





Filmes de amido de mandioca reforçados com nanocelulose e adição de óleo de buriti (*Mauritia Flexuosa* L.)

Luzilene Sousa Rosas¹ ; José Francisco Lopes Filho² ; Jose Weliton Aguiar Dutra³ ;
Alvaro Itauna Schalcher Pereira^{4a} 

¹Campus Zé Doca - MA, CEP 65365-000, ⁴Campus Codó – MA, CEP 65400-000, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão, Brasil.

²Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual Paulista, CEP 15054-000, São José do Rio Preto – SP, Brasil.

³Departamento de Química, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, CEP 580051-970, Brasil.

^aalvaro.pereira@ifma.edu.br

Fecha recepción: noviembre 11 de 2022

Fecha aceptación: julio 6 de 2023

Resumo

Os filmes biodegradáveis obtidos a partir de biopolímeros são considerados uma alternativa para o desenvolvimento de embalagens biodegradáveis, substituindo o plástico produzido a partir do petróleo. O amido é considerado um dos biopolímeros com maior potencial para a produção de filmes biodegradáveis, porém, suas propriedades são inferiores aos plásticos convencionais. Assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver filmes biodegradáveis de amido de mandioca reforçados com nanocelulose e incorporados com óleo de buriti como agente bioativo. Os filmes foram preparados com 3 %p de amido (3 g/100 g de água destilada), glicerol (30 %), nanocelulose (0,3 e 0,6 %) e óleo de buriti (1 e 2 %), em relação à massa de amido. A adição de nanocelulose e óleo de buriti na matriz de fécula de mandioca promoveu aumento de espessura e opacidade, com diminuição da solubilidade dos filmes processados em relação ao controle. A adição de nanocelulose e óleo de buriti também promoveu redução nos valores de PVA, aumentado para a barreira de vapor d'água. Os resultados sugerem que o desenvolvimento de filmes biodegradáveis para conservação de alimentos é um campo promissor com forte apelo ambiental, que pode auxiliar na conservação de alimentos, porém este estudo ainda não é conclusivo, necessitando de mais investigações.

Palavras-chave: *Filmes biodegradáveis; Biopolímeros; Nanocelulose; Óleo de buriti.*

Nanocellulose reinforced mandiocan films and buriti oil addition (*Mauritia Flexuosa* L.)

Abstract

The biodegradable films obtained from biopolymers are considered an alternative for the development of biodegradable packaging, replacing the plastic produced from petroleum. Starch is considered one of the biopolymers with the greatest potential for the production of biodegradable films, however, its properties are inferior to the conventional plastics. Thus, the objective of this work was to develop biodegradable cassava starch films reinforced with nanocellulose and incorporated with buriti oil as a bioactive agent. The films were prepared with 3%w starch (3 g/100 g distilled water), glycerol (30%), nanocellulose (0.3 and 0.6%) and buriti oil (1 e 2%), relative to the starch mass. The addition of nanocellulose and buriti oil in the cassava starch matrix promoted an increase in thickness and opacity, with a decrease in the solubility of the processed films compared to the control. The addition of nanocellulose and buriti oil also promoted a reduction in the values of PVA, increased to the water vapor barrier. The results suggest that the development of biodegradable films for food preservation is a promising field with a strong environmental appeal, which may help to preserve food, but this study is still not conclusive, requires further investigation.

Keywords: *Biodegradable films; Biopolymers; Nanocellulose; Buriti oil.*

Películas de mandioca reforzada con nanocelulosa y adición de aceite de burití (*Mauritia Flexuosa* L.)

Resumen

Películas biodegradables obtenidas a partir de biopolímeros se consideran una alternativa para el desarrollo de envases biodegradables, reemplazando al plástico producido a partir del petróleo. El almidón es considerado uno de los biopolímeros con mayor potencial para la producción de películas biodegradables, sin embargo, sus propiedades son inferiores a los plásticos convencionales. El objetivo de este trabajo fue desarrollar películas de almidón de yuca biodegradables reforzadas con nanocelulosa e incorporadas con aceite de burití como agente bioactivo. Las películas fueron preparadas con 3%p de almidón (3 g/100 g de agua destilada), glicerol (30%), nanocelulosa (0,3 y 0,6%) y aceite de burití (1 e 2%), relativo al almidón. masa. La adición de nanocelulosa y aceite de burití en la matriz de almidón de yuca promovió un aumento del espesor y la opacidad, con una disminución de la solubilidad de las películas procesadas en comparación con el control. La adición de nanocelulosa y aceite de burití también promovió una reducción en los valores de PVA, aumentados a la barrera de vapor de agua. Los resultados sugieren que el desarrollo de películas biodegradables para la conservación de alimentos es un campo prometedor con un fuerte atractivo ambiental, que puede ayudar a conservar los alimentos, pero este estudio aún no es concluyente, requiere más investigación.

