucho mayor respecto al hidrogel CS0 (PAM puro). Este hidrogel CS50 eliminó > 85 % de azul de metileno (MB) en 50 % de MB en solución. Además, se degradó en un 80 % en 30 días, mientras que el PAM puro solo se degradó en un 22 % (Junlapong et al., 2020).

En otra investigación llevada a cabo por Chiaregato et al., 2021, se desarrollaron microesferas de almidón (CS) con diferentes micronutrientes (Cu, Fe, Mn), utilizando la técnica spray-drying con el fin de disminuir la pérdida de dichos micronutrientes. En este estudio se encontró que la liberación del micronutriente presentó una forma bifásica de ráfaga, liberando el 55 % de Mn, 70 % de Cu y 91 % de Fe, con una cinética de liberación regida principalmente por el modelo Peppas-Sahlin (ajustado a todos los materiales). Además, la liberación ocurrió más lentamente cuando tuvo lugar el hinchamiento por relajación de la cadena polimérica. Así, las microesferas elaboradas permitieron reducir la pérdida de micronutrientes (Chiaregato & Faez, 2021).

Asimismo, Zafar et al., 2021 preparó muestras de urea encapsulada mediante un recubridor/granulador de lecho fluidizado. Para tal recubrimiento de los gránulos de urea, se utilizó el almidón y alcohol polivinílico (PVA) en combinación con ácido acrílico (AA), ácido cítrico (CA) y ácido maleico (MA). Dentro de los resultados obtenidos en este estudio, se encontró que tanto el análisis morfológico (SEM) como la técnica XRD indicaron que se produjo un nuevo recubrimiento uniforme sin nueva transformación de fase. Además, todas las muestras de urea recubiertas mejoraron el rendimiento del follaje de las plantas de espinaca, el contenido de clorofila, la absorción de N y la recuperación aparente de nitrógeno (ANR) respecto a la urea no recubierta y las plantas de control. Sin embargo, USP-A2 y USP-C2 mostraron resultados muy satisfactorios respecto a las demás ya que obtuvieron mayores resistencias de trituración: 12.08 y 13.67 N con una eficiencia de liberación de nitrógeno de 70.10 y 50.74 % respectivamente (Zafar et al., 2021).

Recientemente, Supare & Mahanwar, 2022, preparon hidrogeles de base biológica (almidón y quitosano) cargados de herbicidas para estudiar el mecanismo de liberación. Como resultado de este trabajo, se encontró que el análisis termogravimétrico proporcionó información valiosa acerca de la estabilidad térmica de los hidrogeles obtenidos. Asimismo, se realizó calorimetría diferencial de barrido con el fin de conocer la liberación inicial de agua atrapada en la matriz de hidrogel y relacionar las estructuras con la velocidad de liberación. Además, la morfología de los hidrogeles por SEM, permitió establecer la relación con las estructuras de hidrogel

correspondientes. Por último, se evaluó el grado de hinchazón del equilibrio, la dinámica de liberación de atrazina y el mecanismo de difusión. La hinchazón afectó significativamente el comportamiento de liberación, y los hidrogeles preparados con glioxal mostraron la tasa de liberación más baja de atrazina, alcanzando la vitalidad de liberación de 500 h (Supare & Mahanwar, 2022).

1.2. LIQUÍDO DE LA CÁSCARA DE NUEZ DEL ANACARDO

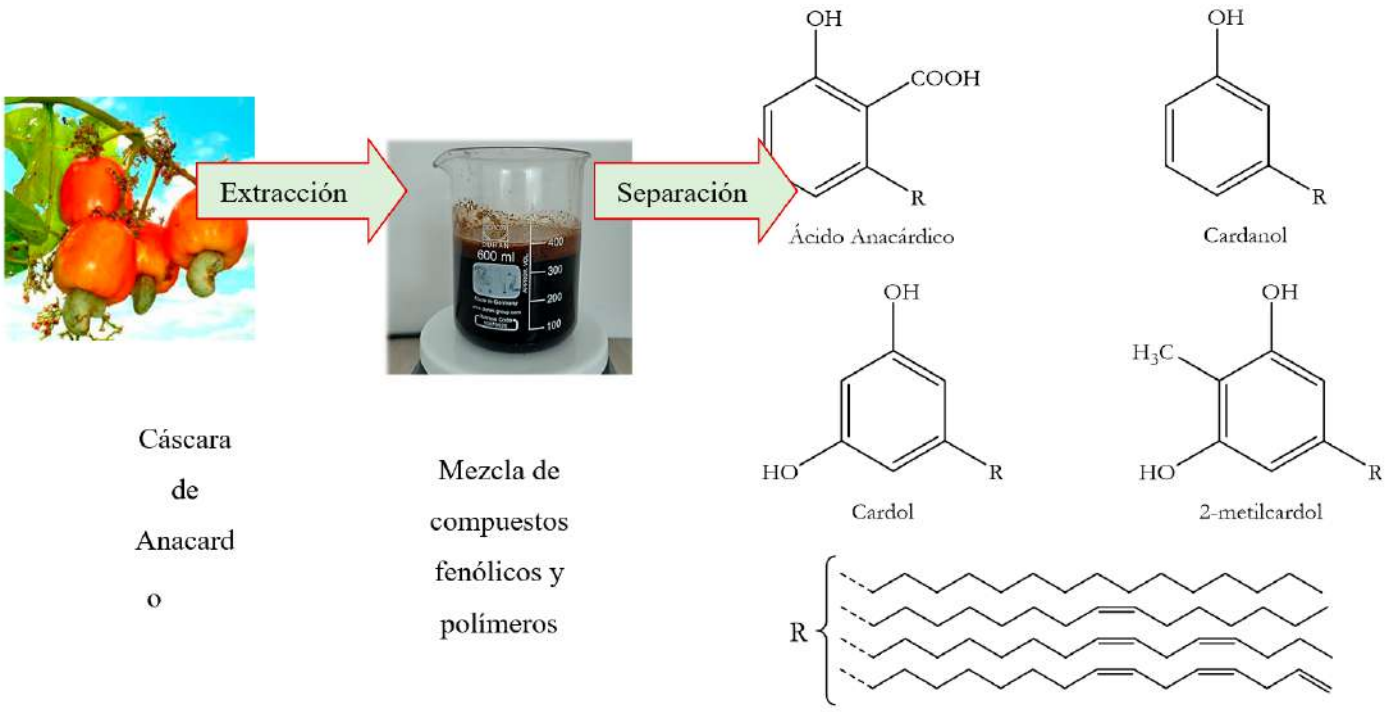
1.2.1. GENERALIDADES DEL LÍQUIDO DE LA CÁSCARA DE NUEZ DEL ANACARDO

El anacardo (Anacardium occidentale L.) es una de las especies más conocidas de la familia Anacardiaceae, es una planta con beneficios versátiles nativa del norte de Brasil y de la región de Guayanas; sin embargo, ahora se cultiva extensamente en India, Vietnam, Mozambique, República de Madagascar, Tanzania, Filipinas y otros países tropicales; tanto así que, se ha convertido entre los cultivos agroindustriales más importantes en India, Brasil, Vietnam y países africanos (Buono et al., 2018; Koteich Khatib et al., 2020; Kyei et al., 2019; Preethi et al., 2021; Sharma et al., 2020).

Durante el procesamiento del anacardo, se produce un aceite viscoso de color marrón rojizo llamado líquido de la cáscara del anacardo (CNSL, por sus siglas en inglés) (Preethi et al., 2021), el cual constituye alrededor de un tercio (1/3) de la masa total del anacardo. Recientemente, este subproducto renovable se ha convertido en una de las principales fuentes económicas de fenoles naturales, ya que es considerado como una materia prima versátil y valiosa para la producción de polímeros (Balgude & Sabnis, 2014; Mwakalesi & Potter, 2021).

El CNSL puede ser extraído por diferentes mecanismos como proceso de aceite caliente, extracción con solventes o mecánica, procesos con fluidos supercríticos y destilación al vacío (Nambela et al., 2022; Rwahwire et al., 2018). Dependiendo del método de extracción utilizado, la composición del CNSL se ve afectada; por ejemplo, cuando se usa la extracción con solventes (sin calentamiento), el CNSL es llamado natural (CNSLn) y este consiste en una mezcla de compuestos fenólicos a base de ácido anacárdico (ácido 6-pentadecenil salicílico), cardanol (3-pentadecenil fenol), cardol (5-pentadecenil resorcinol), y 2-metilcardol (2-metil-5-pentadecenil resorcinol), ver Figura 2, siendo el ácido anacárdico el compuesto mayoritario con un 60-65 %, aproximadamente. En cambio, cuando se utiliza extracción por calentamiento, el CNSL es considerado técnico (CNSLt) y sus componentes principales son el cardanol, cardol y 2-metilcardol, siendo el primero de ellos, el compuesto mayoritario con un 60-65 %, aproximadamente, ya que el ácido anacárdico sufre una descarboxilación, lo que conduce a la formación del cardanol (Morais et al., 2017; Sharma et al., 2020; Vasconcelos et al., 2021).

