

Extração de compostos bioativos do resíduo da palmeira juçara e aplicação em embalagem biodegradável

Extraction of bioactive compounds from juçara palm residue and application in biodegradable packaging

Jaqueline Gilmar Barboza Januário¹, Jaqueline Silva Ferreira², Mônica Regina Scapim³, Grasielle Scaramal Madrona⁴

RESUMO: O processamento do fruto da palmeira Juçara *Euterpes edulis Martius* gera resíduos sólidos que são descartados pela indústria, embora ainda apresentem uma composição rica em compostos bioativos. Esse estudo teve como objetivo extrair os compostos bioativos da casca do fruto da palmeira juçara e aplicá-los na forma de microcápsulas em uma embalagem biodegradável. O extrato foi obtido por meio das técnicas de extração em banho térmico e por ultrassom, seguido de microencapsulação e liofilização. As cápsulas produzidas foram adicionadas em filmes pela técnica de *casting*. Os extratos foram avaliados quanto aos compostos fenólicos totais, flavonoides, antocianinas e atividade antioxidante (DPPH, ABTS, FRAP). Os filmes foram avaliados quanto à espessura, propriedades de barreira ao vapor de água e às suas propriedades mecânicas. Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Tukey ($p < 0,05$). O processo de encapsulação e liofilização dos extratos permitiu uma melhora nos valores de antioxidantes dos extratos. Os filmes apresentaram superfície lisa e boa maleabilidade. De modo geral, os filmes adicionados das cápsulas apresentaram uma maior flexibilidade pelo maior valor de alongação na ruptura, menor rigidez dado pelo menor valor do Módulo de Young, teve uma maior permeabilidade ao vapor de água (PVA) e não apresentou diferenças estatísticas a resistência máxima à tração, quando comparados com o filme controle (sem adição dos extratos encapsulados).

Palavras-chave: Antioxidantes; Antocianinas; Filmes; Frutos; Propriedades mecânicas.

ABSTRACT: The processing of the fruit of the Juçara palm tree *Euterpes edulis Martius* generates solid residue that is discarded by the industry, although it still has a composition rich in bioactive compounds. This study aimed to extract bioactive compounds from the skin of the juçara palm fruit and apply them in the form of microcapsules in biodegradable packaging. The extract was obtained using thermal bath and ultrasound extraction techniques, followed by microencapsulation and freeze-drying. The capsules produced were added to films using the casting technique. The extracts were evaluated for total phenolic compounds, antioxidants (DPPH, ABTS, FRAP), flavonoids, and anthocyanins. The films were evaluated for thickness, water vapor barrier properties, and mechanical properties. The results were submitted to analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test ($p < 0.05$). The encapsulation and freeze-drying process of the extracts allowed an improvement in the antioxidant values of the extracts. The films presented a smooth surface and good malleability. In general, the films added to the capsules presented greater flexibility due to the greater value of elongation at break, lower stiffness due to the lower value of Young's Modulus, had greater permeability to water vapor (PVA), and did not present statistical differences in resistance. maximum traction, when compared to the control film (without addition of encapsulated extracts).

Keywords: Antioxidants; Anthocyanins; Films; Fruits; Mechanical properties.

Autor correspondente: Jaqueline Gilmar Barboza Januário

E-mail: jaquelinegbj4@gmail.com

Recebido em: 26/11/2023

Aceito em: 01/07/2024

¹ Graduada em Engenharia de Alimentos pela Universidade Estadual de Maringá (UEM).

² Doutoranda em Ciência de Alimentos pela Universidade Estadual de Maringá (UEM).

³ Doutora em Ciência de Alimentos pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). Docente no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos na Universidade Estadual de Maringá (UEM).

⁴ Doutora em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Docente no Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos na Universidade Estadual de Maringá (UEM).

1 INTRODUÇÃO

A *Euterpes edulis Martius*, comumente conhecida como Juçara, é uma espécie arbórea endêmica da Mata Atlântica brasileira, encontrada predominantemente nos estados das regiões Sul e Sudeste do Brasil (Abdalla de Oliveira; Guimarães; Guimarães de Souza, 2017; Schulz *et al.*, 2016a). A espécie compõe a Lista Oficial de Espécies da Flora Ameaçadas de Extinção no Brasil, iniciativas do governo busca trazer orientações aos produtores rurais para que a extração do fruto seja realizada de forma sustentável. O objetivo é de consolidar o mercado da juçara e sua agroindustrialização, já que a polpa pode ser utilizada na produção de alimentos, como granola, sucos, sorvetes, cremes, vitaminas, iogurtes, molhos, licores e até em bolos (Embrapa, 2022).

A palmeira juçara produz frutos redondos que cresce em cachos e possui um pericarpo que cobre uma semente dura. Os frutos são pequenos, com diâmetro medindo cerca de 1 a 1,5 cm e a semente constituindo 85% do fruto. Durante o amadurecimento, o epicarpo evolui de verde para roxo escuro ou quase preto (Bicudo; Ribani; Beta, 2014). O fruto se destaca por suas características organolépticas, particularmente seu sabor adocicado, e é amplamente empregada na produção de açaí. O elevado consumo da polpa de seus frutos está intrinsecamente associado às suas propriedades sensoriais e ao seu considerável valor nutricional (Garcia *et al.*, 2019; Schulz *et al.*, 2016b).

Os frutos da palmeira juçara apresentam um alto valor nutricional, incluindo ácidos graxos, proteínas, fibras, minerais e vitaminas, além de compostos bioativos como flavonoides, antocianinas, e ácidos fenólicos que estão associados a atividades biológicas (Bicudo; Ribani; Beta, 2014; Borges *et al.*, 2013; Cardoso *et al.*, 2015; Ribeiro *et al.*, 2011; Schulz *et al.*, 2015a). Entretanto, o processamento dos frutos da juçara gera resíduos sólidos, que geralmente são descartados, como a casca e as sementes (Ray *et al.*, 2023), embora ainda sejam uma rica fonte de compostos bioativos. Inada e colaboradores (2015), por exemplo, investigaram o perfil fenólico da jabuticaba (polpa, casca e semente) e a casca foi o conteúdo que apresentou o maior teor de compostos fenólicos totais (2252 mg/100 g). Sendo assim, de grande relevância o estudo de obtenção e aplicações desses compostos bioativos.

