



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
UNIDADE ACADÊMICA DE SERRA TALHADA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

MAYARA BERNARDO TAVARES MARTIM

**ADUBAÇÃO COMO FATOR DE INTERFERÊNCIA NA OBTENÇÃO DE
BIOFILMES DE MUCILAGENS DE PALMA FORRAGEIRA E PITAIA**

Serra Talhada - PE

2026

MAYARA BERNARDO TAVARES MARTIM

**ADUBAÇÃO COMO FATOR DE INTERFERÊNCIA NA OBTENÇÃO DE
BIOFILMES DE MUCILAGENS DE PALMA FORRAGEIRA E PITAIA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Dr. Adriano do Nascimento
Simões

Serra Talhada - PE

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Israel Lacerda do Nascimento – CRB-4 2317

M378a Martim, Mayara Bernardo Tavares.

Adubação como fator de interferência na obtenção de biofilmes de mucilagens de palma forrageira e pitaia / Mayara Bernardo Tavares Martim. – Serra Talhada, 2026.

89 f.; il.

Orientador(a): Adriano do Nascimento Simões.

Co-orientador(a): Valécia Nogueira Santos e Silva.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica Serra Talhada - UAST, Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Serra Talhada, BR-PE, 2026.

Inclui referências.

1. Pitaia. 2. Palma forrageira. 3. Cactos - Mucilagem. 4. Polímeros vegetais 5. Adubos e fertilizantes. I. Simões, Adriano do Nascimento, orient. II. Silva, Valécia Nogueira Santos e, coorient. III. Título

CDD 581.15

MAYARA BERNARDO TAVARES MARTIM

**ADUBAÇÃO COMO FATOR DE INTERFERÊNCIA NA OBTENÇÃO DE
BIOFILMES DE MUCILAGENS DE PALMA FORRAGEIRA E PITAIA**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal Rural de Pernambuco, Unidade
Acadêmica de Serra Talhada, como parte das
exigências do Programa de Pós-Graduação em
Produção Vegetal, para obtenção do título de
Mestre em Produção Vegetal.

Aprovada em: __/__/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adriano do Nascimento Simões – UAST/UFRPE
Orientador

Prof.^a. Dra. Glória Maria Vinhas – UFPE
Examinadora Externa

Dr. Ivo Diego de Lima Silva – UFRPE/UAST
Examinador Interno

Dedico este trabalho àqueles que deram sentido à minha trajetória: à minha mãe, cujas orações e apoio foram meu alicerce; ao meu esposo, pela paciência e por dividir comigo cada renúncia e cada vitória; e ao meu filho, por ser a luz que ilumina o meu futuro e o motivo de toda a minha dedicação. Obrigada por serem meus maiores incentivadores e por estarem ao meu lado em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda a sabedoria, pela força para continuar lutando em busca dos meus objetivos e não ter me deixado desistir.

Ao meu esposo José Martim, que é o meu maior incentivador para que eu continuasse estudando e pela compreensão e paciência, e por ser a pessoa que mais me dá força para não desistir.

Ao meu filho Josué, por ser minha maior inspiração para continuar lutando por um futuro melhor, além de ser meu porto seguro.

A minha mãe Lucila Bernardo pelo amor e apoio e por ser meu porto seguro durante todo esse tempo.

Ao meu orientador, Dr. Adriano do Nascimento Simões, agradeço pela paciência, pelo diálogo sempre aberto e pelo apoio constante, mesmo diante dos desafios enfrentados. E por todo ensinamento e conhecimento destinados, pela assistência e orientação durante a pós-graduação.

A minha coorientadora Dra. Valécia Nogueira Santos e Silva pela disponibilidade e pelo rigor acadêmico para o amadurecimento deste trabalho.

Aos meus amigos Ericks, Jasiel, Ivanice, Emmanuel e Jessica. Que foram bastante importantes durante esse ciclo de pós-graduação, obrigado por serem meu refúgio, pelas palavras de incentivo nos momentos de cansaço e por me lembrarem de que existe vida além da pesquisa, sem o apoio mútuo e o bom humor de vocês, o peso desta jornada teria sido muito maior.

Aos meus amigos Lady, Wagner, Alexandre, Daniel, Natanael e Vivian. agradeço imensamente pela constante troca de experiências e conhecimentos. As discussões compartilhadas, as dúvidas sanadas em conjunto e a colaboração mútua foram pilares que tornaram este trabalho mais rico.

Ao Núcleo de Estudos de Fisiologia e Pós-colheita (NEFP) do qual faço parte e por disponibilizar sua estrutura para realização das análises, e pelo o apoio de todos os integrantes.

A UFRPE/UAST, pelo fornecimento de suas instalações para o desenvolvimento dessas pesquisas.

Ao PGPV, pelo incentivo a pesquisa, e por ser um programa acolhedor durante esse processo.

A FACEPE pelo fomento da bolsa de pesquisa, foi de grande importância para meu desenvolvimento acadêmico.

Ao grupo de Agrometeorologia no Semiárido (GAS), pelo fornecimento de material vegetal da palma forrageira para a realização da pesquisa.

Ao grupo de Instrumentação e Análises Químicas (GIAQ) pelo apoio nas medidas de infravermelho das amostras.

*Nada na vida deve ser temido, apenas compreendido. Agora é a hora de compreender
mais, para que possamos temer menos.*

(Marie Curie)

RESUMO GERAL

Os problemas ambientais e sanitários ocasionados devido ao uso descontrolado de plásticos evidencia a necessidade da produção de novos materiais ambientalmente corretos, como o uso de biopolímeros de origem natural. A mucilagem proveniente de cactáceas apresentam grande potencial para produção de filmes por apresentar elevada capacidade de formação de rede polimérica, devido apresentar uma variedade de polissacarídeos em sua composição semelhante aos plásticos e embalagens. Além de uso na incorporação de ingredientes alimentícios. Manejos agrônômicos como época e horário de colheita, podem influenciar a composição química da mucilagem, e, conseqüentemente seus filmes biopoliméricos. Diante disso, objetivou-se obter mucilagens oriundas de cactáceas (palma forrageira e pitiaia) submetidas a doses de nitrogênio e esterco bovino e desenvolver filmes biopolimericos com aplicabilidade industrial. Nos estudos com plantas de palma forrageira (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.) foram submetidos a doses de adubação nitrogenada de 0, 150, 300 e 450 kg N ha⁻¹ consorciadas com leguminosas e gramíneas. Para obtenção de mucilagem, os cladódios foram cortados, homogeneizado com álcool (99,3% P.A.) e secado em estufa a 55 °C por 24 h. A mucilagem obtida foi quantificada o rendimento, sódio, potássio, sólidos solúveis capacidade de retenção de água e óleo, acidez tituláveis, pH, condutividade elétrica, proteína total, carboidratos, composto fenólicos, vitamina C. Para obtenção de filmes biopoliméricos utilizou-se 4g de mucilagem e 150 ml de água e glicerol (3,5%), foi seco em estufa a 45 °C por 5 h. A mucilagem obtida de cladódio fertilizado com da dose 300 kg N ha⁻¹ mostrou o maior valor para o rendimento, carboidratos, compostos fenólicos e vitamina C, e menor valor para condutividade elétrica e capacidade de retenção de água, e com pH ligeiramente ácido. Os filmes da dose 300 kg N ha⁻¹ foram menos transparentes, com maior luminosidade, solubilidade e teor de umidade. aspecto visualmente melhor, com picos mais intensos de FTIR, e mostrou as menores perda de massa na estabilidade térmica. Nos ensaios com pitiaia, as plantas foram submetidas a doses de fertilização com esterco bovino de 10,66; 21,33 e 49, 33 kg planta⁻¹. Os cladódios foram colhidos por meio da poda de limpeza, com o mesmo método de extração da mucilagem da palma forrageira, citado anteriormente. Para elaboração dos filmes biopoliméricos utilizou-se 3g de mucilagem e 150 ml de água e glicerol (35%), foi seco em estufa a 45 °C por 8 h. A mucilagem derivada de plantas adubadas com 49,33 kg planta⁻¹, apresentou maiores rendimento, teor de K⁺, proteína, carboidratos, composto fenólicos e vitamina C. Os filmes oriundos dessa mucilagem apresentaram mais homogêneos, com coloração amarelada, mais transparentes, com picos mais acentuados para o

espectro do infravermelho, maior teor de umidade e menores perda de massa na estabilidade térmica. Diante dos resultados obtidos para ambos tratamentos, demostram um desempenho viável e sustentável para aplicação na indústria de alimentos.