Figura 2. Estructura química de los compuestos del CNSL



Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

En la Figura 2, se muestran las estructuras de los compuestos del CNSL, los cuales presentan largas cadenas laterales alquílicas que difieren en el grado de insaturación. Por consiguiente, pueden ser saturado (C15:0), monoinsaturado (C15:1), diinsaturado (C15:2) y triinsaturado (C15:3). Además, la presencia de estas cadenas laterales proporciona un carácter hidrofóbico a dichos compuestos. Ahora, teniendo en cuenta la estructura de estos compuestos fenólicos, se pueden generar una gran variedad de reacciones químicas, siendo algunas de ellas hidrogenación, halogenación, nitración, sulfonación, esterificación, epoxidación y eterificación; lo cual permite dar lugar a varios productos industriales (Ike et al., 2021).

Por lo anterior, el CNSL ha logrado tener auge en temas relacionados con fabricación de materiales biopoliméricos, gracias a la riqueza en sustancias fenólicas naturales, las cuales poseen ciertas propiedades que hacen del aceite una especie atractiva para la ciencia (Araujo et al., 2021; Balgude & Sabnis, 2014; Kyei et al., 2020; Mwakalesi & Potter, 2021; Philip et al., 2008; Preethi et al., 2021; V., Remya; Deepak, Patil; V., Abitha; Ajay, Rane; Raghvendra, 2016).

1.2.2. OBTENCIÓN Y RECOLECCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

En el corregimiento Pisa Bonito del municipio de Chinú, Córdoba – Colombia, se encuentra una agroindustria dedicada a la producción, transformación y comercialización de productos derivados del fruto del anacardo, llamada Asociación de Productores de Marañón de la Sabana, ASOPROMARSAB. Los residuos que se originan en este lugar, no cuentan con un tratamiento adecuado, de manera que son acumulados en cierta parte del suelo, como consecuencia, provocan afecciones en la salud humana y animal, así mismo, daños indeseables en el medio ambiente, ver Figura 3.

Figura 3. Residuos de la cáscara de nuez del anacardo



Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

Con el fin de mitigar el impacto que generan estos “residuos”, se ha logrado crear una articulación con ASOPROMARSAB en términos de recolección y aprovechamiento de la cáscara de nuez del anacardo, con el propósito de obtener el aceite y así sintetizar nuevos materiales biopoliméricos con cierto valor agregado.

El término “residuo” no solo se puede interpretar como un desecho no aprovechable, por el contrario, puede utilizarse como punto de partida para la formación de nuevos materiales que probablemente logren cierto impacto en la agroindustria y en otros campos de la ciencia, este hecho está fundamentado en la economía circular.

1.3. BIODEGRADABILIDAD

La biodegradación es el proceso de descomposición de largas cadenas de biopolímeros en pequeñas unidades químicas (monómeros, dímeros y otros), las cuales son fácilmente asimilados por los microorganismos, o bien, degradados por medio de actividad enzimática (Zoungranan et al., 2020).

¿Por qué los biopolímeros se biodegradan? Esta puede deberse a la presencia de microrganismos, los cuales pueden hidrolizar el biocompuesto hasta llevarlo a azúcares de baja masa molecular como monómeros, dímeros, oligómeros, con la finalidad de metabolizarlo y aprovecharlo como fuente energética.

Otra explicación puede atribuirse a factores ambientales como la humedad del suelo, pH y temperatura de entierro que, sin lugar a duda, pueden favorecer o desfavorecer este proceso. También puede ser debido a la actividad enzimas microbiana (A. L. Da Silva et al., 2016; Salimi et al., 2020; Zoungranan et al., 2020).

En síntesis, la disminución de la masa durante la biodegradación puede atribuirse a la descomposición microbiana de la cadena molecular, actividad enzimática, reacciones complejas, como oxidación e hidrólisis.

Anteriormente, se había mencionado que el almidón ha participado en innumerables investigaciones, principalmente, en temas relacionados con producción de hidrogeles y en procesos de recubrimiento. Sin embargo, el carácter hidrofílico del almidón lo hace vulnerable frente a factores como la temperatura y humedad, puesto que ocasionan una baja estabilidad y aumentan el proceso de degradación a las biopelículas. Por esta razón, existe la necesidad de incorporar un nuevo componente que permita disminuir este inconveniente.

Un buen candidato es el CNSL, ya que posee una serie de compuestos fenólicos, los cuales han arrojado resultados muy satisfactorios, gracias a sus propiedades.

En virtud a lo anterior, el propósito de esta investigación es estudiar el proceso de biodegradabilidad de biopolímeros a base de almidón de yuca (Manihot esculenta crantz) con líquido de la cáscara de nuez del anacardo, teniendo en cuenta la composición y pH del biopolímero.

2. MÉTODO

El método implementado para llevar a cabo esta investigación, está dividido en tres partes a saber. Primero se mencionará el procedimiento de extracción de los principales componentes que integran el biopolímero sintetizado, luego se hará mención al proceso sintético de los biopolímeros a base de almidón y CNSL. Por último, se describirá el proceso de biodegradabilidad de los biopolímeros en un suelo simulado.

2.1. EXTRACCIÓN DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL BIOPOLÍMERO

Los principales componentes que integran los biopolímeros sintetizados son: almidón y CNSL. Estos pueden ser extraídos por diferentes procesos, tal como se había mencionado. A continuación, se detallan los métodos utilizados para lograr la extracción de estos componentes.

2.1.1. ALMIDÓN

El almidón es un biopolímero que puede obtenerse de diversas fuentes vegetales como la yuca, ñame, papa, arroz, maíz, aguacate, trigo, entre otras. En esta investigación, se empleó un proceso convencional para la extracción del almidón de la yuca (Manihot esculenta crantz), el cual consiste en lo siguiente: En primer lugar, se lavó la yuca con abundante agua para eliminar impurezas, seguidamente fueron peladas (100 g de tubérculos de yuca), fragmentadas y licuadas con 200 ml de H2O destilada. Luego, utilizando una tela de muselina, se filtró y se obtuvo un residuo y un filtrado. Este último, se lavó con 100 ml de H2O destilada, por triplicado y, posteriormente, se decantó por 24 h. Transcurrido este tiempo, se descartó el sobrenadante y el precipitado obtenido fue recolectado y secado a 50 °C, por 24 h. Por último, se maceraron los cristales y con la ayuda de un tamiz de malla 60 µm, se tamizó hasta obtener un polvo fino de color blanco, almidón. Cabe mencionar que dicho almidón fue caracterizado por espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR). La Figura 4, muestra el diagrama de flujo del proceso de extracción del almidón de yuca (A. Arrieta et al., 2022).

Figura 4. Diagrama de flujo para la extracción del almidón a partir de la yuca



Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

2.1.2. LÍQUIDO DE LA CÁSCARA DE NUEZ DEL ANACARDO. CNSL

El CNSL puede ser extraído por diversos mecanismos, dentro de ellos tenemos la extracción mecánica o con solventes, proceso de aceite caliente, destilación al vacío y procesos de fluidos supercríticos (Edoga et al., 2006; Koteich-Khatib et al., 2019; Nambela et al., 2022; Rwahwire et al., 2018; Sharma et al., 2020). En este estudio, se utilizó el método mecánico, el cual consistió en lavar el material (1.50 kg de cáscara de nuez) con abundante H2O, seguidamente fue secado a 30 °C por 2 h, para la eliminación de impurezas. Luego, las cáscaras secas fueron fragmentadas con la ayuda de una licuadora industrial marca JTC. El producto obtenido, se introdujo en un molino-prensa, el cual se encarga de realizar fuerza de compresión para obtener el aceite. La Figura 5, muestra el diagrama de flujo del proceso de extracción del CNSL. Es importante hacer mención que, desafortunadamente, el aspecto de la cáscara influye al momento de extraer el aceite, puesto que un mejor proceso de extracción se logra cuando dichas cáscaras están muy frescas.

Figura 5. Diagrama de flujo para la extracción del CNSL



Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

2.2. SÍNTESIS DE BIOPOLÍMEROS

La síntesis de las biopelículas se realizó por medio de un proceso termoquímico, el cual consistió en disolver 0.75 g de almidón en 25 ml de H2O destilada a diferentes pH (3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 10.0 y 12.0), manteniendo agitación constante (1500 r.p.m), hasta observar una mezcla homogénea. Luego, la mezcla anterior fue sometida a 70 °C por 15 min (proceso de gelatinización del almidón), pasado este tiempo, se dejó reposar a temperatura ambiente, para adicionar, en su respectivo orden, el resto de componentes: glicerol (Gly, 0.500 g), glutaraldehído (Glu, 0.500 g) y polietilenglicol (PEG, 0.250 g). Así mismo, se adicionó la cantidad de CNSL (0.000, 0.125, 0.250 y 0.500 g), a continuación, se aumentó la temperatura a 70 °C, manteniendo agitación constante (1500 r.p.m.), por 15 min. Las mezclas se depositaron en charolas de politetrafluoroetileno y fueron secadas a 70 °C por 48 h. Posteriormente, las biopelículas se retiraron del recipiente con las debidas precauciones, se dejó reposar a temperatura ambiente y se almacenaron en bolsas ziploc para estudios pertinentes (Arrieta et al., 2021). En la tabla 1, se muestra el diseño experimental para la síntesis de los biopolímeros.