Palabras clave: *Películas biodegradables; Biopolímeros; Nanocelulosa; Aceite de Buriti.*

Introdução

A perda de alimentos no Brasil ocorre ao longo de toda a cadeia, indo da produção até o consumo. De toda produção brasileira, 10 % da perda ocorrem na colheita; 50 % no manuseio e transporte; 30 % nas Centrais de Abastecimentos e 10 % diluídos entre supermercados e consumidores [1]. Segundo estudo da FAO, desperdiça-se grandes quantidades de alimentos devido às normas de qualidade que dão excessiva importância à aparência. Por isso que existe o desperdício dos produtores, transportadores, fornecedores, comerciantes que muitas vezes jogam fora alimentos bons ao consumo só porque estão amassados ou não estão apresentáveis aos olhos dos consumidores mais exigentes [2].

O interesse de manter, ou melhorar, a qualidade dos produtos embalados e, ao mesmo tempo, reduzir a quantidade de material não degradável lançado no meio ambiente, atrelado ao desenvolvimento sustentável, tem incentivado pesquisas em todo o mundo no sentido de incrementar e desenvolver embalagens biodegradáveis provindas de fontes renováveis. Um dos caminhos é a produção de polímeros a partir de fontes naturais renováveis devido a esses materiais exibirem propriedades como biodegradabilidade, biocompatibilidade, baixa toxicidade, abundância de matéria-prima renovável e baixo custo [3,4]. Assim, os biopolímeros são considerados como uma matéria-prima alternativa ao plástico produzido pelo petróleo [5].

Os filmes biodegradáveis podem ser preparados a partir de polímeros naturais, tais como polissacarídeos (amido, carragenina, alginatos, entre outros) e proteínas (gelatina, caseína, glúten de trigo, zeína e outros), aos quais podem ser incorporados lipídeos para garantir uma menor permeabilidade ao vapor d'água [6]. O amido é considerado um dos biopolímeros com maior potencial para a produção de materiais biodegradáveis, em especial embalagens de alimentos, onde o tempo de uso é relativamente curto [7].

Na busca por materiais biodegradáveis que possam ser utilizados como embalagens, os filmes de amido estão entre os primeiros filmes biodegradáveis obtidos, por serem uma alternativa mais viável economicamente às resinas tradicionais e por advirem de fontes naturais renováveis. No entanto, a baixa resistência mecânica e a sua alta sensibilidade à água restringem a utilização

desses filmes, especialmente em alimentos com alta umidade.

Atualmente muitos trabalhos vêm utilizando nanopartículas incorporadas à matriz polimérica durante o processamento, dando origem aos nanocompósitos, que são constituídos de pelo menos dois componentes. Esses materiais melhoram as propriedades das embalagens em termos de flexibilidade, estabilidade à temperatura e umidade, durabilidade e propriedades de barreira a gás. Nanomateriais com propriedades nutricionais e/ou antimicrobianas e nanosensores são empregados na elaboração de embalagens inteligentes [8].

Entre os nanomateriais, a celulose tem sido muito empregada na elaboração de novos materiais, devido à boa compatibilidade química entre e com a matriz polimérica, o que desempenha um papel importante na dispersão da carga na matriz e na adesão entre as fases [9]. Devido à superfície hidrofílica da celulose, interações entre nanopartículas celulósicas e matrizes hidrofílicas são geralmente satisfatórias [10], promovendo melhorias nas propriedades mecânicas dos materiais.

Além das propriedades mecânicas, as propriedades funcionais também são importantes na elaboração de novas embalagens. A adição de agentes naturais bioativos à matriz polimérica pode proporcionar ao biopolímero funcionalidades, como ação antimicrobiana, antioxidante entre outras. Nessa direção, têm sido desenvolvidas pesquisas visando à substituição de aditivos sintéticos, utilizados na conservação e proteção dos alimentos, por agentes mais naturais e menos agressivos à saúde do consumidor.

Diante da necessidade de reduzir as perdas na cadeia produtiva, que vai desde a produção até o consumo, bem como reduzir a quantidade de material não degradável lançado no meio ambiente e aumentar o tempo de prateleira dos produtos alimentícios, este trabalho se propõe a elaborar filmes de amido de mandioca reforçado com nanocelulose e adicionado de óleo de buriti (*Mauritia flexuosa* L.), a fim de elaborar novos materiais que atendam às novas exigências do mercado consumidor, que cada vez mais consciente e informado, tende a demandar por produtos seguros e de qualidade, atrelados ao desenvolvimento sustentável.

O buriti (*Mauritia flexuosa* L.) também é uma palmeira da família *Palmae*, que vegeta as regiões alagadas e úmidas do Centro-Oeste, Norte e

Nordeste do Brasil [11]. Da polpa do fruto do buriti é extraído o óleo que desperta interesse devido à sua composição química, sendo rico em carotenoides, ácidos graxos e tocoferol [12]. Além de contribuir como agente plastificante na produção de filmes biodegradáveis [13]. Durães *et al.* [14] utilizando o óleo de buriti na síntese de compósitos de poliestireno e de polimetacrilato para produção de plásticos biodegradáveis, mostraram que o óleo de buriti, quando misturado a determinados polímeros, produz materiais fotoprotetores e fotoluminescentes, mais flexíveis e com excelente estabilidade térmica.

