

# FILME BIOPOLIMÉRICO FLEXÍVEL COM NANOCOMPÓSITOS DE ÓXIDO DE CARBONO AMORFO HIDRATADO: PROPRIEDADE ÓPTICA E PERMEABILIDADE AO VAPOR DE ÁGUA

## FLEXIBLE BIOPOLYMER FILM WITH HYDRATED AMORPHOUS CARBON OXIDE NANOCOMPOSITES: OPTICAL PROPERTIES AND WATER VAPOR PERMEABILITY

DOI: 10.65747/conali2025v2c17

Kelvi Wilson Evaristo Miranda<sup>1</sup>; Gilleno Ferreira de Oliveira<sup>2</sup>; Francislei Santa Anna Santos<sup>3</sup>; Maria do Socorro Rocha Bastos<sup>4</sup>; Lucicléia Barros de Vasconcelos<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos – PPGCTA – UFC; E-mail: [kelvivilmiranda@gmail.com](mailto:kelvivilmiranda@gmail.com)

<sup>2</sup>Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos pelo PPGCTA – UFC; E-mail: [gillenooliveira@gmail.com](mailto:gillenooliveira@gmail.com)

<sup>3</sup>Docente do Departamento de Processos Industriais e Engenharia Química – IFBA, campus Salvador; E-mail: [francisleisantos@ifba.edu.br](mailto:francisleisantos@ifba.edu.br)

<sup>4</sup>Pesquisadora do Laboratório de Tecnologia de Embalagem – LTE – EMBRAPA Agroindústria Tropical; E-mail: [socorro.bastos@embrapa.br](mailto:socorro.bastos@embrapa.br)

<sup>5</sup>Docente do Departamento de Engenharia de Alimentos – DEAL – UFC; E-mail: [lucicleia\\_barros@ufc.br](mailto:lucicleia_barros@ufc.br)

**Resumo:** A produção e aplicação de materiais biopoliméricos tem mostrado um potencial expansivo nos setores industriais, como as embalagens devido sua viabilidade de obtenção, uso de tecnologias limpas e baixo custo. A presente pesquisa objetivou desenvolver um filme biopoliméricos flexível com matriz de amido de mandioca (*Manihot esculenta*) e nanocompósito de óxido de carbono amorfo hidratado verde em suspensão (HSACO), explorando o seu potencial para aplicação em embalagem de alimentos. Filme de amido à 6% (m/v) à 80 °C/15 min formado pelo método casting descontínuo, acrescido de diferentes concentrações de HSACO obtida por ultrassonicação à 120 W de potência nominal por 120 min (ciclo contínuo). Os filmes foram caracterizados quanto à propriedade óptica (transparência, opacidade, barreira à radiação UV e diferença total de cor) e permeabilidade ao vapor de água (WVP) conforme ASTM E96-95/ E96M-05 (método úmido). A incorporação de HSACO à matriz amilácea se mostrou positiva e satisfatórios para barreira à radiação UV, na região UV-A (315-400 nm) e UV-B (280-315 nm), com baixas transmissões ópticas e bom nível de transparência do material. Em termos de WVP, promoveu uma redução de 1,41 para 0,92 g.mm/m<sup>2</sup>.kPa.h, uma redução de 35%. Assim, as embalagens propostas são capazes de atender à diferentes especificidades, tendo em vista sua versatilidade e perfil sustentável. No entanto, estudos mais aprofundados e voltados ao perfil sustentável, como biodegradação, em diferentes ambientes e situações de contato direto/indireto com o alimento são prerrogativas para futura aplicabilidade comercial do material.

**Palavras-chave:** ecologicamente amigável; embalagem; nanotecnologia; sustentabilidade

**Abstract:** The production and application of biopolymeric materials has shown expanding potential in industrial sectors such as packaging due to the feasibility of clean technology and low cost. This study aimed to develop a flexible biopolymeric film containing a cassava starch (*Manihot esculenta*) matrix and green hydrate-suspended amorphous carbon oxide (HSACO) nanocomposites, and to explore its potential application in food packaging. A 6% (m/v) starch film was formed by the discontinuous casting method at 80 °C for 15 min, with the addition of HSACO at different concentrations obtained by ultrasonication at 120 W nominal power for 120 min (continuous cycle). The films were characterized in terms of their optical properties (transparency, opacity, UV barrier and total colour difference) and water vapour permeability (WVP) according to ASTM E96-95/E96M-05 (wet method). Incorporating HSACO into the starch matrix was found to provide an effective barrier against UV radiation in the UV-A (315–400 nm) and UV-B (280–315 nm) regions, offering low optical transmission while maintaining a high level of transparency. Regarding WVP, HSACO incorporation reduced it from 1.41 to 0.92 g.mm/m<sup>2</sup>.kPa.h (a 35% reduction). Thus, the proposed packaging is capable of meeting different specific needs, given its versatility and sustainable profile. However, more in-depth studies focusing on aspects such as biodegradation in different environments and situations involving direct or indirect contact with food are necessary for the material to be commercially applicable in the future.