Tabla 1. Diseño experimental para la síntesis de los biopolímeros: almidón + CNSL

ALMIDÓN (0.75 G)					
25 ML DE AGUA					
ENSAYO	CNSL (G)	PH	GLY (G)	GLU (G)	PEG (G)
1	0.000	3.0	0.500	0.500	0.250
2	0.125	3.0	0.500	0.500	0.250
3	0.250	3.0	0.500	0.500	0.250
4	0.500	3.0	0.500	0.500	0.250
5	0.000	5.0	0.500	0.500	0.250
6	0.125	5.0	0.500	0.500	0.250
7	0.250	5.0	0.500	0.500	0.250
8	0.500	5.0	0.500	0.500	0.250
9	0.000	7.0	0.500	0.500	0.250
10	0.125	7.0	0.500	0.500	0.250
11	0.250	7.0	0.500	0.500	0.250
12	0.500	7.0	0.500	0.500	0.250
13	0.000	9.0	0.500	0.500	0.250
14	0.125	9.0	0.500	0.500	0.250
15	0.250	9.0	0.500	0.500	0.250
16	0.500	9.0	0.500	0.500	0.250
17	0.000	10.0	0.500	0.500	0.250
18	0.125	10.0	0.500	0.500	0.250
19	0.250	10.0	0.500	0.500	0.250
20	0.500	10.0	0.500	0.500	0.250
21	0.000	12.0	0.500	0.500	0.250
22	0.125	12.0	0.500	0.500	0.250
23	0.250	12.0	0.500	0.500	0.250
24	0.500	12.0	0.500	0.500	0.250

Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

2.3. CARACTERIZACIÓN ESPECTROSCÓPICA

El almidón extraído de la yuca, el aceite extraído de la cáscara de la nuez del anacardo y los biopolímeros sintetizados fueron caracterizados por espectroscopía infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR), utilizando un Spectrum Two FT-IR Spectrometer con accesorios de reflectancia total atenuada (ATR) de la marca PerkinElmer. Los espectros se registraron en el intervalo de 450 y 4000 cm-1 con una resolución de 4 cm-1 por 100 exploraciones. Los espectros IR de las diversas muestras se registraron, normalizaron y corrigieron con el aire de fondo.

2.4. PROCESO DE BIODEGRADABILIDAD

El proceso de biodegradabilidad de los biopolímeros se estudió sometiendo las diferentes muestras a un suelo simulado. Para ello, se implementó el siguiente procedimiento: primeramente, se preparó un suelo simulado compuesto por un 23 % de materia orgánica (estiércol de vaca), 23 % limo-limoso, 23 % de arena y 31 % de agua (todos en masa/masa). Luego, cada una de las muestras fueron recubiertas con dicho suelo y empacadas en bolsas ziploc que estaban previamente agujeradas. Posterior a ello, se enterraron en el suelo a una profundidad de 10 cm a 25 ± 3 °C, aproximadamente. La biodegradación fue controlada cada 3 días, de manera que las muestras se liberaron del suelo, se lavaron con abundante agua destilada y se secaron a 30 °C por 24 horas. Pasado este tiempo, se determinó la masa de las muestras, con el fin de calcular la variación de masa y con ello, el porcentaje de degradación, utilizando la ecuación 1 (A. L. Da Silva et al., 2016; Salimi et al., 2020), así mismo, las biopelículas fueron caracterizadas por espectroscopía FTIR, y nuevamente se incorporan al suelo. Este procedimiento se llevó a cabo hasta obtener una degradación completa de dichas biopelículas. En la Figura 6, se muestra la representación esquemática del proceso de biodegradabilidad en suelo simulado.

$$\text{Degradación } (\%) = \frac{w_i - w_f}{w_i} \times 100\ \%$$

Donde wi y wf son las masas de las biopelículas antes y después de la degradación, respectivamente.

Figura 6. Representación esquemática del proceso de biodegradabilidad en suelo simulado



Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

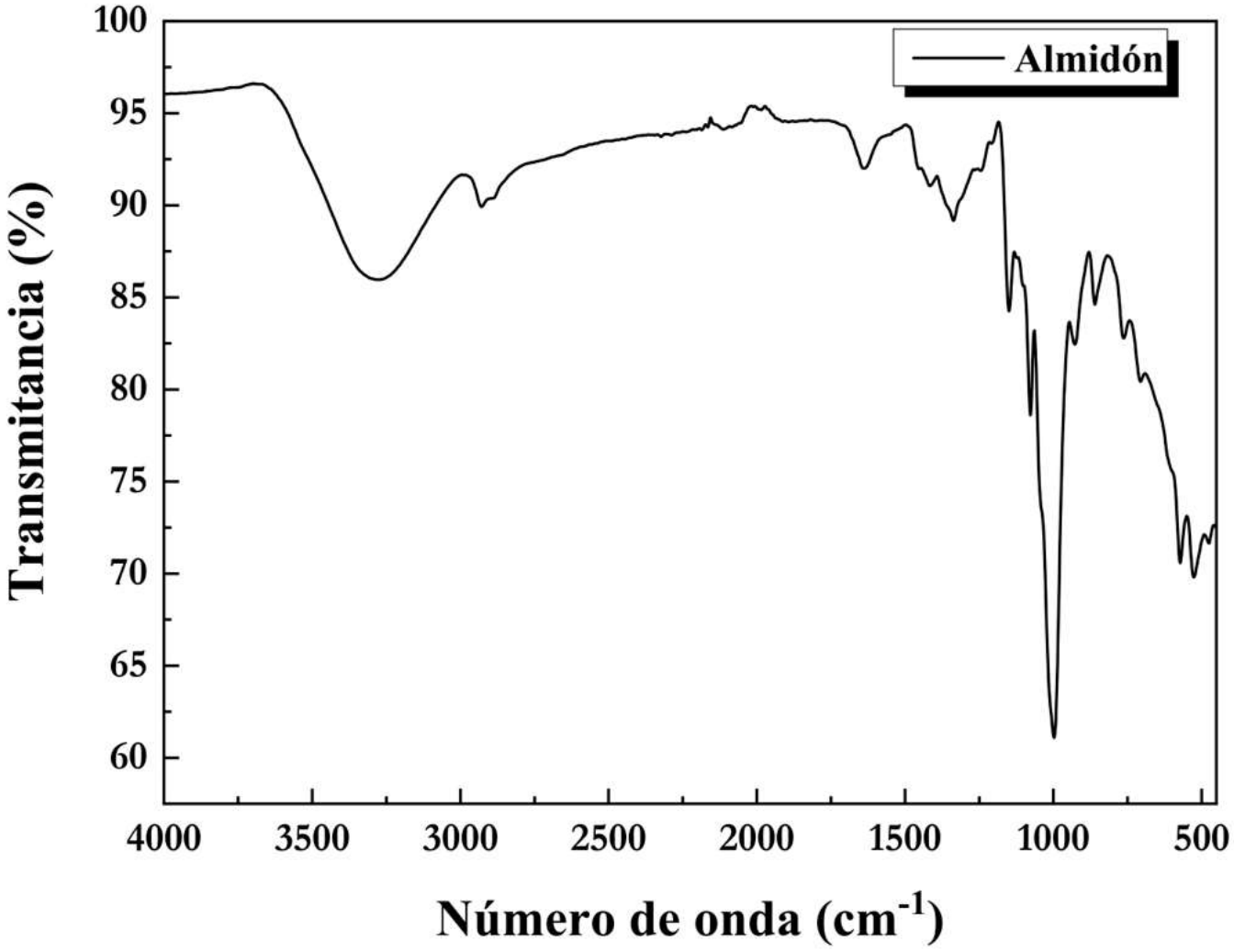
3. RESULTADOS

3.1. EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES

3.1.1. ALMIDÓN

El almidón fue sintetizado a partir de la yuca (Manihot esculenta crantz), utilizando el método de extracción convencional descrito en la sección 2.1.1., con el fin de fabricar nuevos biopolímeros con valor agregado. A partir de este procedimiento se obtuvo un rendimiento del 19.11 %, aproximadamente. Luego de la extracción, el almidón fue caracterizado por espectroscopía de infrarrojo con Transformada de Fourier, tal como se evidencia en la Figura 7.