Assim, o óleo de buriti apresenta potencial como agente plastificante ao ser incorporado nos biofilmes.

Deve-se ressaltar que o buriti e seus derivados são ricos em compostos antioxidantes, sendo considerado fonte de carotenoides, ácido ascórbico, compostos fenólicos, dentre outros [15]. O óleo que desperta interesse devido à sua composição química, sendo rico em carotenoides, ácidos graxos e tocoferol [12]. Batista *et al.* [16], em ensaios de atividade antibacteriana *in vitro*, mostraram que o óleo do buriti evidenciou inibição de quatro dos microorganismos avaliados: *Enterobacter aerogenes*, *Bacillus subtilis*, *Klebsiella pneumoniae* e *Staphylococcus aureus*, o que pode ser promissor quanto à utilização do óleo de buriti em filmes para alimentos, como agente antibacteriano natural.

O óleo de buriti possui uma composição química complexa, sendo o betacaroteno e o ácido oleico os dois principais constituintes, possui o maior porcentual de betacaroteno dentre todas as plantas conhecidas e estudadas, o que é responsável pela propriedade de absorção de luz desta substância. Já o ácido oleico presente em 76% do óleo de buriti, é o responsável pela emissão de luz [14] e contribui como agente plastificante na produção de filmes biodegradáveis [11].

Parte experimental

Material

Amido de mandioca obtido da empresa “M.W.A. Comércio de Produtos alimentícios LTDA”, óleo de buriti cedido por produtores rurais do município de Caxias, Maranhão, Brasil, glicerol da marca (Dinâmica, Brasil) e solução aquosa de nanocelulose branqueada.

Elaboração do filme

Os filmes foram elaborados pelo método de secagem por moldagem, denominado de *casting*. A solução filmogênica foi preparada com 3% de amido (3 g/100 g de água destilada), glicerol (30%), solução aquosas de nanocelulose (0,3 e 0,6%) e óleo de buriti (1 e 2%), ambos em relação à massa do amido. Na sequência 200 g da solução foi espalhada sobre uma forma de teflon retangular com dimensões de 29 x 19,5 cm. A secagem do material ocorreu em estufa com circulação de ar à temperatura de 40 °C durante 8 h. Após a secagem, os filmes foram armazenados em embalagem de polietileno, para posterior preparo e uso nas análises. As formulações escolhidas para análises estão dispostas na **Tabela 1**.

Tabela 1. Composição dos filmes de amido de mandioca elaborados com adição de nanocelulose e óleo de buriti (*Mauritia flexuosa* L.) em p/p de amido.

Filme	Nanocelulose (%)	Óleo de buriti (%)
C	-	-
N ₁	0,3	-
N ₂	0,6	-
OB ₁	-	1
OB ₂	-	2
N ₁ /OB ₁	0,3	1
N ₁ /OB ₂	0,3	2
N ₂ /OB ₁	0,6	1
N ₂ /OB ₂	0,6	2

C (controle), N₁ (0,3% de nanocelulose), N₂ (0,6% de nanocelulose), OB₁ (1% de óleo de buriti), OB₂ (2% de óleo de buriti), N₁OB₁ (0,3% de nanocelulose e 1% de óleo de buriti), N₁OB₂ (1% de nanocelulose e 2% de óleo de buriti), N₂OB₁ (0,6% de nanocelulose e 1% de óleo de buriti) e N₂OB₂ (0,6% de nanocelulose e 2% de óleo de buriti).

Caracterização do filme

Espessura. Os filmes foram previamente cortados, com medidas aproximadas de 13 x 2,5 cm. Em cada retângulo, foram realizadas seis leituras aleatórias para determinação da espessura. As leituras foram feitas utilizando um micrômetro digital da marca Digimess, com uma resolução de 0,001 milímetros. A espessura dos filmes produzidos foi obtida pela média aritmética dos valores de seis pontos aleatórios em diferentes seguimentos dos filmes [17,18].

Solubilidade. A solubilidade dos filmes em água foi realizada conforme [19]. Inicialmente foram cortados três discos de 2,0 cm de diâmetro de

cada amostra que foram submetidos à secagem por 24 horas em estufa a 105 °C. Após esse tempo, as amostras foram pesadas para determinação da massa inicial (m_i). Na sequência, as amostras foram imersas em 50 mL de água destilada e mantidas sob agitação lenta e constante de 72 rpm em shaker (Marconi, MA-410) por 24 h a temperatura de 25 °C. Passado este período, os filmes foram retirados da água e secos em estufa a 105 °C por 24 h para determinação da massa seca final (m_f).