Além disso, o emprego dos frutos de *Euterpe edulis* (juçara) na alimentação humana representa uma perspectiva de considerável valor econômico e ambiental, valorizando os recursos florestais remanescentes e desempenhando um papel fundamental na conservação da espécie (Embrapa, 2022). Embora tenha muitos estudos desenvolvidos com foco na obtenção de cor e compostos bioativos de frutas e resíduos, pouco se sabe sobre técnicas de extração aplicadas diretamente no resíduo proveniente do processamento da juçara, uma vez que, os estudos com juçara comumente se limitam ao estudo da polpa (Inada *et al.*, 2015). Dada a importância de valorização deste fruto, o aproveitamento da casca do fruto da juçara é interessante, pois trata-se de uma matéria-prima de baixo custo e rica em compostos bioativos com potencial tecnológico.

A utilização de extratos vegetais na fabricação de filmes e revestimentos ativos tem sido uma prática significativa. Esses extratos influenciam de forma substancial as características dos biopolímeros utilizados como base, resultando em filmes biodegradáveis que exibem notável atividade antioxidante e antimicrobiana. A incorporação desses extratos vegetais em biopolímeros também demonstra ser eficaz na extensão da vida útil de produtos alimentícios (Kola; Carvalho, 2023).

Nos últimos anos, a comunidade científica tem-se concentrado na substituição de polímeros à base de petróleo por outros mais ecológicos (Zhang *et al.*, 2020). Trabalhos apontam um potencial da utilização de resíduos de frutos para aplicações em embalagens, como por exemplo a pesquisa de Stoll e colaboradores (2017), que avaliaram a atividade antioxidante e a compatibilidade de microcápsulas de antocianinas (extraídas de resíduo de uva) formadas por goma arábica (GA) e maltodextrina (MD) para aplicação em filmes ativos, obtendo atividade antioxidante 2,44 vezes maior para as microcápsulas de GA do que as estruturas formadas por MD. Já a incorporação de microcápsulas de antocianinas e de MD em películas de amido de bagaço de cana-de-açúcar revelou um maior efeito protetor contra a formação de peróxidos no óleo de girassol, bem como uma melhor compatibilidade com a matriz polimérica do que as microcápsulas à base de GA. As películas que continham microcápsulas à base de MD revelaram uma maior resistência à tração, uma maior porcentagem de alongamento e uma menor permeabilidade à água do que as embalagens ativas com GA. A funcionalidade dos filmes biodegradáveis depende das suas propriedades bioativas e físicas (Silva-Weiss *et al.*, 2013). A adição de extrato de semente de tamarindo melhorou a propriedade de barreira UV, antioxidante e capacidade antimicrobiana do filme aplicado em alimentos cárneos (Kuchaiyaphum *et al.*, 2023). O isolamento de amido de resíduo de extração de corante de cúrcuma permitiu a bioatividade dos filmes, pela presença de compostos antioxidantes (Maniglia; Silveira; Tapia-Blácido, 2022).

Embora a pesquisa relacionada à produção e caracterização de filmes biodegradáveis tem aumentado significativamente, ainda se encontra desafios tecnológicos de aplicação em alimentos. Uma vez que os filmes formados apresentam propriedades pobres, como propriedades mecânicas, propriedades de barreira, solubilidade e resistência à água. A adição de compostos ativos aos filmes pode ser uma alternativa para melhorar as propriedades dos materiais, prolongando a vida útil dos alimentos produtos (Kola; Carvalho, 2023; Martins *et al.*, 2019). Neste contexto, surge a questão: o resíduo da casca da palmeira juçara poderia agregar compostos bioativos e melhorar as propriedades mecânicas de filmes biodegradáveis? O presente trabalho é inovador por ser o primeiro a estudar a palmeira juçara no que se tange a extração seguida de microencapsulação e aplicação em embalagens biodegradáveis.

Neste trabalho teve-se como objetivo realizar a extração de compostos bioativos do resíduo da palmeira juçara (*Euterpe edulis Mart.*) nas condições de extração convencional e por ultrassom e avaliar o teor antioxidante e propriedades mecânicas quando aplicados em embalagens biodegradáveis na forma encapsulada.

2 MATERIAL E METODOS

2.1 OBTENÇÃO DO RESÍDUO E ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DA CASCA DO FRUTO DA JUÇARA

Os frutos da juçara foram obtidos *in natura* em propriedade rural da região de Terra Boa-PR, sendo todos do mesmo lote (safra 01/2022). Os frutos foram higienizados com solução de hipoclorito de sódio sob agitação a 200 rpm por 15 minutos. Em seguida,

a fruta foi macerada manualmente para a retirada da semente e o bagaço, a amostra foi peneirada e congelada. O resíduo inicial obtido era composto de casca e semente, para as análises a semente foi descartada e a casca fracionada em embalagens plásticas (pacotes de 250 g) e armazenada (protegida da luz) a -18°C.

As cascas do fruto juçara foram avaliadas quanto ao pH, teor de sólidos solúveis, umidade e cinzas de acordo com os métodos propostos pela AOAC (2016). Assim, esta pesquisa é de natureza quantitativa e com apresentação de dados numéricos referente às análises dos produtos.

2.2 EXTRAÇÃO DOS COMPOSTOS BIOATIVOS DA CASCA DO FRUTO DA JUÇARA

A extração dos compostos bioativos da casca do fruto da juçara foi realizada por dois diferentes métodos, uma extração convencional em um banho termostático com controle de temperatura e outra pela tecnologia de banho de ultrassom (40 kHz). A água foi utilizada como solvente, em uma relação de 1:1 (resíduo: solvente) e a extração realizada a 30°C durante 30 minutos, conforme estabelecido em testes preliminares, de trabalhos anteriores do grupo de pesquisa (Paraíso *et al.*, 2021). O extrato resultante foi armazenado sob refrigeração no escuro para posteriores processos.