Figura 7. Espectro FTIR del almidón extraído de la yuca

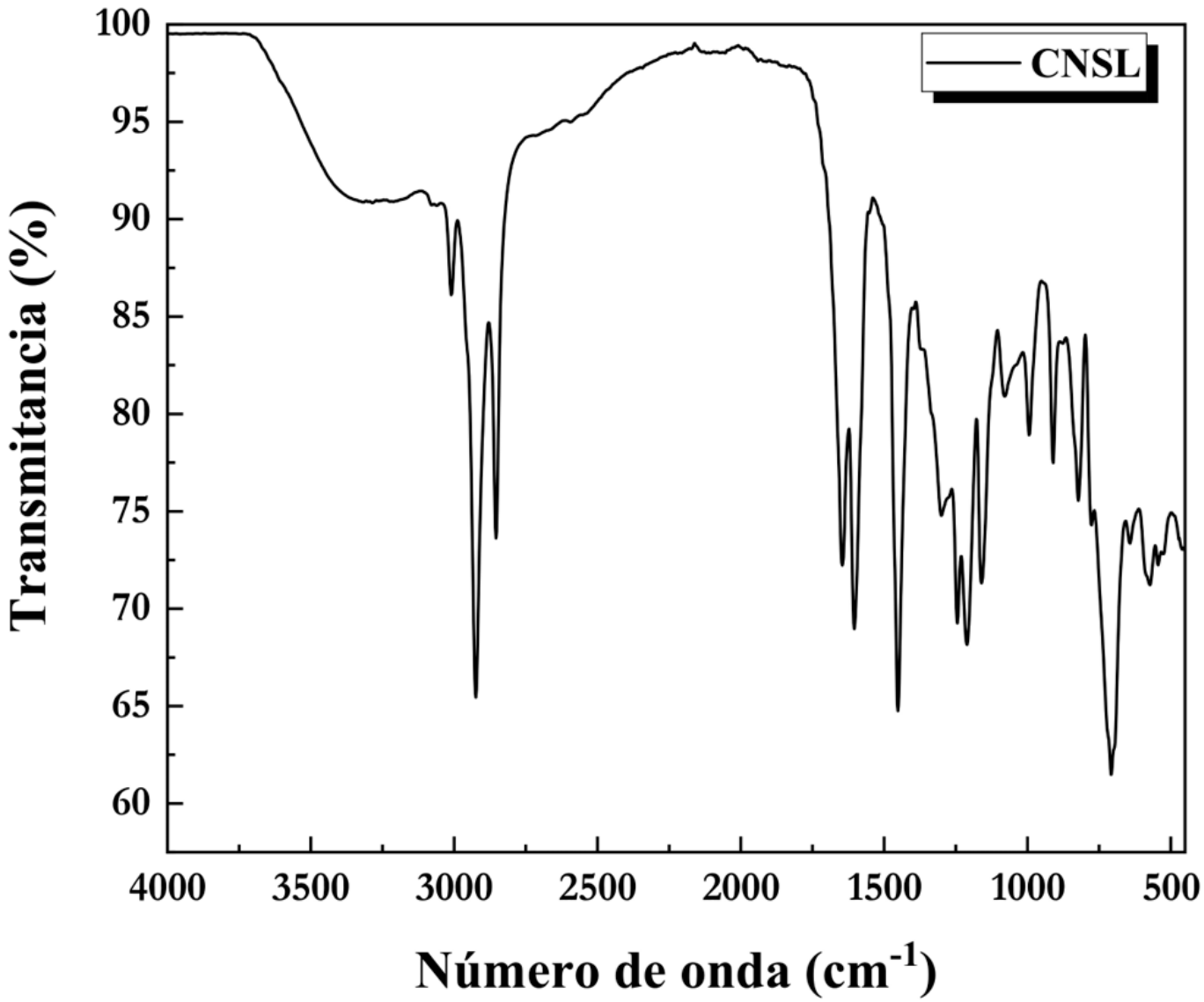


Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

3.1.2. LÍQUIDO DE LA CÁSCARA DE NUEZ DEL ANACARDO

El aceite fue sintetizado a partir de la cáscara de nuez del anacardo, utilizando el método de extracción mecánico descrito en la sección 2.1.2., con el fin de fabricar nuevos biopolímeros con el almidón previamente extraído. A partir de este procedimiento se obtuvo un rendimiento del 68.49 %, aproximadamente, puesto que a partir de 7.3 kg de cáscara triturada se obtuvo 5.0 L de aceite. Luego de la extracción, el CNSL fue caracterizado por espectroscopía de infrarrojo con Transformada de Fourier, tal como se evidencia en la Figura 8.

Figura 8. Espectro FTIR del CNSL extraído de la cáscara de la nuez del anacardo



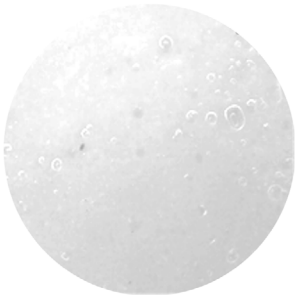
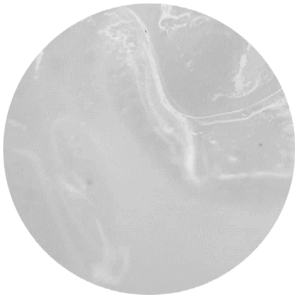
Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

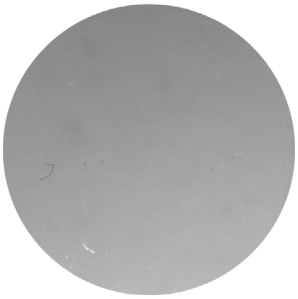
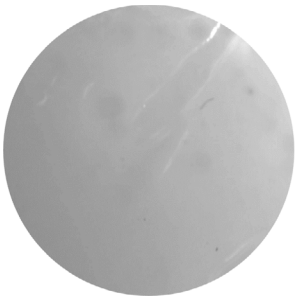
3.2. SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE BIOPOLÍMEROS

Los biopolímeros a base de almidón de yuca (Manihot Esculenta Crantz) con líquido de la cáscara de nuez del anacardo fueron sintetizados por medio del procedimiento descrito en la sección 2.2. En la Tabla 2, se muestran los biopolímeros elaborados con almidón y CNSL a diferentes pH y concentración del aceite. En esta se observa que con el aumento de la concentración del CNSL en el biopolímero, este adquiere una tonalidad más oscura y aceitosa. Además, mejora la consistencia de la biopelícula. Ahora, con el aumento del pH, no se logra observar diferencias en cuanto a la apariencia del biopolímero, no obstante, este hecho si influye en el proceso de biodegradabilidad que se discutirá en la sección 4.1.3.

En la Figura 9, se muestra un esquema de las posibles interacciones químicas entre las moléculas del almidón con los derivados del CNSL, recordar que este aceite es una mezcla de cuatro compuestos fenólicos. A partir de esta figura se observa la formación de enlaces de hidrógeno, puesto que el átomo de hidrógeno está enlazado a un átomo fuertemente electronegativo como el oxígeno. Este hecho provee la fuerza intermolecular que mantiene unidas ambas moléculas, dando así, una estabilidad estructural al biopolímero formado (A. A. Arrieta et al., 2022).

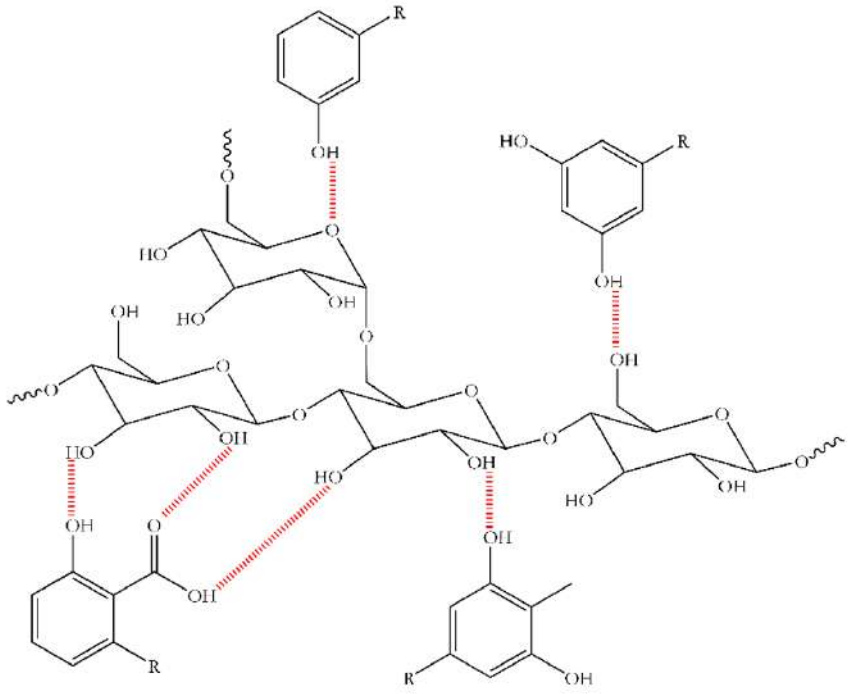
Tabla 2. Biopolímeros de almidón con CNSL, a varias concentraciones del aceite y a diferentes pH

 Almidón + CNSL (0.000 g), pH 3.0	 Almidón + CNSL (0.125 g), pH 3.0	 Almidón + CNSL (0.250 g), pH 3.0
 Almidón + CNSL (0.500 g), pH 3.0	 Almidón + CNSL (0.000 g), pH 5.0	 Almidón + CNSL (0.125 g), pH 5.0
 Almidón + CNSL (0.250 g), pH 5.0	 Almidón + CNSL (0.500 g), pH 5.0	 Almidón + CNSL (0.000 g), pH 7.0
 Almidón + CNSL (0.125 g), pH 7.0	 Almidón + CNSL (0.250 g), pH 7.0	 Almidón + CNSL (0.500 g), pH 7.0

 Almidón + CNSL (0.000 g), pH 9.0	 Almidón + CNSL (0.125 g), pH 9.0	 Almidón + CNSL (0.250 g), pH 9.0
 Almidón + CNSL (0.500 g), pH 9.0	 Almidón + CNSL (0.000 g), pH 10.0	 Almidón + CNSL (0.125 g), pH 10.0
 Almidón + CNSL (0.250 g), pH 10.0	 Almidón + CNSL (0.500 g), pH 10.0	 Almidón + CNSL (0.000 g), pH 12.0
 Almidón + CNSL (0.125 g), pH 12.0	 Almidón + CNSL (0.250 g), pH 12.0	 Almidón + CNSL (0.500 g), pH 12.0

Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

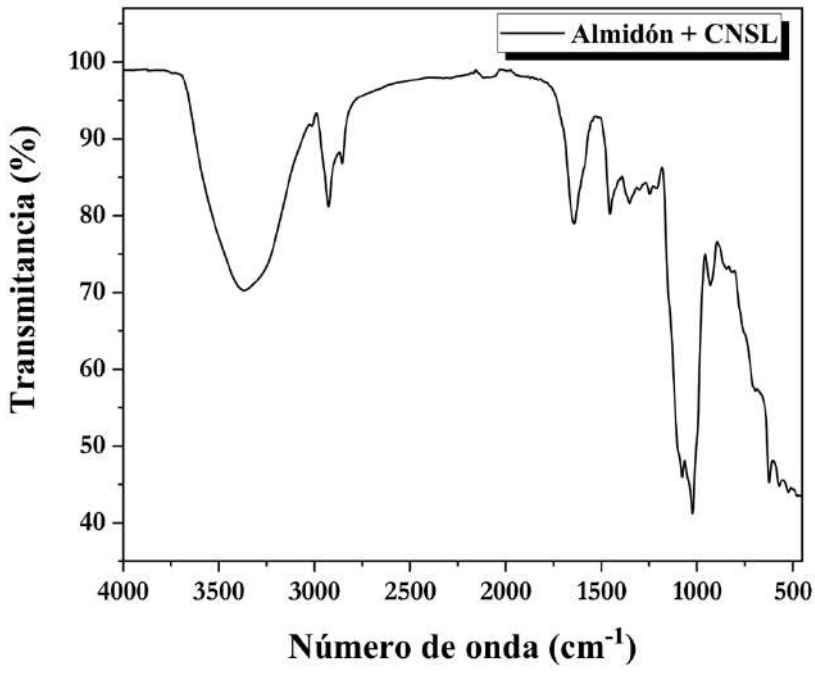
Figura 9. Representación esquemática de los enlaces de hidrógeno formados entre el almidón y derivados del CNSL



Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

Por otro lado, los biopolímeros sintetizados con almidón y CNSL pueden ser caracterizado por diferentes técnicas espectroscópicas como la espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), resonancia magnética nuclear protónica y de carbono 13 (RMN 1H y RMN 13C), espectroscopía ultravioleta-visible (UV-Vis), entre otras. En este trabajo, los biopolímeros fueron caracterizados por espectroscopía FTIR, la cual permite determinar las posibles interacciones y vibraciones moleculares entre el almidón y CNSL. Por tanto, en la Figura 10, se muestra el espectro FTIR del biopolímero almidón + CNSL (0.500 g) a pH 7.0.

Figura 10. Espectro FTIR del biopolímero almidón + CNSL (0.500 g) a pH 7.0



Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

3.3. PROCESO DE BIODEGRADABILIDAD

Se desarrolló el proceso de biodegradabilidad a los biopolímeros sintetizados a base de almidón y CNSL, tal como se describió en la sección 2.4.

En las Tablas 3 y 4 se muestran los resultados obtenidos en el proceso de biodegradabilidad y el porcentaje de degradación, calculado por medio de la ecuación 1, de los biopolímeros formados por almidón y CNSL, a partir de ellas se observa la disminución de la masa de dichos biopolímeros durante el proceso. Por ejemplo, al sexto día, los materiales biopoliméricos formados por almidón + CNSL (0.000 g) a pH 5, almidón + CNSL (0.125 g) a pH 3 y 5, almidón + CNSL (0.250 g) a pH 5, y almidón + CNSL (0.500 g) a pH 7, mostraron un proceso de biodegradación muy acelerado, a tal punto de degradarse por completo. En cambio, los biopolímeros a base de almidón + CNSL (0.000 g) a pH 7 y 9, almidón + CNSL (0.125 g) a pH 10, almidón + CNSL (0.250 g) a pH 3 y 7, y almidón + CNSL (0.500 g) a pH 3, revelaron un proceso de biodegradación moderado, puesto que se degradaron por completo al noveno día.

El resto de biopolímeros se degradaron aún más lento respecto a los mencionados, esto es, al doceavo día, con excepción del biopolímero compuesto de almidón + CNSL (0.500 g) a pH 12, ya que este último se degradó al quinceavo día.

Es importante anotar que a medida que aumenta la cantidad de CNSL en el biopolímero, el tiempo de degradación es más prolongado, o bien, existe una mejora significativa de la biodegradabilidad del biocompuesto respecto a aquellos en donde el CNSL está ausente.

De esta manera, las propiedades fenólicas del CNSL son aceptables al momento de elaborar dichos polímeros, tal como se había pronosticado.

Tabla 3. Proceso de biodegradabilidad del biopolímero a base de almidón con CNSL

BIOPOLÍMERO DE ALMIDÓN + CNSL							
CNSL EN EL BIOPOLÍMERO (G)	PROCESO DE BIODEGRADABILIDAD (DÍAS)						
	PH	0	3	6	9	12	15
		MASA DEL BIOPOLÍMERO (G)					
0.000	3	0.9800	0.2650	0.0900	0.0180	B	
	5	0.9500	0.4700	B			
	7	0.8600	0.3100	0.0212	B		
	9	0.8100	0.3700	0.0320	B		
	10	0.9900	0.5000	0.0960	0.0040	B	
	12	0.8800	0.7000	0.0840	0.0180	B	
0.125	3	0.8800	0.6500	B			
	5	0.8800	0.5700	B			
	7	1.1800	0.3600	0.0630	0.0064	B	
	9	1.2500	0.6100	0.2650	0.1292	B	
	10	0.8800	0.2100	0.0630	B		
	12	1.2100	0.4500	0.1470	0.0670	B	
0.250	3	1.0200	0.4400	0.0530	B		
	5	0.8400	0.4700	B			
	7	0.8600	0.5700	0.0300	B		
	9	1.0800	0.5500	0.2250	0.0522	B	
	10	1.0000	0.3000	0.0700	0.0160	B	
	12	1.4500	0.6500	0.2630	0.1070	B	

0.500	3	0.9900	0.4400	0.0470	B		
	5	0.9900	0.6600	0.0350	0.0020	B	
	7	0.9100	0.4800	B			
	9	1.0300	0.4200	0.0920	0.0091	B	
	10	1.4200	0.6900	0.1800	0.0254	B	
	12	1.6500	0.8200	0.3960	0.3440	0.1770	B

Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

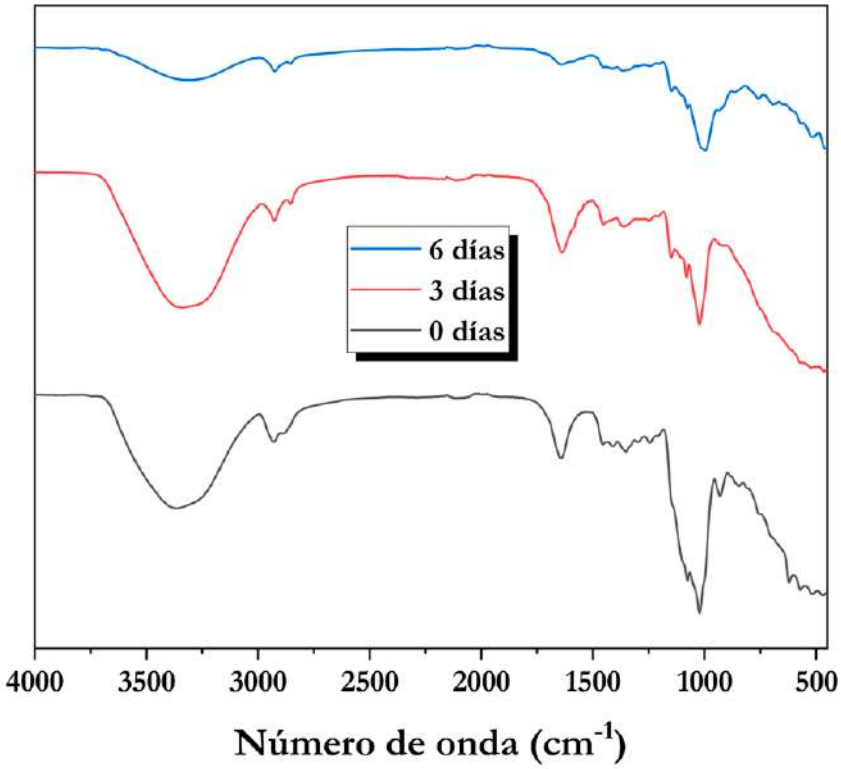
Tabla 4. Porcentaje de degradación del biopolímero a base de almidón con CNSL

BIOPOLÍMERO DE ALMIDÓN + CNSL							
CNSL EN EL BIOPOLÍMERO (G)	PROCESO DE BIODEGRADABILIDAD (DÍAS)						
	PH	0	3	6	9	12	15
		PORCENTAJE DE DEGRADACIÓN (%)					
0.000	3	0.0	73.0	90.8	98.2	100.0	
	5	0.0	50.5	100.0			
	7	0.0	64.0	97.5	100.0		
	9	0.0	54.3	96.0	100.0		
	10	0.0	49.5	90.3	99.6	100.0	
	12	0.0	20.5	90.5	98.0	100.0	
0.125	3	0.0	26.1	100.0			
	5	0.0	35.2	100.0			
	7	0.0	69.5	94.7	99.5	100.0	
	9	0.0	51.2	78.8	89.7	100.0	
	10	0.0	76.1	92.8	100.0		
	12	0.0	62.8	87.9	94.5	100.0	
0.250	3	0.0	56.9	94.8	100.0		
	5	0.0	44.0	100.0			
	7	0.0	33.7	96.5	100.0		
	9	0.0	49.1	79.2	95.2	100.0	
	10	0.0	70.0	93.0	98.4	100.0	
	12	0.0	55.2	81.9	92.6	100.0	
0.500	3	0.0	55.6	95.3	100.0		
	5	0.0	33.3	96.5	99.8	100.0	
	7	0.0	47.3	100.0			
	9	0.0	59.2	91.1	99.1	100.0	
	10	0.0	51.4	87.3	98.2	100.0	
	12	0.0	50.3	76.0	79.2	89.3	100.0

Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

En adición, en la Figura 11 se evidencia el proceso biodegradable para el biopolímero almidón + CNSL (0.250 g) a pH 7.0, a partir de esta se observa una disminución en las bandas producto de la pérdida de masa del biocompuesto.