Palavras-chave: *Opuntia*, *Hylocereus*, polímeros, cactos, mucilagem.

GENERAL ABSTRACT

The environmental and health problems caused by the uncontrolled use of plastics highlight the need to adopt environmentally friendly technologies, such as the use of biopolymers of natural origin. The mucilage from cacti has great potential for film production due to its high capacity for forming a polymer network similar to plastics and packaging. It is also used in the incorporation of food ingredients. Agronomic management practices, such as harvest time and timing, can influence the chemical composition of the mucilage and, consequently, its biopolymeric films. Although these effects are still poorly understood, the objective was to obtain mucilage from cacti (forage palm and pitaya) subjected to doses of nitrogen and bovine manure and to develop biopolymeric films with industrial applicability. In studies with forage palm plants (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), which were subjected to nitrogen fertilization doses of 0, 150, 300 and 450 kg N ha⁻¹ intercropped with legumes and grasses, the second-order cladodes were harvested at a similar size. To obtain mucilage, the cladodes were cut, the chlorenchyma was removed, it was then homogenized with alcohol (99.3% P.A.), washed until the precipitate was obtained, and dried in an oven at 55 °C for 24 h. The mucilage obtained was quantified for yield, sodium, potassium, soluble solids, water and oil retention capacity, titratable acidity, pH, electrical conductivity, total protein, carbohydrates, phenolic compounds, and vitamin C. To obtain biopolymeric films, 4g of mucilage and 150 ml of water and glycerol (3.5%) were used, and the mixture was dried in an oven at 45 °C for 5 h. The mucilage obtained from cladodes fertilized with a dose of 300 kg N ha⁻¹ showed the highest value for yield, carbohydrates, phenolic compounds, and vitamin C, and the lowest value for electrical conductivity and water retention capacity, with a slightly acidic pH. The films derived from this dose were less transparent, with greater luminosity, solubility, and moisture content. They had a visually better appearance, with more intense FTIR peaks, and showed the lowest mass loss in thermal stability. In the pitaya assays, the plants were subjected to bovine manure fertilization doses of 10.66, 21.33, and 49.33 kg plant⁻¹. The cladodes were harvested by pruning to select healthy ones, using the same mucilage extraction method described previously, and the biopolymer films were prepared using 3g of mucilage and 150 ml of water and glycerol (35%), and dried in an oven at 45 °C for 8 h. The mucilage derived from plants fertilized with 49.33 kg plant⁻¹ showed higher yield, K⁺ content, protein, carbohydrates, phenolic compounds and vitamin C. The films derived from this mucilage were more homogeneous, with a yellowish color, greater transparency, more pronounced peaks in the infrared spectrum, higher moisture content, and lower mass loss during thermal stability. Based

on the results obtained, they demonstrate a viable and sustainable performance for application in the food industry.

Keywords: *Opuntia*, *Hylocereus*, polymers, cacti, mucilage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1 – FERTILIZAÇÃO NITROGENADA EM *Opuntia stricta* (Haw.) Haw PARA OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA MUCILAGEM E DE SEUS FILMES BIOPOLIMÉRICOS PARA FINS INDUSTRIAIS

Figura 1 – Mapa de localização da área de experimental no município de Serra Talhada.	4
Figura 2 – Proteínas solúveis totais (mg 100 g ⁻¹ MS) (A), Compostos fenólicos totais (mg AG 100 g ⁻¹ MS) (B), Carboidratos solúveis totais (mg 100 g ⁻¹ MS) (C) e Vitamina C (mg AA 100 g ⁻¹ MS) (D) de mucilagem de cladódios de palma (<i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha ⁻¹).....	15
Figura 3 – Filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de palma (<i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação de nitrogenada 0 (A), 150 (B), 300 (C) e 450 (D) (kg N ha ⁻¹).....	16
Figura 4 – Espectros de infravermelho (FTIR) da mucilagem (A) e dos filmes biopoliméricos (B) oriundos de mucilagem de palma (<i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha ⁻¹).....	18
Figura 5 – Solubilidade em água (%) (A) e Teor de umidade (%) (B) dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de palma (<i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha ⁻¹).....	19
Figura 6 – TGA (%) (A) e DTG (%/°C) (B) dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de palma (<i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha ⁻¹).....	20

CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E TECNOLÓGICA DE MUCILAGEM E FILMES BIOPOLIMÉRICO ORIUNDO DE PLANTAS DE PITAIA PROVENIENTE DE ADUBAÇÃO COM ESTERCO BOVINO

Figura 1 – Mapa de localização da área experimental no município de Serra Talhada.....	43
Figura 2 – Proteínas solúveis totais (mg 100 g ⁻¹ MS) (A), Compostos fenólicos totais (mg AG 100 g ⁻¹ MS) (B), Carboidratos solúveis totais (mg 100 g ⁻¹ MS) (C) e Vitamina C (mg AA 100 g ⁻¹ MS) (D) de mucilagem de cladódios de pitaia (<i>Hylocereus</i>	

	<i>polyrhizus</i>), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49, 33 kg planta ⁻¹).....	55
Figura 3 –	Filmes biopoliméricos elaborados a partir de mucilagem de cladódios de pitaia (<i>Hylocereus polyrhizus</i>), obtidos após ajustes nas condições de formulação e secagem, incluindo variações na concentração de glicerol, proporção mucilagem/água e parâmetros de secagem, até o estabelecimento da formulação adequada (3 g de mucilagem, 150 mL de água e 35% de glicerol, com secagem a 45 °C por 8 h).....	57
Figura 4 –	Filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de cladódios de pitaia (<i>Hylocereus polyrhizus</i>), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49, 33 kg planta ⁻¹).....	58
Figura 5 –	Espectros de infravermelho (FTIR) da mucilagem (A) e dos filmes biopoliméricos (B) oriundos de mucilagem de cladódios de pitaia (<i>Hylocereus polyrhizus</i>), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49, 33 kg planta ⁻¹). ..	60
Figura 6 –	Solubilidade em água (%) (A) e Teor de umidade (%) (B) dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de cladódios de pitaia (<i>Hylocereus polyrhizus</i>), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49, 33 kg planta ⁻¹).....	61
Figura 7 –	Análise termogravimétrica (TGA) massa residual (%) (A) e DTG (%/°C) (B) dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de cladódios de pitaia (<i>Hylocereus polyrhizus</i>), submetido a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49, 33 kg planta ⁻¹).....	62

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 – FERTILIZAÇÃO NITROGENADA EM *Opuntia stricta* (Haw.) Haw PARA OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA MUCILAGEM E DE SEUS FILMES BIOPOLIMÉRICOS PARA FINS INDUSTRIAIS

Tabela 1 –	Propriedades físico-químicas da mucilagem de cladódios de palma (<i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha ⁻¹).....	14
Tabela 2 –	Espessura, transparência e cor dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de palma (<i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha ⁻¹).....	17
Tabela 3 –	Parâmetros térmicos dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de palma (<i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha ⁻¹).....	21

CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E TECNOLÓGICA DE MUCILAGEM E FILMES BIOPOLIMÉRICO ORIUNDO DE PLANTAS DE PITAIA PROVENIENTE DE ADUBAÇÃO COM ESTERCO BOVINO