2.3 ENCAPSULAÇÃO E LIOFILIZAÇÃO

A encapsulação foi realizada por geleificação iônica, onde o alginato de sódio a uma concentração de 2 % p/v (2 g/100 mL) foi disperso no extrato sob agitação e aquecimento de 70°C ± 4°C para dispersão completa. Para a formação da capsula de alginato a dispersão foi gotejada utilizando o kit Caviar Box® em uma solução aquosa de cloreto de cálcio a (1 % p / v, 1 g / 100 mL). As capsulas formadas foram mantidas na solução de cloreto de cálcio por 10 min, depois disso foram peneiradas e lavadas com água deionizada para remover o excesso de cálcio e interromper o processo de complexação (Romanini *et al.*, 2021).

O extrato encapsulado foi submetido ao processo de liofilização (*Liobras, liofilizador L108, Brasil*). Os extratos foram mantidos a uma temperatura de -36°C por dois dias antes da liofilização para garantir a completa secagem do produto. Após a liofilização, os extratos secos foram armazenados em embalagens plásticas.

2.4 PREPARO DOS FILMES

A técnica Casting foi utilizada para a produção dos filmes. Como controle, primeiramente foi elaborado um filme sem adição de capsulas (F).

Para o preparo do filme, 2g de alginato, 3g de gelatina e 2g de glicerol foram previamente pesados em balança analítica, colocados em um Becker juntamente com 100g de água destilada e uma gota de Tween 80. A mistura foi levada para uma chapa aquecedora com agitação constante e aquecido até uma temperatura de 25°C por 10 min,

para garantir a total gelatinização do filme. Logo após, a solução filmogênica formada foi disposta em placas de poliestireno e colocada em estufa com circulação de ar na temperatura de 25°C para que ocorresse a secagem por evaporação durante 24 horas. Da mesma forma, foram obtidos os filmes FC, com adição de 1% do extrato obtido pelo método convencional em banho para e FU com 1% do extrato obtido pelo método de extração em ultrassom.

2.5 ANÁLISE DE COMPOTOS BIOATIVOS E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE

A análise de compostos bioativos foi determinada: Compostos Fenólicos Totais (TFC) foi realizada segundo metodologia descrita por (Singleton; Rossi, 1965). Para análise de flavonoides e antocianinas foi utilizada a metodologia descrita por (Lees; Francis, 1971). O conteúdo total de flavonoides foi expresso em mg equivalente de quercitina.100 g⁻¹ do produto e o teor total de antocianinas foi expresso em mg equivalente de cianidina-3-glucosídeo.100 g⁻¹ de produto. Para a atividade antioxidante, a reação de degradação do DPPH (2,2-Diphenyl-1-Picrylhydrazyl) foi analisada de acordo com (Thaipong *et al*, 2006).

Para a análise pelo Método do ABTS (2,2 AZINO BIS (3-ethylbenzothiazoline6sulfonicacid diammonium salt) foi empregada metodologia de (Rufino *et al*, 2007). O ensaio FRAP foi realizado segundo metodologia de Benzie e Strain (1996). Os resultados de antioxidantes foram expressos em µM Equivalente Trolox/mg de extrato.

2.6 CARACTERIZAÇÃO DOS FILMES

A espessura dos filmes foi medida com um micrômetro digital Mitutoyo. Foram avaliados 18 pontos aleatórios da área de cada amostra de filme, e o resultado foi a média aritmética destas 18 medidas.

A análise de permeabilidade ao vapor de água foi conduzida de acordo com método da *American Society for Testing and Materials* (ASTM, 2000) com algumas modificações. As amostras foram fixadas em cápsulas de determinação de permeabilidade, contendo em seu interior cloreto de cálcio anidro (2% UR). As cápsulas foram condicionadas em dessecadores com umidade relativa de 53% e os ensaios conduzidos em triplicata. Foram realizadas pesagens periódicas, até que a taxa de ganho de massa fosse constante. A taxa de permeabilidade ao vapor de água foi determinada de acordo com a Equação 1.

$$TPVA = \left(\frac{m}{t}\right) \cdot \left(\frac{1}{A}\right) \quad (1)$$

Onde m/t é o coeficiente angular da reta de ganho de massa (g) versus tempo (h), e A (m²) área de permeação do filme. Assim o valor da permeabilidade ao vapor de água pode ser calculado de acordo com Equação 2.

$$PVA = \frac{TPVA \cdot e}{ps(UR_{ext} - UR_{int})} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

PVA é a permeabilidade ao vapor de água ($\text{g.m/m}^2.\text{Pa.h.}$);

TPVA (taxa de permeação ao vapor de água) ($\text{g/m}^2.\text{h}$);

e a espessura média do filme (média de 6 medidas) (m);

ps é a pressão de saturação de vapor à temperatura do ensaio (Pa);

URext a umidade relativa no exterior da cápsula (%) e

URint a umidade relativa no interior da cápsula (%)

Para a avaliação da cor dos filmes, foi utilizado um colorímetro portátil (Minolta® CR400 Konica Minolta Sensing, Inc., Japão) com a utilização do sistema CIELAB. Neste modelo de cor, L^* indica a luminosidade em uma escala de 0 (preto) a 100 (branco); a^* representa uma escala de tonalidade que varia de vermelho (a^* positivo) para verde (a^* negativo) e b^* representa uma escala de amarelo (b^* positivo) a azul (b^* negativo).

As propriedades de tração foram determinadas em texturômetro Stable MicroSystem, empregando-se metodologia baseada na norma ASTM D-8082-91 (ASTM, 1996). Os corpos-de-prova foram cortados nas dimensões de 80 mm de comprimento e 20 mm de largura e ajustados às garras pneumáticas do equipamento. Os corpos-de-prova foram previamente condicionados por 3 dias a 25°C, sob umidade relativa de 53%. No mínimo 15 análises foram realizadas para cada amostra. A distância inicial entre as garras foi de 40 mm e a velocidade de tração de 120 mm/min. As propriedades de tração determinadas foram: resistência máxima à tração na ruptura (MPa), alongamento na ruptura (%) e módulo Young (MPa).