**Keywords:** ecofriendly; packaging; nanotechnology; sustainability

## INTRODUÇÃO

As embalagens de alimentos exercem papel fundamental, seja de forma intrínseca como extrínseca, na preservação da qualidade e segurança dos produtos, influenciando diretamente o tempo de prateleira e auxiliando na manutenção das características sensoriais e nutricionais, especialmente em alimentos frescos, refrigerados e/ou congelados, durante as etapas de produção, armazenamento e distribuição (1,2,3).

Apesar de sua importância, a gestão pós-consumo das embalagens ainda se mostra ineficaz, gerando desequilíbrios entre produção e reaproveitamento, resultando no acúmulo de resíduos sólidos com graves impactos ambientais (4). Os polímeros não biodegradáveis são apontados como um dos principais responsáveis por esse impacto, uma vez que se acumulam em aterros e lixões em grande escala (5,6). Tais resíduos afetam diretamente os ecossistemas e produzem consequências de ordem ambiental, social, econômica e cultural.

De acordo com a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (7), estima-se que cada habitante produza, em média, 382 kg de resíduos sólidos por ano, o equivalente a mais de 1 kg por dia, sendo que cerca de 5% desse volume corresponde a materiais de embalagens. Esse cenário é intensificado pelo padrão de consumo da sociedade contemporânea, caracterizado pela busca por alimentos práticos, seguros (*safe*) e de rápido preparo, como os produtos de *fast food*.

Nesse contexto, observa-se o crescente interesse em soluções inovadoras para o setor de embalagens, que conciliem qualidade, segurança e sustentabilidade (4). A busca por novos materiais ecologicamente amigáveis (*ecofriendly*) vem indicando um futuro promissor junto ao setor industrial, o qual vem se tornando um grande aliado e agente motivador para o fortalecimento dessas ações, utilizando de argumentos da chamada “ecologia industrial sustentável” (8,9). A literatura aponta que os biopolímeros têm emergido como alternativas promissoras aos materiais convencionais, sendo enquadrados no conceito de sustentabilidade por atender às necessidades da sociedade atual sem comprometer as gerações futuras (10,11).

Os biopolímeros podem ser obtidos de diferentes fontes: (i) biomassa (matrizes poliméricas de recursos agrícolas: “agro polímeros” de “agro recursos”): amidos (12), produtos lignocelulósicos (13), pectinas, gomas, quitina/quitosana (14), celulose bacteriana (15); (ii) proteínas e lipídios de origem animal (caseína, soro de leite, colágeno/gelatina) e origem vegetal (zeína, soja, glúten). No entanto, quando comparadas às embalagens petroquímicas, as baseadas em biopolímeros ainda apresentam limitações em propriedades mecânicas, físicas e físico-químicas (16).

Mesmo assim, a produção e aplicação de polímeros biodegradáveis e bioplásticos têm crescido de forma significativa nos setores industriais, impulsionadas pela facilidade de obtenção, adoção de tecnologias limpas e viabilidade econômica (8,9). Tais fatores reforçam a importância do desenvolvimento de materiais alternativos que possam substituir, de maneira sustentável, os polímeros convencionais.

Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um filme flexível a partir de matriz biopolimérica de amido de mandioca (*Manihot esculenta*) com compósito de óxido de carbono amorfo hidratado em suspensão (HSACO). Esta abordagem busca alinhar inovação tecnológica às diretrizes de sustentabilidade, explorando o potencial de aplicação desses materiais em embalagens de alimentos.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Materiais**

NHKBIO® foi gentilmente fornecido pela AdpCLEAN Ltda. (Bahia, Brasil). Este material é sintetizado utilizando a rota fotoeletroquímica "U", baseada no processo NHK (Nano-Hope-Key), detalhamento do processo é objeto de patente (BR102024023159-7), o qual está detido pela AdpCLEAN Ltda. Amido de mandioca (*Manihot esculenta*) comercial obtida na cidade de Fortaleza, Ceará (Brasil). Álcool etílico absoluto P.A. 99,8% de pureza ( $M_w = 46,07$  g/mol, densidade 0,7890-0,7915 g/cm<sup>3</sup> e CAS 64-17-5) adquirido na Êxodo Científica (Brasil). Glicerol P.A. (densidade 1,26 g/cm<sup>3</sup>,  $M_w = 92,10$  g/mol e CAS 56-81-5) da Dinâmica (Brasil).

### **Métodos**

#### ***Produção da suspensão do óxido de carbono amorfo hidratado (HSACO)***

As condições detalhadas para obtenção da HSACO foram obtidas em estudos anteriores (dados não divulgados). 18,16 µL de NHKBIO® foram colocados em 50 mL de água ultrapura (Milli-Q®), correspondendo à uma concentração final de 0,4 mg/mL

de HSACO. Em seguida, foi submetida à cavitação ultrassônica de baixa frequência, 24 kHz, em ultrassom de ponta (modelo UP400-S, Hielscher, Germany) com sonda de 22 mm de diâmetro e 400 W de potência. O processo de cavitação ocorreu com 30%W (amplitude) por 120 min. Devido a ocorrência de alto aquecimento, foi acoplado ao sistema, um banho termostático com circulação (modelo F-25, Julabo, Germany) à 15 °C, a fim de manter a temperatura interna durante o processo de cavitação do HSACO em  $24 \pm 2$  °C. Por fim, 1,0% (v/v) de álcool etílico P.A. foi adicionado à suspensão para reduzir a incidência de aglomerações da HSACO, conforme esquematizado na Figura 1.