Tabela 1 –	Propriedades físico-químicas da mucilagem de cladódios de pitáia (<i>Hylocereus polyrhizus</i>), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49, 33 kg planta ⁻¹).....	54
Tabela 2 –	Espessura, transparência e cor dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de cladódios de pitáia (<i>Hylocereus polyrhizus</i>), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49, 33 kg planta ⁻¹).....	59
Tabela 3 –	Parâmetros térmicos dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de cladódios de pitáia (<i>Hylocereus polyrhizus</i>), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49, 33 kg planta ⁻¹).....	63

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Fertilização nitrogenada em *Opuntia stricta* (Haw.) Haw para otimização das propriedades físico-químicas da mucilagem e de seus filmes biopoliméricos para fins industriais 1

RESUMO.....	1
1. INTRODUÇÃO	2
2. MATERIAL E MÉTODOS	4
2.1 LOCAL DO EXPERIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	4
2.2 MATERIAL VEGETAL, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E MANEJO DA ÁREA	5
2.3 EXTRAÇÃO E PREPARO DA MUCILAGEM	5
2.4 AVALIAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS DA MUCILAGEM.....	6
2.5 PRODUÇÃO DOS FILMES BIOPOLIMÉRICOS	10
2.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS FILMES BIOPOLIMÉRIOS	10
2.7 ANÁLISES ESTATÍSTICA.....	13
3. RESULTADOS	14
3.1 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA MUCILAGEM DE PALMA FORRAGEIRA	14
3.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E ÓPTICAS DOS FILMES BIOPOLIMÉRICOS	17
4. DISCUSSÃO	23
5. CONCLUSÕES	28
6. REFERÊNCIAS.....	29

Capítulo 2 – Caracterização físico-química e tecnológica de mucilagem e filmes biopoliméricos oriundo de plantas de pitaia proveniente de adubação com esterco bovino

41

RESUMO.....	41
-------------	----

1. INTRODUÇÃO	42
2. MATERIAL E MÉTODOS	44
2.1 LOCAL DO EXPERIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	44
2.2 MATERIAL VEGETAL, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E MANEJO DA ÁREA	45
2.3 EXTRAÇÃO E PREPARO DA MUCILAGEM	45
2.4 AVALIAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS DA MUCILAGEM	46
2.5 PRODUÇÃO DOS FILMES BIOPOLIMÉRICOS	50
2.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS FILMES	50
2.7 ANÁLISES ESTATÍSTICA	52
3. RESULTADOS	53
3.1 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA MUCILAGEM DE PITAIA	53
3.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E ÓPTICAS DOS FILMES BIOPOLIMÉRICOS	56
4. DISCUSSÃO	64
5. CONCLUSÕES	66
6. REFERÊNCIAS.....	67



Capítulo 1 – Fertilização nitrogenada em *Opuntia stricta* (Haw.) Haw para otimização das propriedades físico-químicas da mucilagem e de seus filmes biopoliméricos para fins industriais

RESUMO

A crescente demanda por materiais sustentáveis e alimentos mais saudáveis tem impulsionado a busca por biopolímeros de origem vegetal capazes de substituir componentes alimentícios e sustentáveis. Nesse contexto, a mucilagem oriunda de cactáceas se destaca como uma matriz polissacarídica promissora, especialmente em regiões semiáridas. Este estudo avaliou, de forma inédita, a influência de doses crescentes de fertilizantes nitrogenados (0, 150, 300 e 450 kg N ha⁻¹) no cultivo da planta e consorciadas com leguminosa e gramínea, sobre as propriedades físico-químicas e tecnológica da mucilagem extraída de cladódios de *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. e sobre as características estruturais, ópticas e funcionais dos filmes biopoliméricos obtidos. Os cladódios foram lavados, cortados e lavado com etanol (99,3%) o precipitado foi seco em estufa obtendo-se o pó usado para análises e elaboração dos filmes. A fertilização nitrogenada (dose 300 kg N ha⁻¹) modulou significativamente a composição da mucilagem, promovendo redução da condutividade elétrica, dos teores de Na⁺ e K⁺ e da capacidade de retenção de água, ao mesmo tempo, em que aumentou o rendimento, o teor de carboidratos solúveis, compostos fenólicos e vitamina C. Os filmes produzidos a partir dessa mucilagem apresentaram matriz mais homogênea, maior luminosidade, menor transparência e maior solubilidade em água. A análise por FTIR confirmou a preservação dos principais grupos funcionais da mucilagem após o processamento, indicando estabilidade estrutural do biopolímero. Os resultados demonstram que o manejo agrônomo exerce papel determinante na qualidade tecnológica da mucilagem e dos biofilmes, posicionando a dose de 300 kg N ha⁻¹, associada ao sistema consorciado, como condição ideal para maximizar o desempenho dos filmes biopoliméricos de *O. stricta*, com elevado potencial para aplicações sustentáveis nas indústrias de alimentos e de embalagens.

Palavras-chave: biodegradável, adubação, polissacarídeos, cactos, glicerol.



1. INTRODUÇÃO

Problemas causados por resíduos fosseis a base de petróleo podem causar diversos impactos ambientais, como o aquecimento global causado principalmente pela liberação do dióxido de carbono (CO_2), devido ao consumo de produtos à base de petróleo^{1,2}. A indústria do plástico produz anualmente cerca de 300 milhões de toneladas de plástico, isso se deve ao consumo e a dependência da população e diversas aplicações devido a suas propriedades e ao seu baixo custo³. A maioria dos plásticos sintéticos geram inúmeros problemas ambientais, principalmente devido à sua resistência à biodegradação no ambiente⁴.

O aumento significativo da produção e uso de plásticos não-biodegradáveis tem levado a sérios problemas ambientais evidenciando a necessidade de novas matérias ambientalmente corretas, como o uso de biopolímeros de origem natural⁵. Os biopolímeros são um tipo de material polimérico, geralmente biodegradáveis, provenientes de subprodutos agrícolas ou animais. Por serem baseados em biorrecursos são considerados viáveis para substituir os plásticos convencionais⁶. O uso de materiais com rápida degradação diminui a quantidade de resíduos presentes na natureza. Além disso, é importante ressaltar que esse tipo de biomaterial geralmente é atóxico e seguro, podendo ser utilizados pela indústria alimentícia e farmacêutica⁷.

Existem variedades de plantas que apresentam boa adaptação às condições climáticas da região árida e semiárida, das quais se destacam as plantas com metabolismo ácido das crassuláceas (CAM). Dentre esse grupo das plantas CAM, a palma forrageira (gêneros *Opuntia* e *Nopalea*) pertence à família *Cactaceae* e devido a sua elevada rusticidade e rápido ciclo produtivo tem grande aptidão nas regiões mais quentes e secas⁸. Os cladódios de palma forrageira possuem reservas de mucilagem constituída de polissacarídeos para a absorção e armazenamento de água nos períodos secos, portanto, a mucilagem tem sido foco na indústria para produção de filmes devido sua elevada capacidade de formação de rede polimérica semelhante aos plásticos e embalagens^{5,9}.

Apesar de sua capacidade de tolerar a escassez de água, inovações de práticas agrícolas buscam melhorar o seu rendimento e aumentar a sua produtividade¹⁰. O plantio tem incluído aplicações como consórcio de culturas resistentes a seca e adubação nitrogenada. Essas práticas



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



são necessárias para que a palma continue produzindo cladódios mesmo no período de estiagem^{10,11}.

Em relação a manejo cultural, é conhecido que níveis de adubações nitrogenadas podem afetar o crescimento dos cladódios de palma¹², no entanto pouco se sabe sobre suas influências na composição química que afetam a qualidade dos biopolímeros. Além disso, é possível que outros manejos culturais empregados como o consórcio da palma com gramíneas e leguminosas forrageiras podem interferir na qualidade da mucilagem, modificando seus atributos físico-químicos para obtenção de biopolímeros para a indústria¹³.