2.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

As análises foram submetidas à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Tukey a 0,05 de significância, pelo programa SISVAR.

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA CASCA DO FRUTO DA JUÇARA

Análises físico-químicas de pH e sólidos solúveis, e os teores de cinzas e umidade foram avaliados para o resíduo (casca) da juçara, e os valores foram comparados aos dados da literatura obtidos para outras partes do fruto (fruto inteiro, polpa e semente), como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Características físico-químicas do resíduo (casca), fruto inteiro, polpa e semente do fruto da juçara

	Casca de juçara	Fruto inteiro	Polpa	Semente
pH	4,91 ± 0,02	5,50 ± 0,01*	4,80 ± 0,00*	6,20 ± 0,00*
Sólidos solúveis (°Bx)	4,70 ± 0,03	11,60 ± 0,1**	-	-
Cinzas (%)	0,54 ± 0,02	2,50 ± 0,00*	3,40 ± 0,00*	1,70 ± 0,00*
Umidade (%)	78,14 ± 0,49	51,90 ± 0,30*	83,80 ± 0,50*	48,90 ± 0,20*

*Inada et al. (2015); ** Silva et al. (2014).

A caracterização físico-química da casca do fruto da juçara foi explorada neste estudo e complementa os dados da literatura que caracterizam o fruto inteiro, a polpa e a semente. Embora saiba-se que valores nas propriedades físico-químicas da fruta e resíduo podem variar significativamente devido a condições e local de cultivo, espécies frutíferas, condições climáticas, para os frutos da juçara cultivadas em diferentes regiões (Borges *et al.*, 2011).

Como esperado, foi encontrada diferenças nos valores para cada parte do fruto, quando comparados, devido a diferença de composição estrutural das diferentes partes do fruto. Os valores permitiram identificar vantagens da extração de compostos bioativos da casca, em relação ao fruto inteiro, já que a casca possui um pH ligeiramente mais baixo, em comparação à fruta inteira. O que é interessante para o seu uso no desenvolvimento de produtos bioativos, uma vez que o pH mais baixo contribui para a estabilização das antocianinas (Enaru *et al.*, 2021). O valor de umidade encontrados para a casca neste trabalho foi de 78%, enquanto (Schulz *et al.*, 2015b) encontraram valores entre 56,36 e 64,56% para o fruto inteiro em diferentes estágios de amadurecimento, provavelmente por levar em conta o conteúdo de umidade mais baixo representado pela semente. Já que esse valor de umidade pode ser ainda maior, quando se trata apenas da polpa, como indicado por (Inada *et al.*, 2015), que encontraram um valor de 83,8%. No que se refere ao teor de sólidos solúveis (°Brix), a casca apresentou valor mais baixo (4,7) em comparação ao valor encontrado por (Silva *et al.*, 2014) que estudou a composição da polpa da juçara. O teor de cinzas exibido pelo resíduo (casca) está abaixo dos relatados na literatura para o resíduo (semente), fruto inteiro e polpa do fruto.

3.2 COMPOSTOS BIOATIVOS DOS EXTRATOS DA CASCA DO FRUTO DA JUÇARA

Os extratos do resíduo da palmeira juçara obtidos pelo método convencional e por ultrassom foram avaliados quanto aos compostos bioativos em diferentes etapas do processo (extratos, extratos adicionados de alginato e extratos adicionados de alginato liofilizados), como apresentado na Tabela 2.

O método de extração (banho térmico ou ultrassom) não apresentou diferenças significativas para os valores de antioxidantes DPPH, ABTS, FRAP, CFT, flavonoides e antocianinas. Na condição estudada (30°C/ 30min), sugerindo que a extração pode ser

realizada por qualquer um dos dois métodos. De modo geral a liofilização permitiu uma concentração dos compostos bioativos, resultado em valores maiores ($p < 0,05$) para os produtos encapsulados e liofilizados.

Tabela 2. Teores de compostos bioativos e atividade antioxidante dos extratos em diferentes etapas do processo

	EC	EU	ECA	EUA	CCAL	CUAL
DPPH	7,60 ^b ± 0,16	7,48 ^b ± 0,05	5,97 ^b ± 0,08	6,15 ^b ± 0,16	27,78 ^a ± 17,5 1	40,07 ^a ± 0,05
ABTS	4,51 ^b ± 2,72	2,14 ^b ± 0,36	10,32 ^b ± 8,4 1	13,40 ^b ± 5,6 9	68,65 ^a ± 41,4 3	75,29 ^a ± 2,72
FRAP	12,95 ^c ± 0,7 5	12,93 ^c ± 4,3 5	4,74 ^c ± 1,12	2,69 ^c ± 0,06	128,90 ^a ± 8,5 2	108,84 ^b ± 6,88
CFT	0,79 ^b ± 0,14	0,99 ^b ± 0,07	0,80 ^b ± 1,12	0,85 ^b ± 0,02	6,41 ^a ± 4,01	8,18 ^a ± 0,11
Flavonoides	10,67 ^d ± 4,1 3	11,46 ^d ± 3,3 0	10,81 ^d ± 1,8 0	34,88 ^c ± 3,3 3	156,18 ^b ± 5,2 2	215,66 ^a ± 13,7 6
Antocianinas	0,19 ^a ± 0,19	0,10 ^a ± 0,07	0,07 ^a ± 0,09	0,10 ^a ± 0,00	0,16 ^a ± 0,07	0,25 ^a ± 0,07

DPPH, ABTS, FRAP: mg Trolox/g; CFT: mg EAG/ g; flavonoides: mgEQ/g; e antocianinas: mgCy-3-glu/ g. Média ± desvio padrão na mesma linha, seguido de letras diferentes, indicam diferenças estatisticamente significativas a $p = 0,05$ ($n = 3$). EU: Extrato obtido por ultrassom; EC: Extrato obtido por banho térmico; ECA: Extrato obtido por banho térmico adicionado de alginato; EUA: Extrato obtido por ultrassom adicionado de alginato; CCAL: Capsulas do extrato obtido por banho térmico adicionado de alginato liofilizado; CUAL: Extrato obtido por ultrassom adicionado de alginato liofilizado.