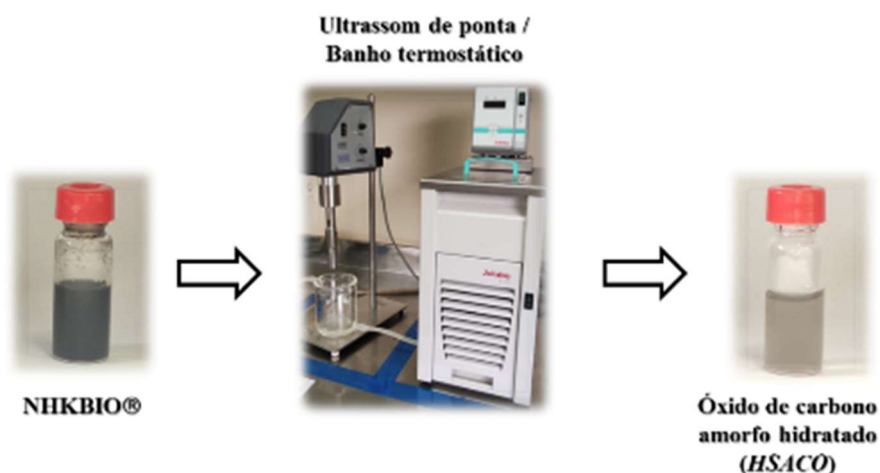


Figura 17 – Esquematização do sistema de cavitação ultrassônica acoplado com banho termostático, na formação da suspensão de óxido de carbono amorfo hidratado (HSACO).  
Fonte: Autores, 2025

### Preparação dos filmes flexíveis

Os filmes flexíveis de amido de mandioca, foram obtidos através de solução filmogênica à 6,0% (m/v), aquecida à 80 °C por 15 min, sob agitação constante. As soluções foram resfriadas, aproximadamente 40 °C. Em seguida, foram incorporados o agente plastificante, glicerol, 0,25 g/g de matéria seca e HSACO em diferentes concentrações (0,5 e 1,0%, v/v), logo misturadas em ultraturrax (modelo T-25, IKA®, WerkeGmbH & Co. KG, Staufen, Germany) à 11.000 rpm por 6 min. Todas as soluções poliméricas foram preparadas com água destilada. A Tabela 1 apresenta as variações de incorporação da HSACO.

Tabela 11 – Descrição experimental da incorporação de HSACO no preparo das soluções filmogênicas de amido para formação dos filmes flexíveis.

Codificação	Matriz polimérica (% m/v)	HSACO (% v/v)
A-ctl*	6,0	-
A-H-0,5	6,0	0,5
A-H-1,0	6,0	1,0

(\*) tratamento controle, sem incorporação de HSACO.

Os filmes foram formados através do método casting descontínuo com espessura úmida de 1,0 mm. Em seguida, os filmes foram deixados *overnight* sob condições ambientes de temperatura e umidade relativa ( $25 \pm 2$  °C e  $65 \pm 5\%$ , respectivamente).

### **Caracterização dos filmes flexíveis**

A espessuras dos filmes foram determinadas com micrômetro digital, com resolução 0,001mm (modelo Digimatic Micrometer, Mitutoyo). Foram realizadas dez leituras de forma aleatória sobre a área do filme, em quintuplicata.

As propriedades óptica dos filmes flexíveis foram estudados conforme proposto por Haghghi et al. (8), Gusman-Puyol et al. (17) e Lyu et al. (18), para transparência, opacidade e barreira à radiação UV. As análises foram realizadas em espectrofotômetro UV-vis (model Varian Cary 50 UV-vis, Agilent Technologies, CA, USA). Os filmes foram dimensionados com 1 cm x 5 cm, em seguida colocados de forma perpendicular em cubetas de vidro para serem incididos pelo feixe de luz.

A transparência foi determinada com base na transmitância a 600 nm (Eq. 1) (17) e a opacidade de acordo com a absorbância a 500 nm (Eq. 3) (19).

$$Transparency = \frac{-(\log \%T_{600})}{b} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde  $\%T_{600}$  representa a transmitância percentual em um comprimento de onda de 600 nm e b, a espessura do filme em milímetros (mm).

$$Abs_{500} = -\log \frac{1}{T} \quad (\text{Equação 2})$$

$$Opacidade = Abs_{500} \times b \quad (\text{Equação 3})$$

Onde T é o valor de transmitância a 500 nm, Abs500 é a absorbância obtida a 500 nm e b é a espessura do filme (mm).