Características físico-químicas e bioquímicas da mucilagem de cactáceas, podem se diversificar devido a diversos fatores, como espécies, tratos culturais com a utilização de diferentes concentrações e adubações nitrogenadas. Todas essas variáveis podem mudar as propriedades da mucilagem e consequentemente dos filmes biopoliméricos, devido ao uso eficiente da água, o aumento na produção de biomassa o que favorece o aumento da concentração de polissacarídeos¹⁴. Neste sentido será avaliado o quanto os diferentes tratos culturais podem influenciar nas propriedades físico-químicas da mucilagem e dos filmes biopoliméricos.

Portanto, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes manejos agronômicos, considerando combinações de doses de adubação nitrogenada e sistemas de cultivo consorciado com sorgo e leguminosas, sobre as propriedades físico-químicas da mucilagem extraída de *Opuntia stricta* (Haw.) Haw.. Além disso, buscou-se caracterizar as propriedades estruturais, ópticas e funcionais dos filmes biopoliméricos produzidos a partir dessa mucilagem, visando identificar condições de cultivo que potencializem sua aplicabilidade tecnológica e industrial.



2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 LOCAL DO EXPERIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

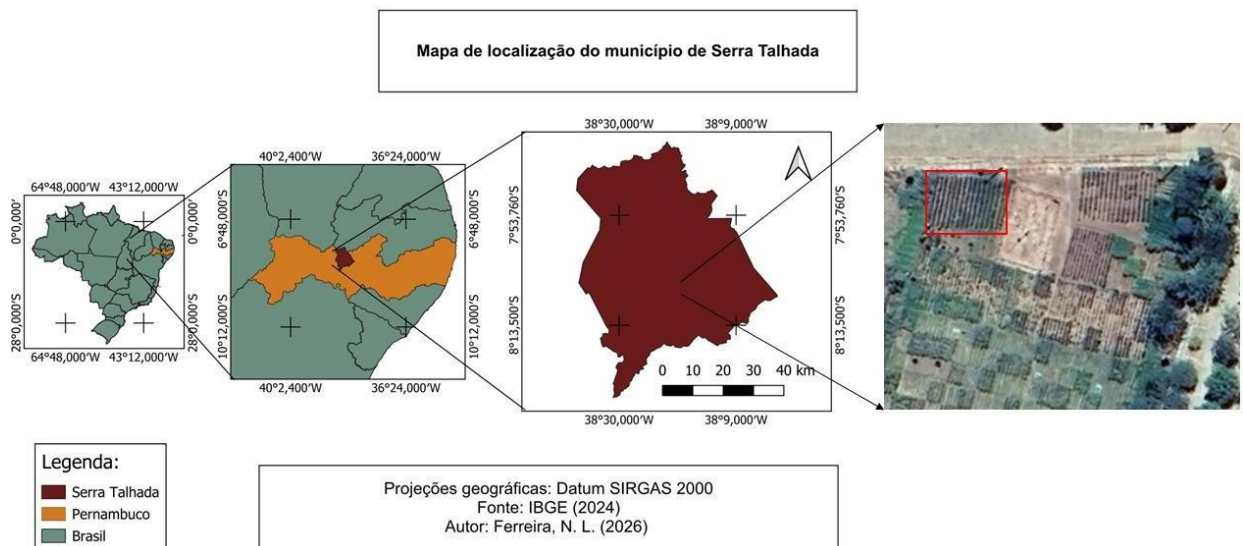


Figura 1. Mapa de localização da área experimental no município de Serra Talhada.

O experimento foi conduzido em área pertencente ao Centro de Referência Internacional de Estudos de Palma e Outras Plantas Forrageiras, da Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST), localizada no município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil (07°56'20" S, 38°17'31" O, 499 m de altitude).

A região está inserida no domínio morfoclimático da Caatinga, apresentando vegetação xerófila de pequeno porte, adaptada à escassez hídrica. O clima é classificado como BSw^h (semiárido quente), segundo Köppen, caracterizado por chuvas irregulares, concentradas entre janeiro e abril, com precipitação média anual de 642 mm, temperatura média mínima de 20,1 °C, máxima de 32,9 °C e umidade relativa do ar de aproximadamente 63%^{15,16}. O solo da área experimental foi classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico¹⁷, com textura média e boa drenagem natural.



2.2 MATERIAL VEGETAL, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E MANEJO DA ÁREA

A espécie estudada foi a palma forrageira clone Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.). O experimento foi conduzido em delineamento em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições. Os tratamentos consistiram em quatro doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha⁻¹), aplicadas em cobertura utilizando ureia (45% N) como fonte de nitrogênio e consorcio (feijão guandu e sorgo). A área experimental conteve quatro ciclos: os dois primeiros ciclos foram com consorcio de palma e guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) no período de 24 de maio de 2023 a 20 de fevereiro de 2024. Com colheitas (corte e rebrota) em 18 de setembro de 2023 e última colheita em 19 de fevereiro de 2024. Os dois últimos ciclos foram com consorcio de palma e sorgo (Híbrido 1011 ponta negra), que foi conduzido entre 21 de fevereiro a 19 de novembro de 2024. Suas colheitas (corte e rebrota) foram realizadas no período de 21 de agosto e 23 de outubro de 2024. A adubação nitrogenada foi aplicada na forma de ureia no início de cada ciclo; após a conclusão de todos os ciclos, realizou-se a coleta do material vegetal da palma para obtenção da mucilagem.

O manejo da irrigação foi realizado três vezes por semana por meio de sistema de gotejamento superficial, com gotejadores espaçados a cada 20 cm, vazão de 1,85 L h⁻¹ e pressão de serviço de 1 atm, apresentando coeficiente de uniformidade de 90%. A água de irrigação foi proveniente de poço artesiano, com condutividade elétrica média de 1,62 dS m⁻¹ e pH de 6,84, classificada como C3 – alta salinidade. A lâmina aplicada foi calculada com base em 100% da evapotranspiração de referência (ET_o), estimada pela equação de Penman-Monteith, conforme metodologia preconizada pela FAO¹⁸.



2.3 EXTRAÇÃO E PREPARO DA MUCILAGEM

A extração da mucilagem foi realizada utilizando cladódios de segunda ordem, colhidos às 6 h da manhã, período em que há maior estabilidade fisiológica do tecido vegetal. Os cladódios foram lavados em água corrente, enxutos e pesados. A mucilagem foi obtida segundo Andrada et al.,¹⁹ com modificações adaptadas às condições experimentais. Inicialmente, a epiderme dos cladódios foi cuidadosamente removida, e o parênquima interno foi fatiado e homogeneizado em processador de alimentos por 60 s com álcool etílico anidro (99,3%), a fim de promover a precipitação e a separação de pigmentos e compostos insolúveis. O extrato foi então filtrado em tecido de polipropileno e novamente lavado com álcool etílico anidro (99,3%) até a obtenção de um material esbranquiçado, livre de pigmentos clorofilados¹⁹. O filtrado obtido foi submetido à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 55 °C durante 24 h. Após a secagem, o material foi triturado em moinho de facas até a formação de um pó fino, acondicionado em recipientes herméticos sob atmosfera seca, constituindo a mucilagem em pó utilizada nas etapas subsequentes.

2.4 AVALIAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS DA MUCILAGEM

2.4.1 Teor de sódio (Na^+), potássio (K^+), rendimento da mucilagem (RM) e acidez total titulável (ATT)

Os teores de Na^+ e K^+ foram obtidos conforme metodologia descrita por Astello-García et al.,²⁰ que se baseia na técnica de fotometria de emissão de chamas com o uso do fotômetro de chamas modelo (MICRONAL B462). Foi utilizada uma alíquota de 5.000 μL , composta por 4.900 μL de água deionizada e 100 μL da amostra de mucilagem. As concentrações foram determinadas com base na curva padrão previamente estabelecida, e os resultados expressos em $\text{mg } 100 \text{ g}^{-1} \text{ MS}$.