A encapsulação é um processo eficaz para preservar os bioativos encapsulados das condições circundantes, ao mesmo tempo que auxilia na entrega otimizada e na liberação controlada dos compostos ativos transportados (ALU'DATT et al., 2022). Embora o teor de antocianinas, não tenha apresentado diferenças significativas ($p > 0,05$) entre as amostras estudadas, para todas as outras análises de compostos bioativos (CFT e Flavonoides) e atividade antioxidante (DPPH, ABTS, FRAP) houve um aumento do poder antioxidante quando os extratos foram encapsulados (CCAL e CUAL). O que indica o encapsulamento como um método eficaz para uma melhor preservação dos compostos extraído da casca do fruto da juçara. Um outro estudo, realizado por Rezende et colaboradores (2018), obteve uma melhora de 50% nos valores de antioxidantes (compostos fenólicos e flavonoides) ao encapsular os extratos de polpa e do resíduo da acerola. Esse resultado reforça essa melhora na preservação dos compostos bioativos pelo encapsulamento dando uma melhor utilidade do resíduo agroindustrial ao manter uma boa atividade antioxidante.

3.3 APLICAÇÃO DOS COMPOSTOS BIOATIVOS EM FILMES

Após os compostos bioativos serem obtidos pela extração e passados pelos processos de encapsulamento e liofilização, eles foram aplicados em filmes biodegradáveis produzidos pelo método de casting. A aparência dos filmes elaborados

sem adição de extrato (F); com adição de extrato obtido por banho térmico (FC) e com adição de extrato obtido por ultrassom (FU) podem ser observados na Figura 1.

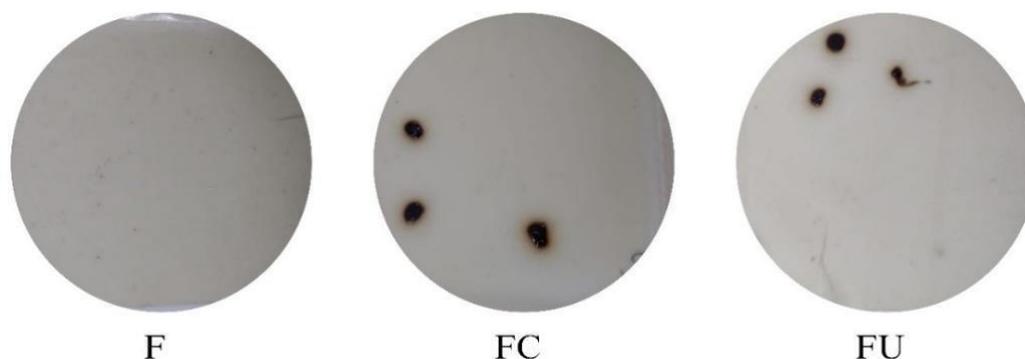


Figura 1. Filmes biodegradáveis sem adição de extrato (F); com adição de extrato obtido por banho térmico (FC) e com adição de extrato obtido por ultrassom (FU)

Embora os filmes adicionados de extrato tenham apresentados pontos mais escuros (dada a cor do extrato) apresentando uma aparência não homogênea, os filmes preparados apresentaram superfície lisa, boa maleabilidade e foram facilmente removidos das placas demonstrando o seu potencial como filme autossustentado. Bem como aponta a literatura, onde os filmes plastificados de polióis (como glicerol e sorbitol) são conhecidos por produziam superfícies macias, lisas, claras e homogêneas com boa resistência mecânica (Jeya Jeevahan et al., 2020). A adição dos extratos pode ser facilmente identificada pela concentração dos pontos onde foram aplicados, provavelmente pela técnica de encapsulação utilizada.

3.4 AVALIAÇÃO DA COR DOS FILMES BIODEGRADÁVEIS

A cor do filme é essencial para melhorar a aceitabilidade dos consumidores (JEYA JEEVAHAN et al., 2020). Assim, os filmes biodegradáveis produzidos neste estudo foram avaliados quanto à cor instrumental, para os parâmetros L^* , a^* , b^* e H, como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros de cor instrumental para os filmes

Parâmetros	F	FC	FU
L^*	82,01 ^a ± 0,41	72,39 ^a ± 6,13	76,07 ^a ± 6,05
a^*	-1,27 ^a ± 0,01	-1,22 ^a ± 0,70	-0,82 ^a ± 0,53
b^*	10,98 ^b ± 0,71	13,30 ^a ± 1,11	13,37 ^{ab} ± 1,05
H	96,62 ^b ± 0,38	95,40 ^a ± 3,39	93,87 ^a ± 2,62

Média ± desvio padrão na mesma linha, seguido de letras diferentes, indicam diferenças estatisticamente significativas a $p = 0,05$ ($n = 3$)

De forma geral os extratos de plantas alteram a cor dos polímeros (Silva-Weiss et al., 2013). De fato, foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$) para alguns parâmetros de cor dos filmes com e sem adição de capsulas. Os filmes incorporados de cápsulas apresentaram maior valor do parâmetro b^* (componente amarelo-azul) em comparação ao filme sem adição de capsulas. Essa diferença implica em sua cor mais amarelada, provavelmente devido a interação das capsulas com o material do filme biodegradável, que forma halos amarelados ao redor da capsula quando aplicadas ao biofilme, como pode ser observado na Figura 1. Outros estudos apontam também um impacto de diferença de cor, sendo a mudança na cor dos filmes depende da fonte do extrato e da quantidade utilizada (Mir et al., 2018). No que se refere ao parâmetro H (tonalidade), os filmes adicionados dos compostos bioativos apresentaram uma cor mais intensa quando comparado ao filme sem adição das capsulas. Já para os parâmetros L^* (Luminosidade) e a^* (componente vermelho-verde), não foram encontradas diferenças significativas ($p > 0,05$), provavelmente pela distribuição heterogênea e concentrada dos extratos apenas em certos pontos do filme. A maioria dos filmes não plastificados são claros e transparentes, o que os torna mais aceitáveis (Jeya Jeevahan et al., 2020), por isso foi interessante observar que a adição dos extratos propostos neste trabalho não afetou a luminosidade dos filmes.