Figura 11. Espectro FTIR del proceso de biodegradabilidad para el biopolímero almidón + CNSL (0.250 g) a pH 7.0



Fuente: Completamente generada por el autor. Yair Alfonso Vega Vega, 2023

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. DISCUSIÓN

4.1.1. EXTRACCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS COMPONENTES

4.1.1.1. ALMIDÓN

En la Figura 7, se muestra el espectro FTIR del almidón extraído de la yuca. Para lograr una mejor interpretación y caracterización de los principales picos, resulta conveniente dividir la región del espectro en cuatro regiones fundamentales, esto es, por debajo de 800 cm-1, 800-1500 cm-1 (huella dactilar), 2800-3000 cm-1 (tensión C–H), y 3000-3600 cm-1 (estiramiento O–H). Por tanto, los picos inferiores a 800 cm-1 se deben a las vibraciones del modo esquelético de la glucopiranosa. La banda de absorción a 1149 cm-1 se debe a los estiramientos C–O y C–C, y los modos de flexión C–O–H se evidencia por el pico a 1086 cm-1. Así mismo, las bandas vibratorias (flexión y deformación) en la región 1265-1454 cm-1, están relacionadas con los átomos de carbono e hidrógeno (C–H), y el pico a 1338 cm-1 se atribuye a los modos de flexión de CH2. Por último, la caracterización de las tensiones C–H y O–H se evidencian en la región de 2861-2956 cm-1 y 3209-3388 cm-1, respectivamente (Kizil et al., 2002).

4.1.1.2. LÍQUIDO DE LA CÁSCARA DE NUEZ DEL ANACARDO

En la Figura 8, se muestra el espectro FTIR del CNSL extraído de la cáscara de la nuez del anacardo. El espectro evidencia las bandas características del aceite, esto es, el modo vibracional del enlace O–H fenólico se observa a 3354 cm-1 y 1253 cm-1; el estiramiento C–H (alifático) se extiende en 2852 y 2932 cm-1; el pico en 3015 cm-1 corresponde al enlace C–H (aromático); la tensión a 1609 y 1450 cm-1 se debe al enlace C=C presente en el anillo bencénico y en las cadenas laterales; los picos en 995 y 912 cm-1 corresponden a las deformaciones angulares olefínicas RHC=CH2; las tensiones en 776, 716 y 695 cm-1 hacen referencia a las deformaciones angulares aromáticas C–H fuera del plano de los anillos meta-disustituidos; y las deformaciones angulares aromáticas fuera del plano C–H de los anillos para-disustituidos en 823 y 865 cm-1 (Furtado et al., 2019).

4.1.2. SÍNTESIS Y CARACTERIZACIÓN DE BIOPOLÍMEROS

En la Figura 10, se muestra el espectro FTIR del proceso de biodegradabilidad para el biopolímero almidón + CNSL (0.500 g) a pH 12.0. A partir de esta figura se observan los picos característicos del almidón y CNSL en el biopolímero, esto es, las vibraciones de los enlaces C–H (alifáticos) y O–H, se evidencian en la región de 2852 cm-1 y 3200-3400 cm-1, respectivamente. Así mismo, la señal a 3010 cm-1 se debe al modo vibracional del enlace C–H presentes en el anillo aromático, los picos a 2925 cm-1 y 927 cm-1 representa la vibración del grupo –COOH presente en el ácido anacárdico. La tensión a 1642 cm-1 se debe al enlace C=C presente en el anillo bencénico y los modos de flexión C–O–H se evidencian por los picos en 1027 y 1080 cm-1 (Preethi et al., 2021).

4.1.3. PROCESO DE BIODEGRADABILIDAD

Teniendo en cuenta los resultados mostrados en las Tablas 3 y 4, la principal causa de la biodegradación de los biopolímeros a base de almidón con CNSL puede atribuirse a la actividad microbiana presente en la materia orgánica del suelo. Estos microorganismos hidrolizan el biopolímero hasta convertirlo en azúcares elementales de baja masa molecular (monómeros, dímeros u oligómeros) y metabolizarlo como fuente energética. Este hecho es más notorio a pH ácido, puesto que el pH es un factor favorable para la producción y desarrollo de los microorganismos, por tanto, aquellos biopolímeros a pH ácido presentaron una biodegradabilidad acelerada. En cambio, a pH alcalino el proceso es desfavorable, por tal motivo, la degradación es más prolongada. Otra explicación puede atribuirse a factores ambientales que, sin lugar a duda, pueden favorecer o desfavorecer dicho proceso, por ejemplo, la humedad del suelo, ya que un bajo porcentaje de humedad permite la preserva del biopolímero, en cambio, un alto contenido promueve el crecimiento microbiano y, por ende, acelera el proceso de degradación. Así mismo, la temperatura del suelo es otro factor importante durante la biodegradación, puesto que a bajas temperaturas dicho proceso es favorable, mientras que a altas temperaturas (superiores a 30 °C) provoca una baja biodegradabilidad. Este último resultado puede explicarse gracias al papel destructivo de la temperatura sobre los microorganismos. Por otro lado, el proceso de biodegradación puede ser debido a enzimas microbianas, puesto que el carácter hidrofílico del CNSL podría ocasionar un ataque fácil de las enzimas hacia los grupos oxigenados de las cadenas poliméricas, generando así, moléculas con baja masa molecular como, por ejemplo, monómeros y oligómeros (A. L. Da Silva et al., 2016; Majaron et al., 2020; Salimi et al., 2020; Zoungranan et al., 2020).

En síntesis, la pérdida de masa durante la biodegradación puede atribuirse a la descomposición microbiana de la cadena molecular, actividad enzimática, reacciones complejas, como oxidación e hidrólisis.

Por otro lado, la espectroscopía FTIR permite evidenciar el hecho descrito anteriormente. Por ejemplo, en la Figura 11 se muestra el espectro FTIR del proceso de biodegradabilidad para el biopolímero almidón + CNSL (0.250 g) a pH 7.0. A partir de esta figura se observan los picos característicos del almidón y CNSL en el biopolímero, esto es, las vibraciones de los enlaces C–H (alifáticos) y O–H, se evidencian en la región de 2850-2940 cm-1 y 3228-3400 cm-1, respectivamente. Así mismo, la señal a 3008 cm-1 se debe al modo vibracional del enlace C–H presentes en el anillo aromático, los picos a 2922 cm-1 y 928 cm-1 representa la vibración del grupo –COOH presente en el ácido anacárdico. La tensión a 1646 cm-1 se debe al enlace C=C presente en el anillo bencénico y los modos de flexión C–O–H se evidencia por el pico a 1081 cm-1 (Preethi et al., 2021).

Además, el proceso de degradación también puede evidenciarse por la disminución en la intensidad de los picos mostrados en la Figura 11, producto de la acción microbiana mediante enzimas que rompen los enlaces presentes en el biopolímero inicialmente, provocando así, una rápida disminución en la masa molecular del mismo.

En síntesis, se puede decir que el material biopolimérico que presentó el mejor proceso de biodegradabilidad fue aquel formado a partir de almidón con la mayor concentración de CNSL a pH 12.0, ya que dicho polímero logró biodegradarse por completo a los 15 días de haber iniciado el proceso.

4.2. CONCLUSIONES

En este estudio se logró sintetizar biopolímeros a base de almidón de yuca con CNSL extraído de la cáscara de nuez del anacardo, a diferentes pH y cantidades de este último. Se observó que la incorporación del CNSL en el biopolímero mejoró la biodegradabilidad del almidón, puesto que este último, al no estar combinado con otro material sufre un proceso de descomposición acelerado. Así mismo, el material biopolimérico que presentó el mejor proceso de biodegradabilidad fue aquel formado a partir de almidón con la mayor concentración de CNSL (0.500 g) a pH 12.0, ya que dicho polímero logró biodegradarse por completo a los 15 días de haber iniciado el proceso.

Como futuros trabajos, se espera aprovechar el biopolímero con mayor concentración de CNSL a pH 12 para encapsular fertilizantes (NPK), con el propósito de liberarlos lentamente a los cultivos para que las plantas puedan aprovecharlos al máximo.

Este capítulo es producto del proyecto de investigación “Fortalecimiento de las capacidades en CTeI para la generación de biomateriales y su aplicación en sistemas de liberación lenta mediante el encapsulado de fertilizantes a partir de los productos y subproductos de la agroindustria de Córdoba y Sucre” BPIN 2020000100027, del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias).