O RM, foi calculado com base no peso da mucilagem seca dividida pelo peso fresco do cladódio inteiro, e expresso em porcentagem, de acordo com a Equação 1:



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



$$RM = \frac{\text{Massa de mucilagem em pó (g)}}{\text{Massa do cladódio fresco (g)}} \times 100 \quad (1)$$

A determinação da ATT foi realizada segundo Andrade Viera et al.,²¹, com adaptações, utilizando solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 N. Os resultados foram calculados de acordo com a Equação 2 e expressos em % de ácido cítrico.

$$ATT = \frac{N \times V \times \text{Eq ácido cítrico}}{v} \quad (2)$$

Em que AT = acidez total titulável, (% de ácido cítrico); N = concentração de NaOH; V = volume de NaOH usado na titulação, (mL); Eq = equivalente gramas de ácido cítrico (64,02); v = volume da amostra utilizada (mL).

2.4.2 Sólidos solúveis totais (SST), potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica (CE)

As medições de SST foram feitas com utilização de um refratômetro digital de bancada (Instrutherm, RTD-95, São Paulo, Brasil). Para a leitura, foi utilizado 1 mL de mucilagem hidratada, e os resultados foram expressos em °Brix.

Para aferição do pH foi utilizado um pHmetro (TECNAL, modelo TEC-5, Piracicaba, Brasil).

A CE foi medida com uso de um condutivímetro (TECNAL, modelo Tec-4MP, Piracicaba, Brasil), a amostra da mucilagem hidratada foi colocada em um béquer, e imerso o eletrodo para fazer as leituras. Os resultados foram expressos em mS cm⁻¹.

2.4.3 Capacidade de retenção água (CRA) e de óleo (CRO)

A CRA foi determinada conforme descrito por Souza et al.,²² com adaptações. Para determinar a CRA, amostras de 0.03 g de mucilagem foram adicionadas a 1.5 mL de água destilada, em micro tubos de centrífuga de 2 mL, mantidas por 1 h em temperatura ambiente e agitadas por



5 s a cada 15 min. Em seguida, foram centrifugados a 5.000 rpm por 20 min. O sobrenadante foi descartado e a água restante do sobrenadante foi drenada por 3:30 h min⁻¹. A CRA foi calculada e expressa como a quantidade em g de água retida por g da mucilagem seca (g.g⁻¹).

Para a determinação da CRO, amostras de 0.1 g foram adicionadas a 10 mL de óleo de soja, em tubos Falcon de 50 mL e agitadas a 200 rpm, em incubadora (TECNAL, modelo TE-420), por 5 h. A mistura foi centrifugada a 5.000 rpm por 15 min, o sobrenadante foi descartado e o precipitado foi drenado. A CRO foi calculada e os resultados expressos em gramas de óleo adsorvido por grama de mucilagem (g.g⁻¹), de acordo com a Equação 3:

$$CRA = CRO = \frac{\text{Peso da mucilagem após drenagem (g)}}{\text{Peso da mucilagem seca (g)}} \quad (3)$$

2.4.4 Proteínas solúveis totais (PST) e compostos fenólicos totais (CFT)

O conteúdo de PST foi determinado conforme o método descrito por Bradford e Zimmermann et al.,^{23,24}. Para o extrato foram utilizados 2 mL de mucilagem hidratada (4 g de mucilagem e 100 mL de água destilada) que foram centrifugados a 10.000 rpm por 21 minutos a 4 °C.

O ensaio de proteína foi feito adicionando-se 100 µL de extrato em meio de reação contendo 1 mL de solução de Bradford, sendo homogeneizado. Após 15 minutos, as leituras foram feitas em espectrofotômetro (Biochrom, Libra S8, Cambridge, Inglaterra) com absorbância a 595 nm, e o conteúdo de proteína foi estimado de acordo com curva padrão elaborada com albumina do soro bovino (BSA), sendo determinada em mg proteína 100.g⁻¹ de matéria fresca (MF).

A determinação dos CFT foi realizada segundo a metodologia descrita por Jaramillo-Flores et al.,²⁵ com adaptações. A extração foi efetuada utilizando-se 2 mL da mucilagem hidratada (4 g de mucilagem e 100 mL de água), que posteriormente foi centrifugada a 10.000 rpm, a 4 °C, por 21 minutos.



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



Para o ensaio de CFT, foram utilizados 150 μL da alíquota e adicionado ao meio de reação contendo 250 μL do reagente Folin–Ciocalteu (1 N) e 600 μL de água deionizada. A mistura foi mantida em repouso por 2 minutos, sendo então adicionado 500 μL de solução de carbonato de sódio a 20% (p/v). Após um novo período de repouso de 10 minutos, as leituras de absorbância foram realizadas em espectrofotômetro (Biochrom, Libra S8, Cambridge, Inglaterra) a 757 nm.

A quantificação foi efetuada com base em uma curva padrão de ácido gálico, expressando os resultados em mg ácido gálico $100.\text{g}^{-1}$ de MF.

2.4.5 Carboidratos solúveis totais (CST) e Vitamina C

A determinação do teor de CST foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Souza et al.,²⁶. A mucilagem hidratada (0.08 g e 2 mL de água) foi centrifugada (Hettich, MIKRO 220, Berlim, Alemanha) a 10.000 rpm por 21 minutos a 4 °C. A alíquota de 5 μL do extrato bruto da amostra foi adicionada a 495 μL de água deionizada, 500 μL de fenol a 5% e 2.500 μL de ácido sulfúrico 98,08%, em tubos de ensaio que foram agitados. Em seguida, os tubos foram deixados em repouso por 10 min em uma bandeja contendo água à temperatura ambiente. Posteriormente, as leituras foram feitas em espectrofotômetro (Modelo Libra S8, Biochrom, Cambridge, Reino Unido) a 490 nm. O branco foi constituído de 500 μL de água deionizada, 500 μL de fenol 5% e 2.500 μL de ácido sulfúrico 98,08%. Os resultados foram expressos em mg $100.\text{g}^{-1}$ de MF e quantificados com base na equação obtida para a curva padrão.

A medição do conteúdo de ácido ascórbico foi determinada conforme o método proposto por Sanchez-Rangel et al.,²⁷, com adaptações. A mucilagem hidratada (0.08 g e 2 mL de água) foi centrifugada (Hettich, MIKRO 220, Berlim, Alemanha) a 10.000 rpm por 21 minutos a 4 °C. No ensaio, foram utilizados a alíquota 100 μL de sobrenadante, 400 μL de água deionizada e 500 μL do reagente Folin-Ciocalteu (1 N). A mistura foi homogeneizada em vórtice (TECNAL, AP56) e permaneceu em repouso por 2 min. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro (Biochrom, Libra S8, Cambridge, Inglaterra) a 765 nm. A concentração total de ácido ascórbico (AA) foi expressa com base na curva padrão em mg AA $100.\text{g}^{-1}$ MF.



2.5 PRODUÇÃO DOS FILMES BIOPOLIMÉRICOS

Os filmes foram produzidos conforme a metodologia de Andrada et al.,¹⁹, com ajustes na proporção de componentes. A mucilagem seca foi dissolvida em água destilada na proporção de 4% (p/v) (4 g para 150 mL de água), sob agitação contínua e aquecimento a 60 °C até completa solubilização. Posteriormente, adicionou-se glicerol 3,5% (v/p) como agente plastificante, garantindo maior flexibilidade à matriz polimérica. A solução homogênea foi mantida sob agitação por 10 min e, em seguida, 20 mL da mistura foram vertidos em placas de Petri de 9 cm de diâmetro e 1,5 cm de profundidade. As placas de acrílico foram levadas à estufa de circulação de ar a 45 °C por 5 h para secagem e formação dos filmes biopoliméricos. Após completa desidratação, os filmes foram cuidadosamente removidos e armazenados em dessecadores sob controle de umidade até as análises físico-químicas.