A solubilidade em água foi expressa em termos de massa seca dissolvida, sendo calculada de acordo com a Equação (1).

$$\text{Solubilidade} = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \times 100 \quad (1)$$

Onde: m_i é a massa inicial da amostra e m_f , a massa seca final da amostra após solubilização.

Opacidade. As análises de opacidade foram realizadas em um espectrofotômetro (Biospectro, SP-220), em que foram realizadas as leituras de seis pontos de cada filme, como proposto [20,21]. Os filmes de amido de mandioca foram cortados em retângulos e aderidos à parede interna da cubeta do espectrofotômetro e submetidos à medição na faixa do comprimento de onda da luz visível, de 500 nm, para se obter a absorvância do filme na região do visível. A opacidade foi calculada segundo a Equação (2),

$$\text{Opacidade} = \frac{A_{500}}{X} \quad (2)$$

em que A é a absorvância a 500 nm e X a espessura do filme (mm).

Permeabilidade ao vapor de água (PVA). A PVA é um método gravimétrico que envolve a vedação do filme a ser testado em uma cápsula, parcialmente, cheia de água ou solução saturada de sal (método da água) ou dessecante (método do dessecante), o que deixa um espaço de ar entre o filme e a solução de água, sal saturado ou dessecante.

Neste trabalho, a determinação da PVA dos filmes foi realizada pelo método gravimétrico com o dessecante a 25 °C utilizando-se a ASTM E-96-95 [22]. As células de permeação utilizadas eram de acrílico com 3,4 cm de diâmetro e 9,08 cm² de área

de permeação. As células foram preenchidas com o dessecante (sílica gel) em aproximadamente um terço da sua capacidade e vedadas com as amostras dos filmes elaborados, após a vedação as células foram hermeticamente fechadas com (0 % de umidade relativa e 0,0 mmHg de pressão de vapor d'água). Na sequência as células foram colocadas em dessecador contendo água destilada a 25 °C, umidade relativa de 100 % e 23,76 mmHg de pressão de vapor d'água. O fluxo de água nos filmes promoveu um aumento de massa que foi determinado por pesagem em balança analítica a cada 24 h durante 10 dias. Todas as análises foram realizadas em triplicatas.

O cálculo da PVA se deu segundo a Equação (3), sendo feito com três repetições para cada amostra.

$$PVA = \frac{m \cdot e}{t \cdot A \cdot \Delta p} \quad (3)$$

Onde: PVA : permeabilidade ao vapor de água (g.mm/h.m².KPa); m : diferença de massa do filme (g); e : espessura média do filme (mm); t : tempo em que ocorre ganho de massa (h); A : área de permeação do filme (m²); e Δp : diferença de pressão de vapor d'água a 100 % e 0 % de umidade relativa à 25 °C e (kPa).

Análise estatística

Os resultados dos ensaios foram analisados estatisticamente por Análise de Variância (ANOVA) utilizando o programa estatístico Minitab 17. O teste de Tukey foi aplicado para análise das diferenças significativas entre os resultados obtidos, no intervalo de confiança de 95 %.

Resultados e discussão

Os filmes de amido elaborados com adição de nanocelulose e óleo de buriti foram analisados quanto à espessura, solubilidade, opacidade e permeabilidade ao vapor d'água.

Caracterização do filme

Em termos de características visuais, os filmes elaborados com nanocelulose sem óleo de buriti ficaram incolores conforme **Figura 1 (a)**, já os filmes com a incorporação do óleo de buriti apresentaram coloração amarela, variando a intensidade de acordo com o teor do óleo de buriti adicionado como mostra **Figura 1 (b)**. Todos os filmes ficaram uniformes.



Figura 1. Filmes obtidos após a secagem.

Espessura. Os filmes de amido de mandioca com adição de nanocelulose e óleo de buriti sob diferentes percentuais de adição, apresentaram variações de espessura significativas ($p < 0,05$)

para os diferentes filmes, apesar de terem sido elaborados a partir de valores pré-estabelecidos de 200g de massa de solução filmogênica, conforme mostra a **Tabela 2**.

Tabela 2. Médias de espessura (mm), solubilidade (%) e opacidade (Abs. mm^{-1}) dos filmes de amido de mandioca.

Filmes	Espessura (mm)	Solubilidade (%)	Opacidade (Abs. mm^{-1})
C	$0,099 \pm 0,017^d$	$47,350 \pm 8,350^a$	$1,666 \pm 0,059^c$
N ₁	$0,103 \pm 0,009^{c,d}$	$35,870 \pm 6,410^{a,b}$	$2,283 \pm 0,334^{a,b}$
N ₂	$0,120 \pm 0,016^{a,b}$	$33,653 \pm 1,462^b$	$2,460 \pm 0,439^a$
OB ₁	$0,121 \pm 0,005^{a,b}$	$32,900 \pm 3,880^b$	$2,185 \pm 0,217^{a,b,c}$
OB ₂	$0,125 \pm 0,004^{a,b}$	$33,033 \pm 0,965^b$	$2,537 \pm 0,253^a$
N ₁ /OB ₁	$0,111 \pm 0,010^{b,c,d}$	$34,440 \pm 3,320^b$	$1,824 \pm 0,288^{b,c}$
N ₁ /OB ₂	$0,122 \pm 0,007^{a,b}$	$35,400 \pm 1,930^{a,b}$	$2,140 \pm 0,318^{a,b,c}$
N ₂ /OB ₁	$0,117 \pm 0,004^{a,b,c}$	$27,430 \pm 4,160^b$	$1,679 \pm 0,239^c$
N ₂ /OB ₂	$0,131 \pm 0,013^a$	$31,470 \pm 3,020^b$	$2,655 \pm 0,293^a$