3.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS FILMES BIODEGRADÁVEIS

A funcionalidade final dos filmes está relacionada à sua bioatividade, como a atividade antioxidante; físicas como sua cor; e à sua funcionalidade, como sua capacidade de servir como barreira ao vapor de água, oxigênio, dióxido de carbono e luz UV-vis (Silva-Weiss et al., 2013). Assim, as propriedades mecânicas como a espessura (E); resistência máxima a tração (RT); alongação na ruptura (ER); módulo de Young (MY) e permeabilidade ao vapor de água (PVA) foram avaliadas para os filmes biodegradáveis. A Tabela 4 exibe as propriedades mecânicas dos filmes fabricados, sem adição de extrato e com adição de extratos (extração convencional-FC e por ultrassom-FU), a fim de evidenciar a influência da adição dos compostos bioativos no comportamento mecânico dos filmes produzidos.

A espessura do filme é um parâmetro muito importante na determinação das propriedades físicas dos materiais de embalagem, ela pode afetar as propriedades biológicas e o prazo de validade dos alimentos revestidos (Pająk; Przetaczek-Rożnowska; Juszczak, 2019). A resistência mecânica dos filmes depende normalmente da relação de alguns parâmetros como a espessura e quantidade de aditivos (Gürler et al., 2020). Neste estudo, foi verificado que os filmes com adicionados das capsulas de compostos bioativos apresentam maior ($p < 0,05$) espessura que o filme sem adição de capsulas. Sendo então que a quantidade de aditivos teve impacto na espessura, enquanto o método de extração dos compostos (convencional e ultrassom) apresentaram resultados estatisticamente iguais, variando de uma média de 0,28 mm para o FC à 0,35 mm para o filme FU. A espessura dos filmes deste trabalho foi muito similar aos valores de espessura encontrado por Fernandes e colaboradores (2015), que obteve uma espessura de 0,19 mm, resultado da mesma técnica de produção de filmes, o método de casting, onde os filmes são secos em suporte.

Tabela 4. Valores médios para espessura, propriedades mecânicas e de permeabilidade ao vapor de água de filmes biodegradáveis sem adição de extrato e com adição de extrato obtido por diferentes métodos

Propriedades	F	FC	FU
e (mm)	0,17 ^b ± 0,07	0,28 ^a ± 0,12	0,35 ^a ± 0,12
RT (MPa)	2,7090 ^a ± 1,2771	2,0513 ^a ± 1,159209	2,2143 ^a ± 1,7807
ER (%)	0,0086 ^b ± 0,0033	0,0127 ^a ± 0,0073	0,0174 ^a ± 0,0059
MY (MPa)	0,0218 ^a ± 0,0066	0,0204 ^b ± 0,0135	0,0205 ^b ± 0,0106
PVA x 10⁻⁴ (g mm/m² h kPa)	1,04 ^b ± 0,03	1,87 ^a ± 0,21	1,64 ^a ± 0,25

Média ± desvio padrão na mesma linha, seguido de letras diferentes, indicam diferenças estatisticamente significativas a $p = 0,05$ ($n = 18$); e: espessura; RT: Resistência máxima a tração; ER: Elongação na ruptura; MY: Módulo de Young e ($n=3$); PVA: Permeabilidade ao vapor de água. F:filme controle; FC:filme com adição de 1% de extrato obtido pelo banho térmico; FU:filme com adição de 1% de extrato obtido por ultrassom.

A resistência à tração (RT, MPa) é a resistência máxima que mede a resistência do filme, enquanto a porcentagem de alongamento na ruptura (ER%) é uma medida da capacidade de estiramento ou flexibilidade do filme antes da ruptura. Não houve diferenças significativas ($P > 0,05$) para a resistência máxima à tração dos filmes desenvolvidos mais foi encontrado diferenças para alongação na ruptura (ER %). A resistência máxima à tração apresentou valores entre 2,17 e 3,05 MPa. Provavelmente, devido ao fato de que todos os filmes foram produzidos utilizando a mesma base, uma mistura de alginato e gelatina adicionados ou não das capsulas. Filmes compostos são normalmente superiores às películas poliméricas simples e constituem uma abordagem simples para melhorar as propriedades mecânicas dos filmes (Rezvanian; Mohd Amin; Ng, 2016). Assim a composição dessa base, pode ter influenciado a resistência dos filmes independente da adição das capsulas. No que se refere à alongação na ruptura (ER %), o filme com a adição de capsulas de extrato apresentou um maior poder de alongação à ruptura, provavelmente por conta da maior flexibilidade nos pontos mais concentrados de extrato.

O Módulo de Young razão entre tensão (força aplicada por unidade de área) e deformação (mudança relativa no comprimento original) na direção longitudinal do material. Quanto maior o módulo de Young, mais rígido é o material e mais resistente à deformação elástica (Hibbeler, 2010). Os filmes adicionados de compostos bioativos da casca da juçara na forma encapsulada apresentaram valores ligeiramente mais baixos para o Módulo de Young em relação ao filme sem adição de capsula, revelando que de maneira geral, a adição da capsula não aumentou a rigidez do material.