2.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS FILMES BIOPOLIMÉRIOS

2.6.1 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As análises espectrais na região do infravermelho médio foram realizadas em um espectrofotômetro de infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) (Frontier da Perkin Elmer®), utilizando o acessório universal de reflexão total atenuada (UATR). Os espectros foram obtidos na região de 4000-600 cm⁻¹, resolução 8 cm⁻¹ e 8 varreduras, e força 30 Newtons. Para o branco, utilizará o ar e as medidas foram realizadas diretamente no filme sob o cristal de diamante.



2.6.2 Espessura, Transparência e Cor dos Filmes

As medições de espessura do filme (mm) foram medidas com um paquímetro (calibrado de precisão). As medições foram feitas em dez posições diferentes de cada amostra⁹.

A medida de transparência foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Han; Floros²⁸. Os filmes foram cortados em forma retangular (3 x 1 cm) e colocados em cubeta de quartzo no espectrofotômetro UV-VIS, e o comprimento de onda obtido na região de 600 nm. A transparência dos filmes foi calculada por meio da Equação 4:

$$T = \frac{\log T}{X} \quad (4)$$

Em que, T é a transmitância (%), e X é a espessura do filme em mm.

A medida da cor foi realizada com uso de um colorímetro (COLOR ANALYZER, RGB-1002) em sistema RGB. Foi realizada uma medição em cada filme⁹. Os resultados foram convertidos para valores CIE (Commission International de l'Eclairage) L^* , a^* e b^* , utilizando o website público EasyRGB²⁹, o qual levou em consideração D65 como iluminante padrão (luz do dia) e observador = 2°. O parâmetro luminosidade foi obtido diretamente pelo colorímetro, sem necessidade de conversão.



2.6.3 Teor de Umidade (TU) e Solubilidade em Água (SA)

A determinação do TU foi realizada de acordo com Jouki et al.,³⁰ e expresso em porcentagem (%), os filmes foram cortados em proporção de 2 x 2 cm, pesados e colocados na estufa a 55 °C, até a obter de peso constante. O cálculo foi feito conforme Equação 5:

$$TU = \frac{\text{massa inicial (g)} - \text{massa final (g)}}{(\text{massa inicial (g)})} \times 100 \quad (5)$$

A SA foi avaliada com os filmes cortados em proporções de 2 x 2 cm e em seguida pesados e imersos em 50 mL de água destilada, sob agitação constante por 30 min. a 25 °C. Os pedaços de filmes restantes foram secos a 55 °C em estufa, até obtenção do peso constante³⁰. Os resultados expressos em porcentagem (%) foram calculados conforme a Equação 6:

$$SA = \frac{\text{massa inicial (g)} - \text{massa final (g)}}{(\text{massa inicial (g)})} \times 100 \quad (6)$$

2.6.4 Análise Termogravimétrica (TGA)

O teste termogravimétrico avalia a estabilidade térmica dos filmes através do TGA usando o equipamento TGA2 (Mettler Toledo). As amostras dos filmes foram analisadas sob atmosfera de nitrogênio com uma taxa de aquecimento de 10 °C min⁻¹ com temperatura de aquecimento de 30 a 600 °C em cada amostra, sob atmosfera de nitrogênio a 50mL.min-1.



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



2.7 ANÁLISES ESTATÍSTICA

Os experimentos em campo foram conduzidos em delineamento em bloco casualizados, com quatro repetições. Os dados foram submetidos aos testes de normalidade, análise de variância (ANOVA), regressão e teste de Tukey a 5% de probabilidade com o auxílio do software R x 64 3.4.0. Os gráficos foram elaborados utilizando o software Sigma Plot versão 15 (Systat Software Inc., 2020).



3. RESULTADOS

3.1 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA MUCILAGEM DE PALMA FORRAGEIRA

Os teores de sódio (Na^+), potássio (K^+), sólidos solúveis (SS), capacidade de retenção de água (CRA) e condutividade elétrica (CE) diminuíram com o aumento das doses de N (Tabela 1). Contudo, o rendimento agroindustrial do cladódio e do parênquima aumentaram à medida que as doses de N foram elevadas (Tabela 1). O teor de vitamina C aumentou progressivamente com o incremento das doses de N (Figura 2 D). Observou-se que a ATT, CRO e pH apresentaram efeitos quadrático ($p < 0,05$) com valores máximos próximos à dose de 150 kg N ha^{-1} , reduzindo-se nas doses superiores (Tabela 1). Os conteúdos de CFT e CST aumentaram até 300 kg N ha^{-1} , enquanto a PST reduziu após esse ponto (Figura 2A, B e C).



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



Tabela 1: Propriedades físico-químicas da mucilagem de cladódios de palma (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação de nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha⁻¹).

Quantificação	Dose de nitrogênio (kg N ha ⁻¹)				Equação
	0	150	300	450	
Na ⁺	0,33 ± 0,05	0,32 ± 0,03	0,30 ± 0,03	0,29 ± 0,03	Na ⁺ =2.498451e-07x ² +0.0001813875x-0.3393146
K ⁺	0,19 ± 0,01	0,15 ± 0,01	0,16 ± 0,01	0,11 ± 0,01	K ⁺ =9.856392e-08x ² - 0.0001034921x - 0.1907212
RC	0,46 ± 0,02	0,53 ± 0,02	0,57 ± 0,03	0,60 ± 0,01	RC= 4.665716e - 07x ² - 0.0005169112x + 0.46367
RP	1,16 ± 0,07	1,34 ± 0,03	1,13 ± 0,05	1,49 ± 0,06	RP =1.909086e-06x ² + 0.0003306357x - 1.208821
ATT	0,91 ± 0,13	1,53 ± 0,25	1,28 ± 0,15	1,08 ± 0,21	ATT=9.11487e-06x ² - 0.004265584x + 0.9648526
SS	0,64 ± 0,18	0,36 ± 0,08	0,36 ± 0,16	0,50 ± 0,07	SS = 4.666667e - 06x ² - 0.00238x + 0.633
pH	4,97 ± 0,02	5,21 ± 0,02	5,21 ± 0,02	5,12 ± 0,01	pH = 3.844444e - 06x ² - 0.002024667x + 4.9757
CRA	15,02 ± 0,28	14,46 ± 0,43	12,02 ± 0,42	13,53 ± 0,39	CRA = 2.16963e - 05x ² + 0.01431133x - 15.2953
CRO	7,24 ± 1,55	10,57± 1,04	12,24 ± 1,42	11,50 ± 1,98	CRO= 4.523333e - 05x ² + 0.02997567x - 7.20385
CE	1925,0 ± 88,88	1797,2 ± 133,4	1655 ± 152,2	1765,2 ± 202,2	CE = 0,002644444x ² + 1.6044x - 1938.34

Os resultados foram expressos em média ± desvio padrão e equação. Na⁺: Teor de sódio (g.100g⁻¹ MS), K⁺: Teor de potássio (g.100g⁻¹ MS), RC: Rendimento do cladódio (%), RP: rendimento do parênquima (%), ATT: Acidez total titulável (% de ácido málico), SS: sólidos solúveis totais (°BRIX), pH, CRA: capacidade de retenção de água e óleo (CRO) (g água por g mucilagem) e CE: condutividade elétrica (mS cm⁻¹)