Valores que apresentam a mesma letra, em uma mesma coluna, não apresentam diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey a 95 % de confiança.

Segundo Mali *et al.* [23], o controle da espessura dos filmes produzidos por *casting* é uma etapa que merece atenção, pois interfere nas características dos filmes. A análise estatística mostrou que os resultados de espessura obtidos para os filmes de amidos com a associação nanocelulose/óleo de buriti apresentam diferença significativa ($p < 0,05$), quando comparados ao controle.

Dentre os filmes elaborados o maior valor de espessura encontrado foi para o filme com maior concentração de nanocelulose e óleo de buriti (N₂OB₂), que apresentou um valor de 0,131 mm em espessura. Filmes com nanocelulose N₁ e N₂ sem óleo de buriti apresentaram diferença significativa de espessura, mostrando a influência do aumento da concentração de nanocelulose na espessura do filme. Já os filmes com óleo de buriti OB₁ e OB₂ sem nanocelulose não apresentaram diferença

significativa entre si, com valores de espessura 0,121 e 0,125 mm, respectivamente, porém, quando comparados ao controle, houve variação significativa. Diversos estudos com filmes a base de amido elaborado por *casting*, com adição de diferentes aditivos, em diferentes concentrações, relatam diferenças significativas nos valores de espessuras para as formulações estudadas.

Machado *et al.* [24] ao analisarem a influência da incorporação de nanopartículas em filmes biodegradáveis de amido plastificados com glicerol, encontraram valores de espessura entre 0,096 e 0,147 mm. Desta forma, apesar das diferenças encontradas, os valores de espessura encontrados neste trabalho para os filmes com adição de nanocelulose e óleo de buriti estão dentro da variação relatada na literatura para trabalhos dessa natureza.

Solubilidade. De acordo com a **Tabela 2**, observa-se que o filme controle apresentou diferença significativa em relação aos filmes adicionados de nanocelulose e óleo de buriti, sendo o mais solúvel em água. Entre as associações nanocelulose/óleo de buriti os valores de solubilidade encontrados foram reduzidos de 34,44 para 27,43 %, para os filmes N_1/OB_1 e N_2/OB_1 , respectivamente, o mesmo comportamento foi observado para os filmes N_1/OB_2 e N_2/OB_2 que apresentaram redução da solubilidade de 35,40 para 31,47 %, respectivamente, mostrando que o aumento na concentração de nanocelulose para a associação nanocelulose/óleo de buriti, influenciou na redução da solubilidade, produzindo filmes menos solúveis que o controle com 47,35 % de solubilidade.

Pereira [25] ao elaborar filmes de amido, também percebeu uma redução da solubilidade de 61,07 para 45,90 %, quando foi adicionado nanocristais de celulose, concordando com os resultados encontrados neste trabalho.

Os filmes da associação nanocelulose/óleo de buriti em relação ao controle apresentaram redução significativa da solubilidade, porém ao analisar os filmes elaborados com a mesma concentração de nanocelulose e diferentes concentrações de óleo de buriti percebeu-se que o aumento na concentração do óleo provocou aumento da solubilidade de 34,44 para 35,40 % (N_1/OB_1 e N_1/OB_2), respectivamente e de 27,43 para 31,47 % (N_2/OB_1 e N_2/OB_2), respectivamente. Esse comportamento provavelmente se deve em função da diminuição da capacidade de diluição do óleo de buriti na matriz, diminuindo assim, a interação do óleo com a matriz polimérica. Para Kalemba e Kunicka [26] a natureza hidrofóbica e a alta viscosidade dos óleos essenciais pode reduzir a capacidade de diluição ou causar distribuição desigual do óleo através do meio, mesmo com o uso de emulsificantes.

Para os filmes elaborados com nanocelulose sem óleo de buriti, N_1 e N_2 , o aumento na concentração de nanocelulose de 0,3 para 0,6 %, provocou uma redução na solubilidade de 35,87 para 33,65 %, respectivamente, ficando abaixo da solubilidade do controle (47,35 %). Jiang *et al.* [27] ao elaborarem filmes de amido de ervilha com adição 0,6 % de nanopátulas de fécula de batata, obtiveram filmes com solubilidade aproximada de 22 %, sendo que a solubilidade do filme controle foi de 45 %. Esse comportamento se assemelha ao apresentado neste estudo.