REFERENCIAS

- Araujo, J. T. C. de, Martin-Pastor, M., Pérez, L., Pinazo, A., & Sousa, F. F. O. de. (2021). Development of anacardic acid-loaded zein nanoparticles: Physical chemical characterization, stability and antimicrobial improvement. Journal of Molecular Liquids, 332. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.115808

- Araújo, R. G., Rodríguez-Jasso, R. M., Ruiz, H. A., Govea-Salas, M., Rosas-Flores, W., Aguilar-González, M. A., Pintado, M. E., Lopez-Badillo, C., Luevanos, C., & Aguilar, C. N. (2020). Hydrothermal-microwave processing for starch extraction from Mexican avocado seeds: Operational conditions and characterization. Processes, 8(7). https://doi.org/10.3390/pr8070759

- ARRIETA, A. (2021). Thermal and Electrochemical Properties of Solid Biopolymer Electrolytes From Starch of Different Botanical Origin. Periódico Tchê Química, 18(38), 137–148. https://doi.org/10.52571/ptq.v18.n38.2021.10_arrieta_pgs_137_148.pdf

- Arrieta, A. A., Ducuara, J. A., & Combatt, E. M. (2022). Bio-Based Electroactive Composite Biopolymer Films From Cassava Starch / Anacardic Acid. Rasayan Journal of Chemistry, 2022(Special Issue), 103–109. https://doi.org/10.31788/RJC.2022.1558189

- Arrieta, A., Barrera, I., & Mendoza, J. (2022). Impedantiometric Behavior of Solid Biopolymer Electrolyte Elaborated from Cassava Starch Synthesized in Different pH. International Journal of Technology, 13(4), 912–920. https://doi.org/10.14716/ijtech.v13i4.5612

- Azmir, J., Zaidul, I. S. M., Rahman, M. M., Sharif, K. M., Mohamed, A., Sahena, F., Jahurul, M. H. A., Ghafoor, K., Norulaini, N. A. N., & Omar, A. K. M. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. Journal of Food Engineering, 117(4), 426–436. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014

- Balgude, D., & Sabnis, A. S. (2014). CNSL: An environment friendly alternative for the modern coating industry. Journal of Coatings Technology and Research, 11(2), 169–183. https://doi.org/10.1007/s11998-013-9521-3

- Buono, P., Duval, A., Avérous, L., & Habibi, Y. (2018). Clicking Biobased Polyphenols: A Sustainable Platform for Aromatic Polymeric Materials. ChemSusChem, 11(15), 2472–2491. https://doi.org/10.1002/cssc.201800595

- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. Ultrasonics Sonochemistry, 34, 540–560. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035

- Chemat, F., Zill-E-Huma, & Khan, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. Ultrasonics Sonochemistry, 18(4), 813–835. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2010.11.023

- Chen, J., Lü, S., Zhang, Z., Zhao, X., Li, X., Ning, P., & Liu, M. (2018). Environmentally friendly fertilizers: A review of materials used and their effects on the environment. Science of the Total Environment, 613–614, 829–839. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.186

- Chen, J., Wang, Y., Liu, J., & Xu, X. (2020). Preparation, characterization, physicochemical property and potential application of porous starch: A review. International Journal of Biological Macromolecules, 148, 1169–1181. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.055

- Chiaregato, C. G., & Faez, R. (2021). Micronutrients encapsulation by starch as an enhanced efficiency fertilizer. Carbohydrate Polymers, 271, 118419. https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2021.118419

- Correia, P. R., & Beirão-Da-Costa, M. L. (2012). Starch isolation from chestnut and acorn flours through alkaline and enzymatic methods. Food and Bioproducts Processing, 90(2), 309–316. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.06.005

- Da Silva, A. L., Da Silva, L. R. R., De Andrade Camargo, I., Da Silva Agostini, D. L., Dos Santos Rosa, D., De Oliveira, D. L. V., Fechine, P. B. A., & Mazzetto, S. E. (2016). Cardanol-based thermoset plastic reinforced by sponge gourd fibers (Luffa cylindrica). Polimeros, 26(1), 21–29. https://doi.org/10.1590/0104-1428.2276



REFERENCIAS

- Da Silva, L. R., Piler de Carvalho, C. W., Velasco, J. I., & Fakhouri, F. M. (2020). Extraction and characterization of starches from pigmented rice. International Journal of Biological Macromolecules, 156, 485–493. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.034

- Dong, G., Mu, Z., Liu, D., Shang, L., Zhang, W., Gao, Y., Zhao, M., Zhang, X., Chen, S., & Wei, M. (2021). Starch phosphate carbamate hydrogel based slow-release urea formulation with good water retentivity. International Journal of Biological Macromolecules, 190(May), 189–197. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.234

- Edoga, M. O., Fadipe, L., & Edoga, R. N. (2006). Extraction of Polyphenols from Cashew Nut Shell. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 9(9), 107–112.

- Falade, K. O., & Okafor, C. A. (2015). Physical, functional, and pasting properties of flours from corms of two Cocoyam (Colocasia esculenta and Xanthosoma sagittifolium) cultivars. Journal of Food Science and Technology, 52(6), 3440–3448. https://doi.org/10.1007/s13197-014-1368-9

- Furtado, L. B., Nascimento, R. C., Seidl, P. R., Guimarães, M. J. O. C., Costa, L. M., Rocha, J. C., & Ponciano, J. A. C. P. (2019). Eco-friendly corrosion inhibitors based on Cashew nut shell liquid (CNSL) for acidizing fluids. Journal of Molecular Liquids, 284, 393–404. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.02.083

- Galanakis, C. M. (2012). Recovery of high added-value components from food wastes: Conventional, emerging technologies and commercialized applications. Trends in Food Science and Technology, 26(2), 68–87. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.03.003

- Gautam, N., Garg, S., & Yadav, S. (2021). Underutilized finger millet crop for starch extraction, characterization, and utilization in the development of flexible thin film. Journal of Food Science and Technology, 58(11), 4411–4419. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04926-0

- Ghobashy, M. M. (2019). The application of natural polymer-based hydrogels for agriculture. In Hydrogels Based on Natural Polymers. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816421-1.00013-6

- Ibrahim, K. A., Naz, M. Y., Shukrullah, S., Sulaiman, S. A., Ghaffar, A., & AbdEl-Salam, N. M. (2019). Controlling nitrogen pollution via encapsulation of urea fertilizer in cross-linked corn starch. BioResources, 14(4), 7775–7789. https://doi.org/10.15376/biores.14.4.7775-7789

- Ike, D. C., Ibezim-Ezeani, M. U., & Akaranta, O. (2021). Cashew nutshell liquid and its derivatives in oil field applications: an update. Green Chemistry Letters and Reviews, 14(4), 618–631. https://doi.org/10.1080/17518253.2021.1991485

- Jiang, Q., Gao, W., Shi, Y., Li, X., Wang, H., Huang, L., & Xiao, P. (2013). Physicochemical properties and in vitro digestion of starches from different Dioscorea plants. Food Hydrocolloids, 32(2), 432–439. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2013.02.001

- Junlapong, K., Maijan, P., Chaibundit, C., & Chantarak, S. (2020). Effective adsorption of methylene blue by biodegradable superabsorbent cassava starch-based hydrogel. International Journal of Biological Macromolecules, 158, 258–264. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.247

- Kala, H. K., Mehta, R., Sen, K. K., Tandey, R., & Mandal, V. (2016). Critical analysis of research trends and issues in microwave assisted extraction of phenolics: Have we really done enough. TrAC - Trends in Analytical Chemistry, 85, 140–152. https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.09.007

- Kizil, R., Irudayaraj, J., & Seetharaman, K. (2002). Characterization of irradiated starches by using FT-Raman and FTIR spectroscopy. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 50(14), 3912–3918. https://doi.org/10.1021/jf011652p

- Koteich-Khatib, S., Vivas, J., Bahsas, A., Rosales-Oballos, Y., & Bullón, J. (2019). Caracterización por RMN y actividad antibacteriana de los componentes del aceite de la semilla de merey (Anacardium occidentale L.). Avances En Quimica, 14(1), 31–40.

REFERENCIAS



- Koteich Khatib, S., Bullón, J., Vivas, J., Bahsas, A., Rosales-Oballos, Y., Marquez, R., Forgiarini, A., & Salager, J. L. (2020). Synthesis, Characterization, Evaluation of Interfacial Properties and Antibacterial Activities of Dicarboxylate Anacardic Acid Derivatives from Cashew Nut Shell Liquid of Anacardium occidentale L. Journal of Surfactants and Detergents, 23(3), 503–512. https://doi.org/10.1002/jsde.12384

- Kyei, S. K., Akaranta, O., Darko, G., & Chukwu, U. J. (2019). Extraction, Characterization and Application of Cashew Nut Shell Liquid from Cashew Nut Shells. Chemical Science International Journal, December 2019, 1–10. https://doi.org/10.9734/csji/2019/v28i330143

- Kyei, S. K., Darko, G., & Akaranta, O. (2020). Chemistry and application of emerging ecofriendly antifouling paints: a review. Journal of Coatings Technology and Research, 17(2), 315–332. https://doi.org/10.1007/s11998-019-00294-3

- Lara-Flores, A. A., Araújo, R. G., Rodríguez-Jasso, R. M., Aguedo, M., Aguilar, C. N., Trajano, H. L., & Ruiz, H. A. (2018). Bioeconomy and Biorefinery: Valorization of Hemicellulose from Lignocellulosic Biomass and Potential Use of Avocado Residues as a Promising Resource of Bioproducts. Energy, Environment, and Sustainability, 141–170. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7431-8_8