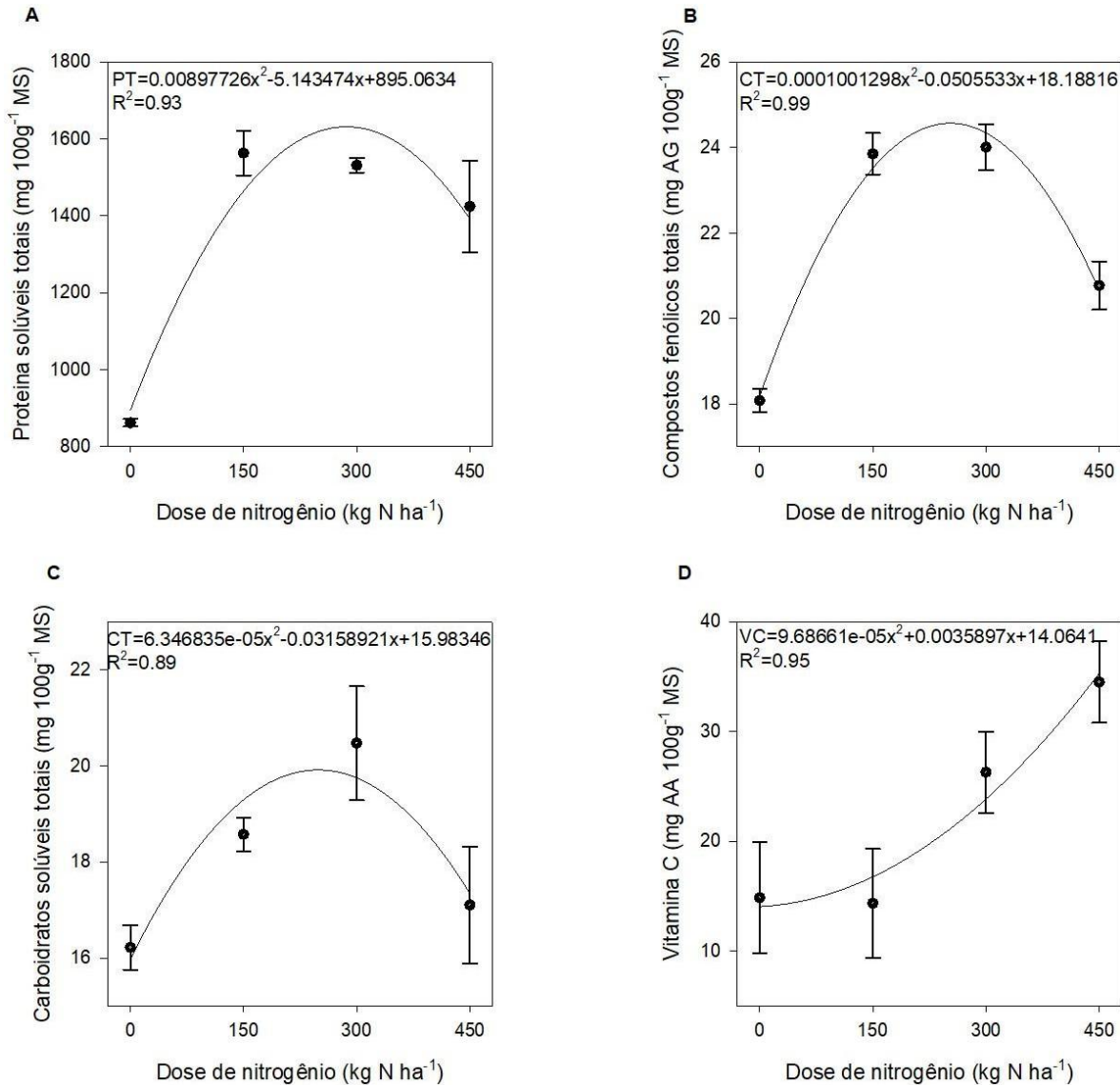


Figura 2: Proteínas solúveis totais (mg 100 g⁻¹ MS) (A), Compostos fenólicos totais (mg AG 100 g⁻¹ MS) (B), Carboidratos solúveis totais (mg 100 g⁻¹ MS) (C) e Vitamina C (mg AA 100 g⁻¹ MS) (D) de mucilagem de cladódios de palma (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha⁻¹).



3.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E ÓPTICAS DOS FILMES BIOPOLIMÉRICOS

Os filmes elaborados apresentaram estruturas afiladas, superfície áspera, pouco flexível e pouca elasticidade (Figura 3). O filme com a mucilagem oriundo da dose 300 (kg N ha⁻¹) (Figura 3C) apresentou uma matriz mais homogênea e com um tom de cor mais esbranquiçado, tornando mais compatível para indústria de filmes biopoliméricos, se diferenciando dos demais que apresentaram uma matriz menos uniforme (Figura 3A, B e C).

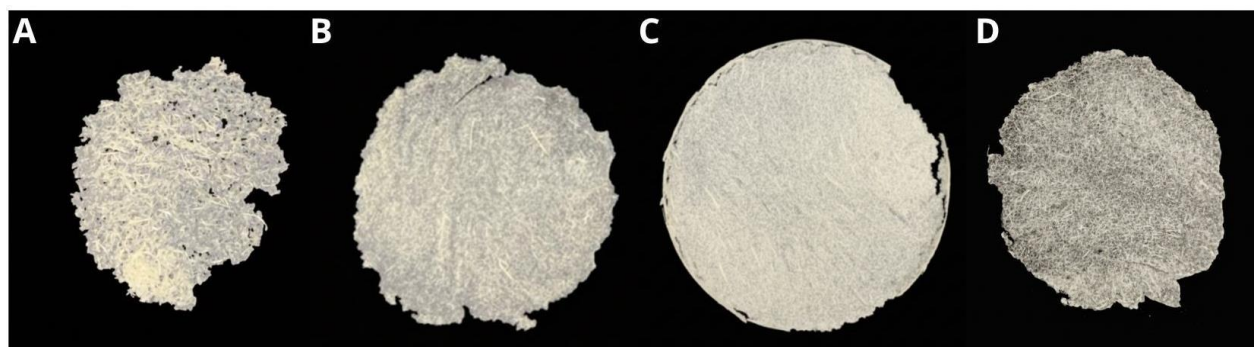


Figura 3: Filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de palma (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação de nitrogenada 0 (A), 150 (B), 300 (C) e 450 (D) (kg N ha⁻¹).

Os filmes das doses 0 e 450 (kg N ha⁻¹) apresentaram espessuras semelhantes, já os filmes provenientes das doses 150 e 300 kg N ha⁻¹ mostram-se um pouco mais espessos (Tabela 2). A dose 0 (kg N ha⁻¹) apresentou a maior transparência, por outro lado o filme da dose 300 (kg N ha⁻¹) foi menos transparente (Tabela 2). Com relação a luminosidade, foi maior para dose 300 (kg N ha⁻¹) formando filme mais escuro, e a dose controle 0 (kg N ha⁻¹) obteve a menor luminosidade (Tabela 2).



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



Tabela 2: Espessura, transparência e cor dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de palma (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha⁻¹).

Quantificação	Dose de nitrogênio (kg N ha ⁻¹)				Equação
	0	150	300	450	
Espessura	0,24 ± 0,00	0,26± 0,01	0,27± 0,01	0,24± 0,01	$E=4.705556e-07x^2-0.00021565x+0.245275$
Transparência	7,32± 0,18	6,45± 0,28	5,99 ± 0,19	6,37 ± 0,23	$T = 1.387146e-05x^2 + 0.00845347x - 7.343668$
<i>L</i>	77,82 ± 2,22	80,61± 0,81	83,89± 1,39	81,92± 1,02	$L = 5.28999e - 05x^2 - 0.03419341x + 77.53793$
<i>a</i> *	-0,45 ± 0,46	-0,45± 0,55	-0,50± 0,23	-0,71± 0,40	$a^* = -2.358927e-06x^2 - 0.0005051912x + 0.4607157$
<i>b</i> *	9,30± 1,59	9,34± 1,50	9,29 ± 0,41	7,89 ± 0,66	$b^* = 1.597961e-05x^2 - 0.004330267x + 9.24628$
Cor					

Os resultados foram expressos em média ± desvio padrão e equação. Espessura (mm), Transparência (% mm⁻¹), colorimetria e cor dos filmes biopoliméricos.