A diminuição da solubilidade nos estudos citados sugere uma boa interação dos grupos hidrofílicos da nanocelulose com as hidroxilas do amido, através de ligações de hidrogênio, aumentando a barreira à água, promovendo assim, a redução da solubilidade dos filmes em água [28,29].

Os filmes elaborados com óleo de buriti sem nanocelulose OB_1 e OB_2 praticamente não apresentaram variação na solubilidade, 32,90 e 33,03 %, respectivamente, porém, estes valores ainda ficaram menores que a solubilidade do controle (47,35 %), provavelmente essa redução foi influenciada pelo caráter hidrofóbico do óleo de buriti. A adição de substâncias hidrofóbicas pode atuar como barreira em filmes de amido. Estas substâncias podem originar regiões na matriz do filme com menor polaridade que o amido, exercendo efeito de barreira através da redução da água adsorvida na superfície do filme [30].

Opacidade. A adição de nanocelulose e óleo de buriti aos filmes de amido de mandioca alteraram a opacidade conforme **Tabela 2**. Os resultados mostraram que os filmes de amido elaborados com a associação nanocelulose/óleo de buriti apresentaram valores de opacidade variando de 1,679 a 2,655 abs.mm^{-1} , com algumas diferenças significativas em relação ao controle que apresentou 1,666 abs.mm^{-1} de opacidade. Analisando a **Tabela 2**, observa-se que os filmes elaborados apresentaram um aumento dos valores de opacidade com a adição de nanocelulose e óleo de buriti separadamente, sendo que os maiores valores foram observados nos filmes com as maiores concentrações, tanto de nanocelulose como de óleo de buriti. O filme com adição de 2 % de óleo de buriti foi o que apresentou maior valor de opacidade. Este fato também foi observado por Pranoto *et al.* [31] em estudos com incorporação de óleo de alho em filmes de alginato, o qual afetou a transparência e aparência do filme, demonstrando-se mais amarelado.

No entanto, observou-se que os filmes da associação nanocelulose/óleo de buriti apresentaram os menores valores de opacidade, exceto o filme de maior concentração (N_2/OB_2), que apresentou uma coloração mais amarelada em função da concentração do óleo de buriti, o que deixou o filme mais opaco. A redução dos valores de opacidade para os filmes da associação nanocelulose/óleo de buriti, provavelmente ocorreu mediante uma boa interação entre os

componentes do filme e a matriz polimérica, o que sugere que as espécies químicas presentes nos constituintes interferem significativamente nas propriedades dos filmes.

Permeabilidade ao vapor de água (PVA).

Conhecer a PVA dos materiais ajuda a definir sua aplicabilidade, como, por exemplo, filmes muito permeáveis podem ser utilizados para embalar produtos frescos [28]. De acordo com a **Tabela 3**, percebe-se que os resultados da PVA encontrados para os filmes elaborados apresentam diferença significativa quando comparados ao controle, que apresentou PVA de $6,5 \times 10^{-8}$ g.mm/h.m². KPa.

Tabela 3. Resultados da PVA (g.mm/h.m². KPa) dos filmes de amido de mandioca.

Filmes	PVA (g.mm/h.m ² . KPa)x10 ⁻⁸
	Média ± desvio-padrão
C	6,527 ± 0,297 ^{a,b}
N ₁	3,717 ± 0,057 ^c
N ₂	2,966 ± 0,451 ^c
OB ₁	4,547 ± 0,302 ^{b,c}
OB ₂	4,011 ± 0,339 ^c
N ₁ /OB ₁	3,805 ± 0,159 ^c
N ₁ /OB ₂	2,691 ± 0,151 ^c
N ₂ /OB ₁	3,904 ± 0,395 ^c
N ₂ /OB ₂	7,500 ± 1,980 ^a

Valores que apresentam a mesma letra, em uma mesma coluna, não apresentam diferenças significativas ($p < 0,05$) pelo Teste de Tukey a 95% de confiança. C (controle), N₁ (0,3% de nanocelulose), N₂ (0,6% de nanocelulose), OB₁ (1% de óleo de buriti), OB₂ (2% de óleo de buriti), N₁/OB₁ (0,3% de nanocelulose e 1% de óleo de buriti), N₁/OB₂ (1% de nanocelulose e 2% de óleo de buriti), N₂/OB₁ (0,6% de nanocelulose e 1% de óleo de buriti) e N₂/OB₂ (0,6% de nanocelulose e 2% de óleo de buriti).

Os resultados apresentados na **Tabela 3** mostram que a adição de nanocelulose aos filmes de amido (N₁ e N₂) promoveram uma redução na permeabilidade ao vapor d'água de 50,44% e 60,45%, respectivamente, em comparação a PVA do controle.