- Majaron, V. F., da Silva, M. G., Bortoletto-Santos, R., Klaic, R., Giroto, A., Guimarães, G. G. F., Polito, W. L., Farinas, C. S., & Ribeiro, C. (2020). Synergy between castor oil polyurethane/starch polymer coating and local acidification by A. niger for increasing the efficiency of nitrogen fertilization using urea granules. Industrial Crops and Products, 154(November 2019), 112717. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112717

- Morais, S. M., Silva, K. A., Araujo, H., Vieira, I. G. P., Alves, D. R., Fontenelle, R. O. S., & Silva, A. M. S. (2017). Anacardic acid constituents from cashew nut shell liquid: NMR characterization and the effect of unsaturation on its biological activities. Pharmaceuticals, 10(1), 1–10. https://doi.org/10.3390/ph10010031

- Mwakalesi, A. J., & Potter, I. D. (2021). Targeting of cationic organic pesticide residues using polymer inclusion membranes containing anacardic acid from cashew nut shell liquid as a green carrier. Journal of Water Process Engineering, 43(March), 102222. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102222

- Nambela, L., Haule, L. V., & Mgani, Q. A. (2022). Anacardic acid isolated from cashew nut shells liquid: A potential precursor for the synthesis of anthraquinone dyes. Cleaner Chemical Engineering, 3(May), 100056. https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100056

- Philip, J. Y. N., Francisco, J. D. C., Dey, E. S., Buchweishaija, J., Mkayula, L. L., & Ye, L. (2008). Isolation of anacardic acid from natural cashew nut shell liquid (CNSL) using supercritical carbon dioxide. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 56(20), 9350–9354. https://doi.org/10.1021/jf801532a

- Pires, M. B., Amante, E. R., Lucia de Oliveira Petkowicz, C., Esmerino, E. A., Manoel da Cruz Rodrigues, A., & Meller da Silva, L. H. (2021). Impact of extraction methods and genotypes on the properties of starch from peach palm (Bactris gasipaes Kunth) fruits. Lwt, 150(May), 111983. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111983

- Preethi, R., Moses, J. A., & Anandharamakrishnan, C. (2021). Development of anacardic acid incorporated biopolymeric film for active packaging applications. Food Packaging and Shelf Life, 28(September 2020), 100656. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100656

- Qamruzzaman, M., Ahmed, F., & Mondal, M. I. H. (2022). An Overview on Starch-Based Sustainable Hydrogels: Potential Applications and Aspects. In Journal of Polymers and the Environment (Vol. 30, Issue 1). Springer US. https://doi.org/10.1007/s10924-021-02180-9

- Qiao, D., Liu, H., Yu, L., Bao, X., Simon, G. P., Petinakis, E., & Chen, L. (2016). Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by starch-based superabsorbent polymer. Carbohydrate Polymers, 147, 146–154. https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2016.04.010

- Qiao, D., Tu, W., Wang, Z., Yu, L., Zhang, B., Bao, X., Jiang, F., & Lin, Q. (2019). Influence of crosslinker amount on the microstructure and properties of starch-based superabsorbent polymers by one-step preparation at high starch concentration. International Journal of Biological Macromolecules, 129, 679–685. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.02.019

REFERENCIAS



- Rwahwire, S., Tomkova, B., Periyasamy, A. P., & Kale, B. M. (2018). Green thermoset reinforced biocomposites. In Green Composites for Automotive Applications. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102177-4.00003-3

- Salgado-Ordosgoitia, R. D., Rodríguez-Manrique, J. A., Cohen-Manrique, C. S., & Mendoza-Ortega, G. P. (2018). Characterization of the techno-functional properties of starch from purple yam (Dioscorea alata), Hawthorn yam (dioscorea rotundata) and Diamante 22-type yam. DYNA (Colombia), 85(207), 143–152. https://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.72869

- Salimi, M., Motamedi, E., Motesharezedeh, B., Hosseini, H. M., & Alikhani, H. A. (2020). Starch-g-poly(acrylic acid-co-acrylamide) composites reinforced with natural char nanoparticles toward environmentally benign slow-release urea fertilizers. Journal of Environmental Chemical Engineering, 8(3), 103765. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103765

- Sarkar, A., Biswas, D. R., Datta, S. C., Dwivedi, B. S., Bhattacharyya, R., Kumar, R., Bandyopadhyay, K. K., Saha, M., Chawla, G., Saha, J. K., & Patra, A. K. (2021). Preparation of novel biodegradable starch/poly(vinyl alcohol)/bentonite grafted polymeric films for fertilizer encapsulation. Carbohydrate Polymers, 259(December 2020), 117679. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.117679

- Savitri, E., Purwanto, E., Kodrat, A. N., & Yonathan, E. (2019). Controlled release fertilizer based on starch chitosan encapsulation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 703(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/703/1/012019

- Setyaningsih, W., Karmila, Fathimah, R. N., & Cahyanto, M. N. (2021). Process optimization for ultrasound-assisted starch production from cassava (manihot esculenta crantz) using response surface methodology. Agronomy, 11(1). https://doi.org/10.3390/agronomy11010117

- Sharma, P., Gaur, V. K., Sirohi, R., Larroche, C., Kim, S. H., & Pandey, A. (2020). Valorization of cashew nut processing residues for industrial applications. Industrial Crops and Products, 152(January), 112550. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112550

- Silva, G. M. de S., Veloso, C. M., Santos, L. S., Melo Neto, B. A. de, Fontan, R. da C. I., & Bonomo, R. C. F. (2020). Extraction and characterization of native starch obtained from the inhambu tuber. Journal of Food Science and Technology, 57(5), 1830–1839. https://doi.org/10.1007/s13197-019-04216-4

- Supare, K., & Mahanwar, P. (2022). Starch-chitosan hydrogels for the controlled-release of herbicide in agricultural applications: a study on the effect of the concentration of raw materials and crosslinkers. Journal of Polymers and the Environment, 30(6), 2448-2461. https://doi.org/10.1007/s10924-022-02379-4

- Supare, K., & Mahanwar, P. A. (2022). Starch-derived superabsorbent polymers in agriculture applications: an overview. Polymer Bulletin, 79(8), 5795–5824. https://doi.org/10.1007/s00289-021-03842-3

- Torres, M. D., Fradinho, P., Rodríguez, P., Falqué, E., Santos, V., & Domínguez, H. (2020). Biorefinery concept for discarded potatoes: Recovery of starch and bioactive compounds. Journal of Food Engineering, 275(December 2019). https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109886

- V., Remya; Deepak, Patil; V., Abitha; Ajay, Rane; Raghvendra, M. (2016). Biobased materials for polyurethane dispersions. Chemistry International, 2(3), 158–167. https://scholar.google.co.in/citations?view_op=view_citation&continue=/scholar%3Fhl%3Den%26as_sdt%3D0,5%26scilib%3D1&citilm=1&citation_for_view=r6opFNQAAAAJ:UxriW0iASnsC&hl=en&oi=p%0Ahttps://www.researchgate.net/profile/Raghvendra_Mishra3/publication/2871

- Vasconcelos, L., de Souza, M., de Oliveira, J., Filho, E. S., Silva, A., Mazzetto, S. E., Pereira, E. S., Oliveira, R. L., & Bezerra, L. (2021). Elaboration and characterization of bioactive films obtained from the incorporation of cashew nut shell liquid into a matrix of sodium alginate. Antioxidants, 10(9). https://doi.org/10.3390/antiox10091378

- Vilpoux, O. F., Brito, V. H., & Cereda, M. P. (2018). Starch extracted from corms, roots, rhizomes, and tubers for food application. In Starches for Food Application: Chemical, Technological and Health Properties. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809440-2.00004-6



REFERENCIAS

- Vudjung, C., & Saengsuwan, S. (2018). Biodegradable IPN Hydrogels Based on Pre-vulcanized Natural Rubber and Cassava Starch as Coating Membrane for Environment-Friendly Slow-Release Urea Fertilizer. Journal of Polymers and the Environment, 26(9), 3967–3980. https://doi.org/10.1007/s10924-018-1274-8

- Zafar, N., Niazi, M. B. K., Sher, F., Khalid, U., Jahan, Z., Shah, G. A., & Zia, M. (2021). Starch and polyvinyl alcohol encapsulated biodegradable nanocomposites for environment friendly slow release of urea fertilizer. Chemical Engineering Journal Advances, 7, 100123. https://doi.org/10.1016/j.ceja.2021.100123

- Zhang, W., Mu, Z., Dong, G., Wei, L., Bai, L., Fu, M., Zhao, X., Han, S., & Wang, S. (2020). Esterification modified starch by phosphates and urea via alcohol solvothermal route for its potential utilization for urea slow-releasing. International Journal of Biological Macromolecules, 163, 2448–2456. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.186

- Zoungranan, Y., Lynda, E., Dobi-Brice, K. K., Tchirioua, E., Bakary, C., & Yannick, D. D. (2020). Influence of natural factors on the biodegradation of simple and composite bioplastics based on cassava starch and corn starch. Journal of Environmental Chemical Engineering, 8(5), 104396. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104396

- Zukryandry, Hidayat, B., & Muslihudin. (2021). Timing of Extraction with Ultrasonic Bath System to Improve the Yield and Chemical Characteristics of Cassava Starch. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1012(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1012/1/012016