A resistência mecânica e as propriedades de barreira ao vapor de água e gases (principalmente oxigênio e dióxido de carbono) dos filmes não plastificados são inferiores aos plásticos derivados do petróleo. Plastificantes são adicionados à solução formadora de filme para melhorar sua flexibilidade. As moléculas plastificantes quebram as interações polímero-polímero e criam as interações polímero-plastificante. Como resultado, a adição de plastificante torna o filme macio e flexível (Jeya Jeevahan *et al.*, 2020; Jia *et al.*, 2023). Além da adição de plastificantes na formulação dos filmes biodegradáveis, neste trabalho foi observado que a adição das capsulas apresentaram influência na permeabilidade de vapor de água, sendo que os filmes com extrato

encapsulado apresentam valores maiores ($p < 0,05$), quando comparados ao valor médio encontrado para o filme sem extrato.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As propriedades bioativas de uma vasta gama de plantas e seus subprodutos ainda não foram exploradas na literatura. A casca da juçara apresenta em sua composição antioxidantes com potencial aplicação na indústria de alimentos, assim este estudo, apresentou a extração e encapsulação da juçara em diferentes condições e sua aplicação em filmes biodegradáveis como alternativa para o reaproveitamento deste subproduto.

Os resultados mostraram que a aplicação destes compostos, independentemente do método de extração, melhora as propriedades mecânicas de filmes biodegradáveis ao mesmo tempo que agrega compostos bioativos e que podem eventualmente aumentar a estabilidade dos alimentos. Sendo o contato entre os compostos bioativos do filme e o alimento, um ponto que deve ser estudado com maior profundidade em futuros trabalhos.

A extração de compostos bioativos da casca da palmeira juçara para a produção de embalagens biodegradáveis não apenas valoriza um resíduo agroindustrial, mas também contribui de maneira eficaz para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), atendendo aos ODS 2, 12 e 15 das Nações Unidas, relacionados à redução de resíduos alimentícios, agricultura sustentável e conservação das florestas através da valorização da casca do fruto. Essa estratégia representa uma abordagem inovadora e sustentável, alinhando-se com a promoção da segurança alimentar e práticas responsáveis de consumo e produção.

REFERÊNCIAS

ABDALLA DE OLIVEIRA, L.; GUIMARÃES, P.; GUIMARÃES DE SOUZA, R. **Palmeira juçara: patrimônio natural da mata atlântica no Espírito Santo**. INCAPER, 2017. 1–66 p.

ALU'DATT, M. H. et al. Encapsulation-based technologies for bioactive compounds and their application in the food industry: A roadmap for food-derived functional and health-promoting ingredients. **Food Bioscience**, v. 50, p. 101971, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101971>

ASTM. **Test methods for tensile properties of thin plastic sheeting**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1996.

ASTM. **Standard test methods for water vapour transmission of material**. Philadelphia: American Society for Testing and Materials – ASTM, 2000. 96-95 p.

BICUDO, M. O. P.; RIBANI, R. H.; BETA, T. Anthocyanins, Phenolic Acids and Antioxidant Properties of Juçara Fruits (*Euterpe edulis M.*) Along the On-tree Ripening Process. **Plant Foods for Human Nutrition**, v. 69, n. 2, p. 142–147, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11130-014-0406-0>

BORGES, G. S. C.; GONZAGA, L. V.; JARDINI, F. A.; MANCINI FILHO, J.; HELLER, M.; MICKE, G.; COSTA, A.C. O.; FETT, R. Protective effect of *Euterpe edulis M.* on Vero cell culture and antioxidant evaluation based on phenolic composition using HPLC-ESI-MS/MS. **Food Research International**, v. 51, n. 1, p. 363–369, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.12.035>

CARDOSO, A. L.; DI PIETRO, P. F.; VIEIRA, F. G.K.; BOAVENTURA, B. C. B.; LIZ, S.; BORGES, G.; FETT, R.; ANDRADE, D. F.; SILVA, E. L. Acute consumption of juçara juice (*Euterpe edulis*) and antioxidant activity in healthy individuals. **Journal of Functional Foods**, v. 17, p. 152–162, 2015. [10.1016/j.jff.2015.05.014](https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.05.014).

EMBRAPA. **Desenvolvimento de novos produtos visando o melhor aproveitamento de frutos de Juçara**. 2022.

ENARU, B.; DREȚCANU, G.; POP, T. D.; STĂNILĂ, A.; DIACONEASA, Z. **Anthocyanins: Factors affecting their stability and degradation**. **Antioxidants**. MDPI, 2021. <https://doi.org/10.3390/antiox10121967>

FERNANDES, A. P. S.; COSTA, J. B.; SOARES, D. S. B.; MOURA, C. J.; SOUZA, A. R. M. Aplicação de filmes biodegradáveis produzidos a partir de concentrado proteico de soro de leite irradiado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 2, p. 192–199, 2015. <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4530844>

GARCIA, J. A. A. et al. Chemical composition and biological activities of Juçara (*Euterpe edulis Martius*) fruit by-products, a promising underexploited source of high-added value compounds. **Journal of Functional Foods**, v. 55, p. 325–332, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2019.02.037>

GÜRLER, N.; PAŞA, S.; HAKKI ALMA, M.; TEMEL, H. The fabrication of bilayer polylactic acid films from cross-linked starch as eco-friendly biodegradable materials: Synthesis, characterization, mechanical and physical properties. **European Polymer Journal**, v. 127, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2020.109588>

HIBBELER, R. C. **Mechanics of materials**. 7. ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

INADA, K. O. P. et al. Screening of the chemical composition and occurring antioxidants in jaboticaba (*Myrciaria jaboticaba*) and jussara (*Euterpe edulis*) fruits and their fractions. **Journal of Functional Foods**, v. 17, p. 422–433, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.06.002>

JEYA JEEVAHAN, J.; CHANDRASEKARAN, M.; VENKATESAN, S. P.; SRIRAM, V.; BRITTO JOSEPH, G.; MAGESHWARAN, G.; DURAIRAJ, R. B. Scaling up difficulties and commercial aspects of edible films for food packaging: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 100, p. 210–222, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.04.014>

JIA, F.; HUANG, Y.; HOU, Y.; HU, S.Q. Characterization and formation mechanisms of high tensile strength gliadin films prepared by bi-crosslinking and blending. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 37, p. 101082, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101082>

KOLA, V.; CARVALHO, I. S. Plant extracts as additives in biodegradable films and coatings in active food packaging. **Food Bioscience**, p. 102860, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102860>

KUCHAIYAPHUM, P.; CHOTICHAYAPONG, C.; KAJSANATHIA, K.; SAENGSUWAN, N. Carboxymethyl cellulose/poly (vinyl alcohol) based active film incorporated with tamarind seed coat waste extract for food packaging application. **International Journal of Biological Macromolecules**, p. 128203, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128203>

LEES, D. H.; FRANCIS, F. J. Quantitative methods for anthocyanins. **Journal of Food Science**, v. 36, n. 7, p. 1056–1060, 1971. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1971.tb03345.x>

MANIGLIA, B. C.; SILVEIRA, T. M. G.; TAPIA-BLÁCIDO, D. R. Starch isolation from turmeric dye extraction residue and its application in active film production.