De acordo com Silva *et al.* [32] a nanocelulose, quando adicionada a filmes de amido em qualquer concentração, provoca uma redução na permeabilidade ao vapor d'água, promovendo alteração na estrutura do nanocompósito, em virtude da nanocelulose quando associada ao glicerol atuar como barreira, diminuindo os espaços livres na matriz de polimérica e consequente

obstrução da passagem do vapor. Esse efeito é atribuído à presença de fortes interações de hidrogênio entre os nanocristais, que possuem elevada cristalinidade, com a matriz hidrofílica de amido e o glicerol, agindo assim como uma barreira e diminuindo os espaços livres na matriz polimérica, dificultando a passagem de vapores [28,29].

Os filmes de amido com adição de óleo de buriti também apresentaram redução nos valores da PVA, 39,37% para OB₁ e 46,52% para OB₂, sendo que a redução foi mais acentuada para o filme OB₂, que apresenta o maior teor de óleo de buriti. Yang e Paulson [33] notaram que a adição de ácidos graxos à matriz polimérica produz uma diminuição do espaço livre para a passagem de água, devido à alta polaridade da carboxila e consequente redução da PVA. Esse comportamento também foi observado ao analisar a solubilidade dos filmes elaborados neste trabalho.

Para os filmes da associação nanocelulose/óleo de buriti os valores de PVA apresentaram redução em comparação ao controle com diferença significativa, apenas o filme N₂/OB₂ apresentou valor de PVA maior que o controle, sugerindo que a interação entre as maiores concentrações de nanocelulose e óleo de buriti não tiveram uma boa interação, permitindo a passagem de vapor d'água, através de espaço existente no filme.

Conclusão

A adição de nanocelulose e óleo de buriti na elaboração de filmes de amido proporcionaram materiais uniformes e maleáveis, bem como alterações significativas como aumento de espessura, diminuição da solubilidade e aumento da opacidade, quando comparados ao controle. Além de promoverem uma redução da PVA, aumentando assim, a barreira à passagem de vapor d'água. Este estudo mostra que a adição de nanocelulose e óleo de buriti à matriz polimérica de amido colaboram para o desenvolvimento de novos materiais poliméricos biodegradáveis.

Referências

- [1] Brasília, D. C. Desperdício: Custo para todos – Alimentos apodrecem enquanto milhões de pessoas passam fome (site). Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Disponível: www.ipea.gov.br, acesso em 05 de julho 2023.

- [2] Food and nutrition paper (FAO). Carbohydrates in human nutrition. Rome, Itália; 1998.
- [3] Mecking S. Nature or Petrochemistry: Biologically Degradable Materials. *Angewandte Chemie, International Edition*. 2004;43(9):1078-1085. doi.org/10.1002/anie.200301655
- [4] Chen CH, Kuo WS, Lai LS. Rheological and physical characterization of film-forming solutions and edible films from tapioca tarch/decolorized hsiantSao leaf gum. *Food Hydrocolloids*. 2009;23:2132–2014. doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.05.015
- [5] Fakhouri FM, Costa D, Yamashita F, Martelli SM, Jesus RC, Alganer K, et al. Comparative study of processing methods for starch/gelatin films. *Carbohydrate Polymers*. 2013;95(2):681-689. doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.03.027
- [6] Davanço T, Tanada-Palmu P, Grosso C. Filmes compostos de gelatina, triacetina, ácido esteárico ou capríco: efeito do pH e da adição de surfactantes sobre a funcionalidade dos filmes. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. 2007;27(2):408-416. doi.org/10.1590/S0101-20612007000200034
- [7] Wang G, Thompson MR, Liu Q. Controlling the moisture absorption capacity in a fiber-reinforced thermoplastic starch using sodium trimetaphosphate. *Industrial Crops and Products*. 2012;36(1):299 -303. doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.10.015
- [8] Chaudry Q, Castle L. Food applications of nanotechnologies: An overview of opportunities and challenges for developing countries. *Trends in Food Science and Technology*. 2011;22(11):595-603. doi.org/10.1016/j.tifs.2011.01.001
- [9] Hubbe MA, Rojas OJ, Lucia LA, Sain M. Cellulosic Nanocomposites: A Review. *Bioresources*. 2008;3:929-980.
- [10] Bondeson D, Oksman K. Poly(lactic Acid)/Cellulose Whisker Nanocomposites Modified by Poly(vinyl Alcohol). *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2007;38:2486-2492. doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.08.001
- [11] Almeida CB. Características estruturais e funcionais de Biofilmes produzidos com zeína e óleos vegetais Comestíveis (Tese de Doutorado), São Jose do Rio Preto, Brasil: Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 2010.
- [12] Rosso VV, Mercadante AZ. Identification and quantification of carotenoids, by HPLC-PDA-MS/MS, from Amazonian fruits. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2007;55(13):5062-5072. doi.org/10.1021/jf0705421
- [13] Almeida SP, Proença CEB, Sano SM, Ribeiro JF. *Cerrado: espécies vegetais úteis*. Planaltina, Brasil: EMBRAPA-CPAC, 1998.
- [14] Durães JA, Drummond AL, Pimentel TAPF, Murta MM, Bicalho FS, Moreira SGC, Sales MJ. Absorption and photoluminescence of Buriti oil/polystyrene and Buriti oil/poly(methyl methacrylate) blends. *European Polymer Journal*. 2006;42:3324.
- [15] Batista JS, Olinda RG, Medeiros VB, Rodrigues CMF, Oliveira AF, Paiva ES, et al. Atividade antibacteriana e cicatrizante do óleo de Buriti *Mauritia flexuosa* L. *Ciência Rural*. 2012;42(1):136-141. doi.org/10.1590/S0103-84782012000100022
- [16] Melo KS, Figueirêdo RMF, Queiroz AJM. Comportamento reológico da polpa do buriti com leite. *Revista Biologia e Ciências da Terra*. 2008;8(2):197-206.
- [17] Perez-Gago MB, Krochta JM. Water vapor permeability of whey protein emulsion films as affected by pH. *Journal of Food Science*. 1999;64(4):695-698.
- [18] Hsu BL, Weng YM, Liao YH, Chen W. Structural investigation of edible zein films/coating and determining their thickness by FT-Raman. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2005;53(13):5089-5095. doi.org/10.1021/jf0501490
- [19] Gontard N. *Films et enrobages comestibles: Etude et amélioration des propriétés filmogènes du gluten*. (Doctoral Thesis). Montpellier, França: Université des Sciences et Techniques du Languedoc; 1991.
- [20] Cao N, Fu Y, He J. Preparation and physical properties of soy protein isolate and gelatin composite films. *Journal Food Hydrocoll*. 2007;21(7):1153-1162. doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.09.001
- [21] Gounga ME, Xu SY, Wang Z. Whey protein isolate-based edible films as affected by protein concentration, glycerol ratio and pullulan addition in film formation. *Journal Food Engineering*. 2007;83(4):521-530. doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.04.008
- [22] ASTM. American Society for Testing Materials