A propriedade de barreira à radiação UV buscou analisar as radiações nas regiões de 200 a 400 nm, sendo  $S_{UVC}$ ,  $S_{UVB}$  e  $S_{UVA}$  integrais de transmitância das regiões UV-C (200-280 nm), UV-B (280-320 nm) e UV-A (320-400 nm), respectivamente. Os resultados obtidos foram analisados nas equações Eq. 4-6 (18):

$$S_{UVA} = 1 - T_{UV-A} = 1 - \frac{\sum_{320}^{400} T_{\lambda} \times \Delta\lambda}{\sum_{320}^{400} \Delta\lambda} \times 100\% \quad (\text{Equação 4})$$

$$S_{UVB} = 1 - T_{UV-B} = 1 - \frac{\sum_{280}^{320} T_{\lambda} \times \Delta\lambda}{\sum_{280}^{320} \Delta\lambda} \times 100\% \quad (\text{Equação 5})$$

$$S_{UVC} = 1 - T_{UV-C} = 1 - \frac{\sum_{200}^{280} T_{\lambda} \times \Delta\lambda}{\sum_{200}^{280} \Delta\lambda} \times 100\% \quad (\text{Equação 6})$$

Onde,  $T_{UV-A}$ ,  $T_{UV-B}$  e  $T_{UV-C}$  são a transmitância média (%) em regiões UV específicas,  $\lambda$  e  $\Delta\lambda$ , comprimento de onda e dispersão de comprimento de onda, respectivamente, e  $T_{\lambda}$  é a transmitância espectral.

A análise da cor dos filmes foi realizada de acordo com Zhang & Han (20) no sistema CIE-L\*a\*b\*, utilizando um colorímetro digital modelo CR-400 (Konica MINOLTA, Osaka, Japão). O colorímetro foi calibrado usando um padrão branco ( $L^* = 95,61$ ,  $a^* = -0,16$  e  $b^* = 2,38$ ). Em seguida, os filmes foram analisados para determinação da diferença total de cor ( $\Delta E$ ) de grau absoluto. Todos os valores foram adquiridos em triplicata, de acordo com a Eq. 7:

$$\Delta E = ((L^* - L_i^*)^2 + (a^* - a_i^*)^2 + (b^* - b_i^*)^2)^{0.5} \quad (\text{Equação 7})$$

Sendo,  $L^*$  o parâmetro que indica brilho,  $a^*$  representa a coordenada cromática em verde ( $-a^*$ ) a vermelho ( $+a^*$ ) e  $b^*$  é a coordenada cromática em azul ( $-b^*$ ) a amarelo ( $+b^*$ ).  $L_i^*$ ,  $a_i^*$ ,  $b_i^*$ , os valores obtidos pelo colorímetro das amostras analisadas.

A propriedade de barreira ao vapor de água (WVP) foi analisada de acordo com a ASTM E96/E96M-16 (21). O método propõe o estudo da permeabilidade ao vapor de água (WVP) (Eq. 8) e taxa de transmissão de vapor de água (WVTR) (22). As análises foram realizadas à temperatura controlada de  $25 \pm 1$  °C em quintuplicata. As células de permeação (área analítica:  $\varnothing$  24 mm e 10 mm altura) foram preparadas com 2,0 mL de água destilada (correspondendo à condição com 100% RH). Segundo a ASTM, foi utilizado o método dissecante, onde no Dry-Box dissecador vertical (Nalgon, SP, BRA), foi utilizada sílica gel para controle da umidade (30% RH). As amostras foram deixadas por 1 h no dissecador, para fins de equilíbrio de sorção e difusão do permeante, segundo a 1ª lei de Fick e Lei de Henry. Foram realizadas leituras durante o período de 24 h, totalizando oito leituras.

$$WVP = \frac{g \times e}{A \times t \times \Delta P} \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo WVP ( $g \cdot mm/m^2 \cdot h \cdot kPa$ ) a permeabilidade do material ao vapor de água; g, o ganho de massa (g); e, a espessura média (mm); A, a área de permeação ( $m^2$ ); t, o tempo total (h);  $\Delta P$ , a diferença de pressão de vapor ambiente (kPa, 25 °C); e g/t calculado pela regressão linear do ganho de peso em relação à curva de tempo (regime

permanente). O WVTR ( $\text{g/m}^2\cdot\text{h}$ ) corresponde à relação  $\frac{g}{A \times t}$ . Foram realizadas cinco repetições para cada amostra.

### Análise estatística

O estudo estatístico da pesquisa foi realizado através do software Statistica v.12 (StatSoft, Inc., US, 2011), aplicando a ANOVA unidirecional para fins de determinação de análises post-hoc de diferenças significativas entre os tratamentos honesto de Tukey. Além disso, o teste de análise de variância unidirecional (HSD), para fins de comparativos dos grupos e nível de significância estabelecido de 5% ( $p < 0,05$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O estudo das regiões do UV para as embalagens de alimentos é considerada importante, devido à capacidade de induzir a formação de radicais livres, impactando na qualidade do alimento embalado (23). A Tabela 2 mostra o comportamento dos filmes flexíveis quanto à propriedade óptica do material. A incorporação de HSACO nos filmes, promoveu um aumento na barreira à radiação UV, principalmente nas regiões UV-A e UV-B, com a concentração de 1,0% (v/v) de HSACO. A transmitância óptica (OT) apresentou comportamento inverso de forma significativa em relação ao tratamento controle (A-ctl) ( $P < 0,05$ ).