International Journal of Biological Macromolecules, v. 202, p. 508–519, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.12.145>

MARTINS, V. G.; ROMANI, V. P.; MARTINS, P. C.; FILIPINI, G. S. Innovative packaging that saves food. *Em: Saving Food: Production, Supply Chain, Food Waste and Food Consumption*. 2019. p. 171–202. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815357-4.00006-7>

MIR, S. A.; DAR, B. N.; WANI, A. A.; SHAH, M. A. **Effect of plant extracts on the techno-functional properties of biodegradable packaging films. Trends in Food Science and Technology**, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.004>

PAJAŁ, P.; PRZETACZEK-ROŻNOWSKA, I.; JUSZCZAK, L. Development and physicochemical, thermal and mechanical properties of edible films based on pumpkin, lentil and quinoa starches. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 138, p. 441–449, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.07.074>

PARAÍSO, C. M. et al. Comparative studies on chemical stability, antioxidant and antimicrobial activity from hot and cold hibiscus (*Hibiscus sabdariffa* L.) calyces tea infusions. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 15, n. 4, p. 3531–3538, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00936-4>

RAY, A.; DUBEY, K. K.; MARATHE, S. J.; SINGHAL, R. Supercritical fluid extraction of bioactives from fruit waste and its therapeutic potential. **Food Bioscience**, p. 102418, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102418>

REZENDE, Y. R. R. S.; NOGUEIRA, J. P.; NARAIN, N.. Microencapsulation of extracts of bioactive compounds obtained from acerola (*Malpighia emarginata* DC) pulp and residue by spray and freeze drying: Chemical, morphological and chemometric characterization. **Food Chemistry**, v. 254, p. 281–291, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.02.026>

REZVANIAN, M.; MOHD AMIN, M. C. I.; NG, S. F. Development and physicochemical characterization of alginate composite film loaded with simvastatin as a potential wound dressing. **Carbohydrate Polymers**, v. 137, p. 295–304, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.10.091>

RIBEIRO, L. O.; MENDES, M.F.; SOUZA, C.; PEREIRA, S. **Avaliação da Composição Centesimal, Mineral e Teor de Antocianinas da Polpa de Juçará (*Euterpe edulis Martius*) Evaluation of Chemical Composition, Mineral and Content of Anthocyanins of Juçará Pulp (*Euterpe edulis Martius*)**. [s.l.: s.n.].

ROMANINI, E. B.; MISTURINI RODRIGUES, L.; FINGER, A.; PEREZ CANTUARIA CHIERRITO, T.; REGINA DA SILVA SCAPIM, M.; SCARAMAL MADRONA, G. Ultrasound assisted extraction of bioactive compounds from BRS Violet grape pomace followed by alginate-Ca²⁺ encapsulation. **Food Chemistry**, v. 338, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128101>

SCHULZ, M. *et al.* Chemical composition, bioactive compounds and antioxidant capacity of juçara fruit (*Euterpe edulis Martius*) during ripening. **Food Research International**, v. 77, p. 125–131, 2015a. [10.1016/j.foodres.2015.08.006](https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.08.006).

SCHULZ, M. *et al.* Chemical composition, bioactive compounds and antioxidant capacity of juçara fruit (*Euterpe edulis Martius*) during ripening. **Food Research International**, v. 77, p. 125–131, 2015b. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.08.006>

SCHULZ, M.; BORGES, G.; GONZAGA, L. V.; OLIVEIRA COSTA, A. C.; FETT, R. Juçara fruit (*Euterpe edulis Mart.*): Sustainable exploitation of a source of bioactive compounds. **Food Research International**. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.07.027>

BORGES, G.; GRACIELI KUNRADI VIEIRA, F.; COPETTI, C.; VALDEMIRO GONZAGA, L.; ZAMBIAZI, R. C.; MANCINI FILHO, J.; FETT, R. Chemical characterization, bioactive compounds, and antioxidant capacity of jussara (*Euterpe edulis*) fruit from the Atlantic Forest in southern Brazil. **Food Research International**, v. 44, n. 7, p. 2128–2133, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.12.006>

SILVA, N. A.; RODRIGUES, E.; MERCADANTE, A. Z.; ROSSO, V. V.. Phenolic compounds and carotenoids from four fruits native from the Brazilian Atlantic forest. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 62, n. 22, p. 5072–5084, 2014. [10.1021/jf501211p](https://doi.org/10.1021/jf501211p).

SILVA-WEISS, A.; IHL, M.; SOBRAL, P. J. A.; GÓMEZ-GUILLÉN, M. C.; BIFANI, V. Natural Additives in Bioactive Edible Films and Coatings: Functionality and Applications in Foods. **Food Engineering Reviews**. v.4, 2013. <https://doi.org/10.1007/s12393-013-9072-5>

STOLL, L.; SILVA, A. M.; IAHNKE, A. O. S.; COSTA, T. M.H.; FLÔRES, S. H.; RIOS, A. O. Active biodegradable film with encapsulated anthocyanins: Effect on the quality attributes of extra-virgin olive oil during storage. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 41, n. 6, 2017. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13218>

ZHANG, C. W.; NAIR, S. S.; CHEN, H.; YAN, N.; FARNOOD, R.; LI, F. Y. Thermally stable, enhanced water barrier, high strength starch bio-composite reinforced with lignin containing cellulose nanofibrils. **Carbohydrate Polymers**, v. 230, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115626>