- (ASTM E 96-05), Philadelphia, PA, 2005.
- [23] Mali S, Grossmann MVE, Yamashita F. Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização. *Starch films: production, properties and potential of utilization*. *Semina Ciências Agrárias*. 2010;31:137-156.
- [24] Machado BAS, Reis JHO, Da Silva JB, Cruz LS, Nunes IL, Pereira FV, *et al.* Obtenção de nanocelulose da fibra de coco verde e incorporação em filmes biodegradáveis de amido plastificados com glicerol. *Química Nova*. 2014;37(8):1275-1282. doi.org/10.5935/0100-4042.20140220
- [25] Pereira FV, Paula EL, Mesquita JP, Lucas AA, Mano V. Bionanocompósitos preparados por incorporação de nanocristais de celulose em polímeros biodegradáveis por meio de evaporação de solvente, automontagem ou eletrofição. *Química Nova*. 2014;37(7):1209-1219. doi.org/10.5935/0100-4042.20140141
- [26] Kalemba D, Kunicka A. Antibacterial and antifungal properties of essential oils. *Current Medicinal Chemistry*. 2003;10(10):813-829. doi.org/10.2174/0929867033457719
- [27] Jiang S, Liu C, Wang X, Xiong L, Sun Q. Physicochemical properties of starch nanocomposite films enhanced by self-assembled potato starch nanoparticles. *Food Science and Technology*. 2016;69:251-257.
- [28] Müller CMO, Yamashita F, Laurindo JB. Evaluation of the effects of glycerol and sorbitol concentration and water activity on the water barrier properties of cassava starch films through a solubility approach. *Carbohydrate Polymers*. 2008;72(1):82-87. doi.org/10.1016/j.carbpol.2007.07.026
- [29] Beck CS, Roman M, Gray DG. Effect of reaction conditions on the properties and behavior of wood cellulose nanocrystal suspensions. *Biomacromolecules*. 2005;6(2):1048-1054. doi.org/10.1021/bm049300p
- [30] The DP, Debeaufort F, Voilley A, Luu D. Food Hydrocolloids. 2009;23:691-699.
- [31] Pranoto Y, Salokhe VM, Rakshit SK. Physical and antibacterial properties of alginate-based edible film incorporated with garlic oil. *Food Research International*. 2005;38(3):267-272. doi.org/10.1016/j.foodres.2004.04.009
- [32] Silva JBA, Nascimento T, Costac LAS, Pereirad S, Machado BA, Gomes G, *et al.* Effect of source and interaction with nanocellulose cassava starch, glycerol and the properties of films bionanocomposites. *Materials Today: Proceedings*. 2015;2(1):200-207. doi.org/10.1016/j.matpr.2015.04.022
- [33] Yang L, Paulson AT. Mechanical and water vapour barrier properties of edible gellan films. *Food Research International*. 2000;33(7):563-570. doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00092-2