Tabela 12 – Transmissão óptica (OT, %) e barreira à radiação UV (%) dos filmes flexíveis de amido com HSACO.

Amostras	Transmitância (%)			Barreira UV (%)		
	UV-C*	UV-B**	UV-A***	UV-C	UV-B	UV-A
A-ctl	0,02 ± 0,00 <sup>a</sup>	8,1 ± 0,5 <sup>a</sup>	67,6 ± 4,3 <sup>a</sup>	99,98 ± 0,01 <sup>a</sup>	91,9 ± 0,5 <sup>b</sup>	32,3 ± 4,3 <sup>b</sup>
A-H-0,5	0,02 ± 0,00 <sup>a</sup>	7,2 ± 1,4 <sup>ab</sup>	60,8 ± 10,8 <sup>ab</sup>	99,98 ± 0,01 <sup>a</sup>	92,8 ± 1,4 <sup>ab</sup>	39,2 ± 10,8 <sup>ab</sup>
A-H-1,0	0,02 ± 0,00 <sup>a</sup>	5,1 ± 0,9 <sup>b</sup>	44,9 ± 7,3 <sup>b</sup>	99,98 ± 0,01 <sup>a</sup>	94,9 ± 0,9 <sup>a</sup>	55,0 ± 7,3 <sup>a</sup>

(\*) Região UV-C: 200 – 280 nm; (\*\*) Região UV-B: 280 – 315 nm; (\*\*\*) Região UV-A: 315 – 400 nm. Valores expressos como média ± desvio padrão. Para cada propriedade analisada, médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ; teste de Tukey).

Fonte: Autores, 2025

A região entre 280 e 400 nm, que corresponde à radiação UV-B (280-315 nm) e UV-A (315-400 nm) foram as mais afetadas com a incorporação do HSACO de forma significativa ( $P < 0,05$ ). Em contrapartida, não houve variações na região mais energética, 200-280 nm (região UV-C) ( $P > 0,05$ ). O aumento da barreira à UV, pode estar associada a formação de uma barreira pelas partículas cavidadas do HSACO, as quais proporcionaram uma interrupção do fluxo da radiação UV (24). Com isso, os efeitos provocados pela incidência dos raios UV sobre os alimentos, principalmente os fotossensíveis, pode resultar em deterioração oxidativa, perda de nutrientes, desenvolvimento de sabores e aromas indesejados (*off-flavor*) (25,26).

A literatura mostra que a incorporação de material carbonáceo, como óxido de grafeno (GO) e óxido de grafeno reduzido (Gor), proporcionam uma redução nas propriedades ópticas e colorimétricas do material (27). Wu et al. (28) em seus estudos com GO modificado com carboximetilcelulose (CMC) em filmes de amido/quitosana, observaram uma barreira em torno de 92,7% na região UV completa, retendo aproximadamente 50% de transmitância de luz visível. Tais interações dos materiais carbonáceos com a matriz polimérica promovem compatibilidade, impactando na transparência do material, como mostra a Tabela 3.

Tabela 13 – Transparência e opacidade dos filmes flexíveis de amido com diferentes concentrações de HSACO.

Amostras	Espessura (mm)	Transparência (%T/mm)	Opacidade (Abs.mm)
A-ctl	0,037 ± 0,002 <sup>a</sup>	82,3 ± 4,0 <sup>a</sup>	0,10 ± 0,02 <sup>b</sup>
A-H-0,5	0,032 ± 0,003 <sup>b</sup>	75,4 ± 10,1 <sup>ab</sup>	0,14 ± 0,06 <sup>ab</sup>
A-H-1,0	0,030 ± 0,002 <sup>b</sup>	59,6 ± 7,2 <sup>b</sup>	0,25 ± 0,06 <sup>a</sup>

Valores expressos como média ± desvio padrão. Para cada propriedade analisada, médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ; teste de Tukey).

Fonte: Autores, 2025

A Tabela 3 mostra que a incorporação de HSACO afetou sutilmente a espessura dos filmes de forma significativa ( $P < 0,05$ ). Tal comportamento pode estar associado à possível distribuição homogênea dos compósitos carbonáceos por toda a área do filme. Assim como, a morfologia das partículas de carbono (29). Com isso, criando um caminho de difusão dos raios luminosos mais complexo, promovendo uma maior resistência à transferência de massa através dos filmes (29,30). Tal comportamento corrobora com o observado na Tabela 2. Os valores de transparência e opacidade observados (Tabela 3) demonstram o potencial do material quanto à manutenção da visibilidade do interior da embalagem, quando avaliamos sua aplicação em alimentos.

Parâmetros colorimétricos podem influenciar no comportamento e aplicabilidade do material de embalagem. A Tabela 4 mostra que a luminosidade dos filmes não diferiu significativamente ( $P > 0,05$ ). Em contrapartida, as demais coordenadas ( $a^*$  e  $b^*$ ) apresentaram variações ( $P < 0,05$ ).

Tabela 14 – Parâmetros de coloração dos filmes flexíveis de amido com diferentes concentrações de HSACO para as coordenadas colorimétricas de luminosidade ( $L^*$ ), vermelho/verde ( $a^*$ ) e amarelo/azul ( $b^*$ ) e diferença total de cor ( $\Delta E$ ).

Amostras	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
A-ctl	95,11 ± 0,16 <sup>a</sup>	-0,11 ± 0,01 <sup>b</sup>	2,49 ± 0,05 <sup>b</sup>	0,41 <sup>b</sup>
A-H-0,5	95,84 ± 0,78 <sup>a</sup>	-0,16 ± 0,01 <sup>a</sup>	2,45 ± 0,16 <sup>b</sup>	0,44 <sup>b</sup>
A-H-1,0	94,83 ± 0,11 <sup>a</sup>	-0,12 ± 0,02 <sup>ab</sup>	3,13 ± 0,04 <sup>a</sup>	1,39 <sup>a</sup>

Valores expressos como média ± desvio padrão. Para cada propriedade analisada, médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ; teste de Tukey).

Fonte: Autores, 2025

A Tabela 4 apresenta que a incorporação de HSACO promoveu uma variação colorimétrica nos filmes, com aumento de 239 % no  $\Delta E$  ( $P < 0,05$ ). A variação observada está associada à coordenada  $b^*$ . Segundo a literatura, esse comportamento está relacionado à interação matriz:compósito, a qual afeta a transmitância dos filmes em vários comprimentos de ondas (31). Os valores observados para  $\Delta E < 3,0$  indicam que não é possível observar diferença cromáticas qualitativa dos filmes de forma visível ao olho humano (treinado ou não treinado). Sendo possível, apenas, através de equipamentos sensíveis (32,33,34).

As espessuras dos filmes flexíveis apresentaram variações significativas ( $P < 0,05$ ) como discutido anteriormente na Tabela 3. Tal comportamento influencia diretamente à propriedade de permeabilidade ao vapor de água (WVP), como mostra a Tabela 5, na qual é possível observar que o tratamento controle (A-ctl) se mostrou mais permeável aos vapores úmidos do que os tratamentos com HSACO, confirmando a natureza hidrofílica da matriz amilácea.

Tabela 15 – Perfil de permeabilidade ao vapor de água (WVP), com as taxas de permeabilidade ao vapor de água (TWVP) e permeação dos filmes flexíveis de amido com diferentes concentrações de HSACO sob condições controladas (25 °C e 65% UR).

Amostras	TWVP (g/m <sup>2</sup> .h)	Permeação (g/m <sup>2</sup> .kPa.h)	WVP (g.mm/m <sup>2</sup> .kPa.h)
A-ctl	91,9 ± 6,3 <sup>b</sup>	37,8 ± 3,4 <sup>a</sup>	1,41 ± 0,17 <sup>a</sup>
A-H-0,5	100,4 ± 1,6 <sup>ab</sup>	29,1 ± 0,6 <sup>b</sup>	0,92 ± 0,09 <sup>b</sup>
A-H-1,0	107,2 ± 4,8 <sup>a</sup>	31,7 ± 1,8 <sup>b</sup>	0,93 ± 0,03 <sup>b</sup>

Valores expressos como média ± desvio padrão. Para cada propriedade analisada, médias seguidas pela mesma letra minúscula na mesma coluna não diferem estatisticamente entre si ( $p < 0,05$ ; teste de Tukey).

Fonte: Autores, 2025

A incorporação de HSACO à matriz poliméricas promoveu uma redução expressiva e significativa ( $P < 0,05$ ) da permeabilidade, com valores  $\leq 0,93$  g.mm/m<sup>2</sup>.kPa.h. Esse comportamento pode estar associado a interação do material carbonáceo com a matriz polimérica, criando caminhos difusivos complexos, um fenômeno de tortuosidade para as moléculas de água, reduzindo o volume livre, tornando o filme mais denso, limitando a rápida permeação do vapor de água entre o filme (35,28,36), como mostra a Tabela 5. Segundo a literatura, a morfologia das partículas de carbono e sua distribuição na matriz, a qual impacta no aumentando da eficiência da barreira e resistência à transferência de massa dos filmes (29,30). No entanto, a ausência de diferença significativa ( $P > 0,05$ ) entre os filmes com HSACO, sugere uma possível tendência de aglomeração ou saturação do material compósito em valores superiores à 0,5%. Logo, reduzindo sua eficácia no bloqueio da difusão. Tal comportamento está associado ao aumento da taxa de permeabilidade ao vapor de água (TWVP). Comportamentos similares foram observados na literatura, onde pequenas quantidades de material carbonáceos (óxido de grafeno - GO) promoveram redução na WVP, sem ganhos adicionais para valores superiores (37).

## CONCLUSÕES

A utilização de agentes compósitos de origem carbonácea na forma de suspensão como o óxido de carbono amorfo hidratado (HSACO) demonstrou eficiência nas propriedades de ópticas e de barreira à radiação UV e vapor de água (WVP). Os filmes com 0,5% (v/v) de HSACO se mostraram positivos e satisfatórios para barreira à radiação UV, na região UV-A (315-400 nm) e UV-B (280-315 nm), com baixas transmissões ópticas e bom nível de transparência do material. Em termos de barreira à umidade, foi eficiente, promovendo uma redução de aproximadamente 35% da permeabilidade. Assim, as embalagens propostas são capazes de atender à diferentes especificidades. Tendo em vista sua versatilidade e perfil sustentável. No entanto, são necessários estudos mais aprofundados com perfil cristalográfico (difração de raios X), estrutural (Espectroscopia no infravermelho com Transformada de Fourier) e morfológica (Microscopia Eletrônica de Transmissão). Além de estudos voltados ao perfil sustentável, como biodegradação, em diferentes ambientes e situações de contato direto/indireto com o alimento são prerrogativas para futura aplicabilidade comercial do material.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido pelo projeto CNPq/MCTI/FNDCT Universal (n. 404638/2021-0). A AdpCLEAN Ltda pela doação do NHKBIO® e a EMBRAPA Agroindústria Tropical pela utilização de suas instalações para realização das análises.

## REFERÊNCIAS

- (1) BUSS, D. A.; HENKES, J. A. Estudo dos impactos ambientais causados por laticínios com foco no reaproveitamento dos resíduos gerados. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 3, n. 2, p. 384–395, 11 nov. 2014.
- (2) LEACH, M. et al. Food politics and development. **World Development**, v. 134, p. 105024, 1 out. 2020.
- (3) NICOLETTI, M.; SERRONE, P. D. **Intelligent and Smart Packaging**. (s.l.) IntechOpen, 2017.
- (4) MOURAD, A. L.; TAVARES, M. P. DE F. A responsabilidade compartilhada das embalagens pós-consumo. **Boletim de Tecnologia e Desenvolvimento de Embalagens**, v. 32, n. 1, p. 1–4, mar. 2020.
- (5) MATAVOS-ARAMYAN, S. Addressing the microplastic crisis: A multifaceted approach to removal and regulation. **Environmental Advances**, v. 17, p. 100579, 1 out. 2024.

- (6) NCUBE, L. K. et al. Environmental Impact of Food Packaging Materials: A Review of Contemporary Development from Conventional Plastics to Polylactic Acid Based Materials. **Materials**, v. 13, n. 21, p. 4994, 6 nov. 2020.
- (7) ABREMA. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. ABREMA, São Paulo, , dez. 2024. Disponível em: <<https://www.abrema.org.br/panorama/>>. Acesso em: 24 jun. 2025
- (8) HAGHIGHI, H. et al. Comparative analysis of blend and bilayer films based on chitosan and gelatin enriched with LAE (lauroyl arginate ethyl) with antimicrobial activity for food packaging applications. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 19, p. 31–39, 1 mar. 2019.
- (9) ZORE, Ž.; ČUČEK, L.; KRAVANJA, Z. Synthesis of sustainable production systems using an upgraded concept of sustainability profit and circularity. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 1138–1154, 10 nov. 2018.
- (10) ABIPLAST. **Perfil 2019**. , 2019. Disponível em: <[http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2020/09/Perfil\\_2019\\_web\\_abiplast.pdf](http://www.abiplast.org.br/wp-content/uploads/2020/09/Perfil_2019_web_abiplast.pdf)>. Acesso em: 6 nov. 2020
- (11) THOMAS, J. A Methodological Outlook on Bioplastics from Renewable Resources. **Open Journal of Polymer Chemistry**, v. 10, n. 2, p. 21–47, 30 maio 2020.
- (12) SANCHES, M. A. R. et al. Development, characterization and optimization of biopolymers films based on starch and flour from jabuticaba (*Myrciaria cauliflora*) peel. **Food Chemistry**, p. 128430, 20 out. 2020.
- (13) DA SILVA, A. O. et al. Development and characterization of biopolymer films based on bocaiuva (*Acromonia aculeata*) flour. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 155, p. 1157–1168, 15 jul. 2020.
- (14) WANG, Z. et al. Multi-Functional Edible Film with Excellent UV Barrier Performance and Accurate Instant Ion Printing Capability. **Advanced Sustainable Systems**, v. n/a, n. n/a, p. 2000043, 27 jun. 2020.
- (15) CAZÓN, P.; VÁZQUEZ, M. Bacterial cellulose as a biodegradable food packaging material: A review. **Food Hydrocolloids**, v. 113, p. 106530, 1 abr. 2021.
- (16) NIZAMUDDIN, S. et al. Bio-based plastics, biodegradable plastics, and compostable plastics: biodegradation mechanism, biodegradability standards and environmental stratagem. **International Biodeterioration & Biodegradation**, v. 195, p. 105887, 1 nov. 2024.
- (17) GUZMAN-PUYOL, S.; BENÍTEZ, J. J.; HEREDIA-GUERRERO, J. A. Transparency of polymeric food packaging materials. **Food Research International**, v. 161, p. 111792, 1 nov. 2022.

- (18) LYU, Y.; GU, X.; MAO, Y. Green Composite of Instant Coffee and Poly(vinyl alcohol): An Excellent Transparent UV-Shielding Material with Superior Thermal-Oxidative Stability. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 59, n. 18, p. 8640–8648, 6 maio 2020.
- (19) GULATI, M.; P.S, K. M.; REDDY, J. P. Effect of Onion Peel Extract on Structural, Mechanical, Thermal, and Antioxidant Properties of Methylcellulose Films. **Food and Bioprocess Technology**, v. 16, n. 10, p. 2328–2342, 1 out. 2023.
- (20) ZHANG, Y.; HAN, J. H. Plasticization of Pea Starch Films with Monosaccharides and Polyols. **Journal of Food Science**, v. 71, n. 6, p. E253–E261, 2006.
- (21) ASTM, A. E96/E96M-16. Standard test methods for water vapor transmission of materials. **Annual Book of American Standard Testing Methods; American Society for Testing and Materials: West Conshohocken, PA, USA**, p. 719–725, 2016.
- (22) BRAGA, D. G. et al. Cellulose nanostructured films from pretreated açai mesocarp fibers: physical, barrier, and tensile performance. **CERNE**, v. 27, p. e, 25 out. 2021.
- (23) BIGI, F. et al. Characterization of chitosan-hydroxypropyl methylcellulose blend films enriched with nettle or sage leaf extract for active food packaging applications. **Food Hydrocolloids**, v. 120, p. 106979, 1 nov. 2021.
- (24) ARFAT, Y. A. et al. Polylactide/graphene oxide nanosheets/clove essential oil composite films for potential food packaging applications. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 107, p. 194–203, 1 fev. 2018.
- (25) MOHAMMADI, R. et al. Physico-mechanical and structural properties of eggshell membrane gelatin- chitosan blend edible films. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 107, p. 406–412, 1 fev. 2018.
- (26) RODRIGUES, J. R. P. et al. Resíduo agroindustrial de soro de leite como solvente ecologicamente correto na elaboração de filme hidrocoloidal biopoliméricos: estudo das propriedades ópticas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 17, p. e254111739189–e254111739189, 27 dez. 2022.
- (27) DOGAN, H. Y.; ALTIN, Y.; BEDELOĞLU, A. Ç. Fabrication and properties of graphene oxide and reduced graphene oxide reinforced Poly(Vinyl alcohol) nanocomposite films for packaging applications. **Polymers and Polymer Composites**, v. 30, p. 09673911221113328, 1 jan. 2022.
- (28) WU, L. et al. Structure and properties of starch/chitosan food packaging film containing ultra-low dosage GO with barrier and antibacterial. **Food Hydrocolloids**, v. 137, p. 108329, 1 abr. 2023.

- (29) ADILAH, A. N.; HEAN, C. G.; HANANI, Z. A. N. Incorporation of graphene oxide to enhance fish gelatin as bio-packaging material. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 28, p. 100679, 1 jun. 2021.
- (30) GOH, K. et al. Sandwich-Architected Poly(lactic acid)–Graphene Composite Food Packaging Films. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 8, n. 15, p. 9994–10004, 20 abr. 2016.
- (31) DING, W. et al. Aminated graphene oxide reinforced gelatin-chitosan composite films toward biopackaging: Preparation and properties. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 284, p. 138104, 1 jan. 2025.
- (32) MACEDO, L. L. et al. Banana liqueur made with yacon syrup: evaluation of stability during maturation. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 24, p. e2020031, 26 abr. 2021.
- (33) TASSANAWAT, S. et al. **pH-Sensitive PP/Clay Nanocomposites for Beverage Smart Packaging**. 2007 2nd IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. **Anais...** Em: 2007 2ND IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NANO/MICRO ENGINEERED AND MOLECULAR SYSTEMS. jan. 2007. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/4160365>>. Acesso em: 14 jun. 2025
- (34) WANG, W. et al. A renewable intelligent colorimetric indicator based on polyaniline for detecting freshness of tilapia. **Packaging Technology and Science**, v. 31, n. 3, p. 133–140, 2018.
- (35) LI, Y. et al. High-barrier bacterial cellulose/polyvinyl alcohol based active packaging material for food preservation. **Carbohydrate Polymers**, v. 363, p. 123603, 1 set. 2025.
- (36) ZENG, J. et al. Development of high-barrier composite films for sustainable reduction of non-biodegradable materials in food packaging application. **Carbohydrate Polymers**, v. 330, p. 121824, 15 abr. 2024.
- (37) AFSHAR, M. B.; MARJANI, A. P.; BALKANLOO, P. G. Introducing graphene quantum dots in decomposable wheat starch-gelatin based nano-biofilms. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 2069, 24 jan. 2024.