Os espectros FTIR da mucilagem e dos filmes mostraram bandas semelhantes às já descritas para polissacarídeos de *Opuntia* spp., indicando preservação dos grupos funcionais após o processamento (Figura 4A e B). As bandas dos grupos funcionais da mucilagem, obtiveram respostas mais intensas na dose de N 0 e 450 (kg N ha⁻¹) (Figura 4A). Os filmes biopoliméricos mostraram ondas mais intensas nas doses de N 150 e 450 (kg N ha⁻¹) (Figura 4B). As bandas amplas em 3349 – 3200 cm⁻¹ indicam vibrações de O–H característica de cadeias de polissacarídeos (Figura 4 A e B). As bandas 2932 e 2923 cm⁻¹ estão relacionadas as vibrações assimétricas da ligação CH ou CH₂. O pico de absorção 1640 – 1580 cm⁻¹ mostra grupo carboxílicos C=O. Os sinais em 1517 cm⁻¹ estão associados ao grupo carboxilato (COO⁻), sugerindo uma possível conservação da capacidade de ligações hidrogênio entre polímeros. As bandas 1407, 1367 e 1149 cm⁻¹, correspondem a ligações C-H ou O-H. O pico 1002 cm⁻¹, que é específico para



ligações C-O-C ou C-O-H. Esse perfil espectral confirma que a formação dos filmes ocorreu sem degradação estrutural significativa da mucilagem, reforçando sua viabilidade como biopolímero.

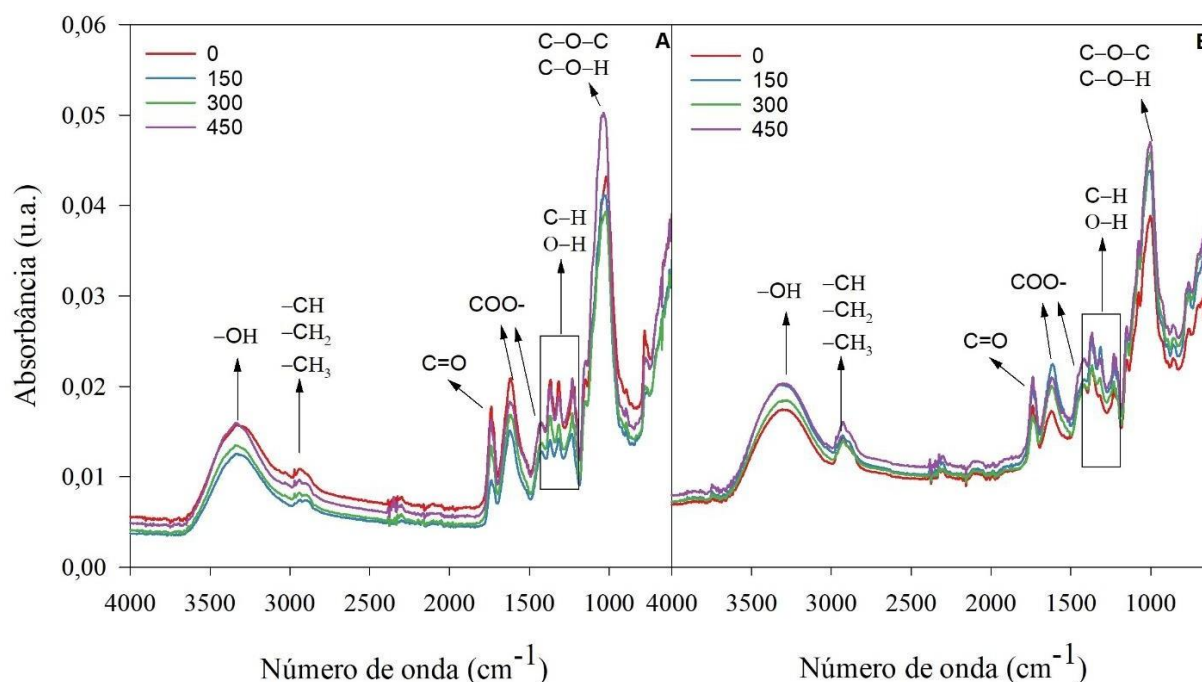


Figura 4: Espectros de infravermelho (FTIR) da mucilagem (A) e dos filmes biopoliméricos (B) oriundos de mucilagem de palma (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha⁻¹).

A solubilidade em água (SA) foi maior à medida que as doses de adubação foram aumentando até chegar seu ponto máximo na dose 300 (kg N ha⁻¹), e com o aumento da dose 450 (kg N ha⁻¹) o filme diminui sua solubilidade (Figura 5A). A dose 450 (kg N ha⁻¹) mostrou o menor TU, diferente das demais doses que apresentaram um aumento teor de umidade (TU) até atingir seu ponto máximo (300 kg N ha⁻¹) (Figura 5B).

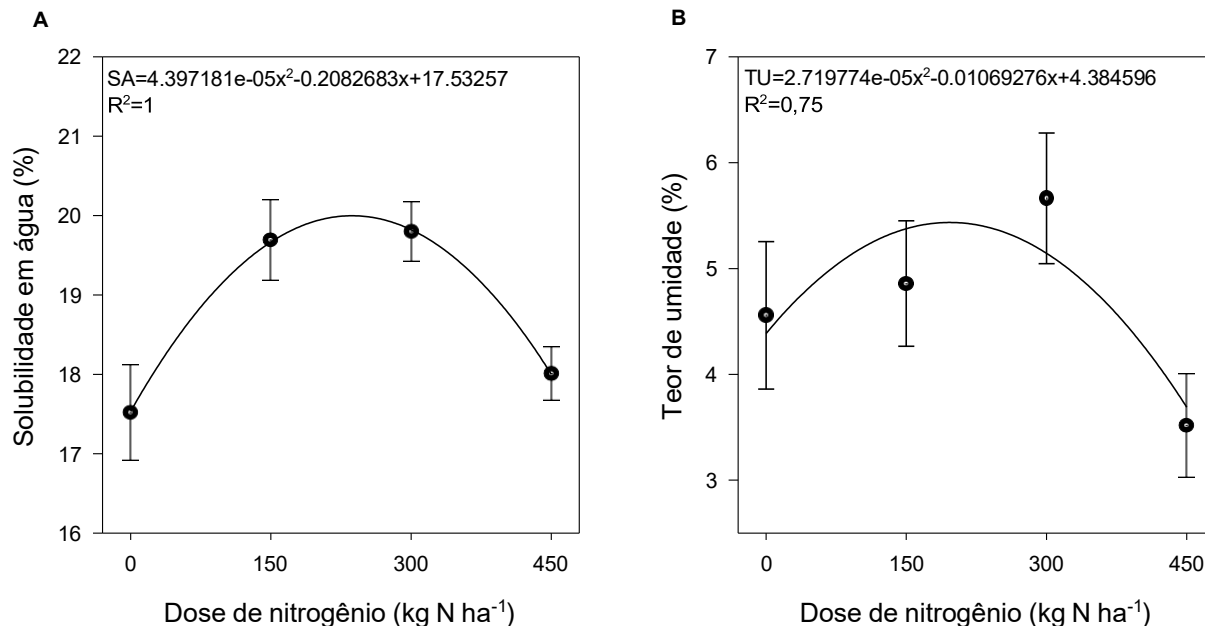


Figura 5: Solubilidade em água (%) (A) e teor de umidade (%) (B) dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de palma (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha⁻¹).

Foram observadas degradação térmicas e a massa residual dos filmes biopoliméricos de palma através das curvas de TGA das doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha⁻¹) (Figura 6A) e curvas de TGA derivadas (DTG) (Figura 6B). Que apresentaram três estágios de degradação ao longo da faixa de 30 a 600 °C, com temperaturas iniciais (T onset), máximas (T máx), finais (T endset) e a PM de cada estágio de degradação (Tabela 3). Observaram-se que as curvas de TGA e DTG apresentaram apenas três estágios de degradação. O estágio I atingiu pico máximo de degradação entre 50,1 e 51,8 °C, e perda de massa variando de 3,9 a 7,9 % entre as doses de N. No estágio II as T máx alteraram entre 302,4 e 329,8 °C, e perda de massa variando de 40,5 a 43,3 %. Em seguida o estágio III apresentou a perda de massa variando entre 3,3 e 4,7 % (Tabela 3).

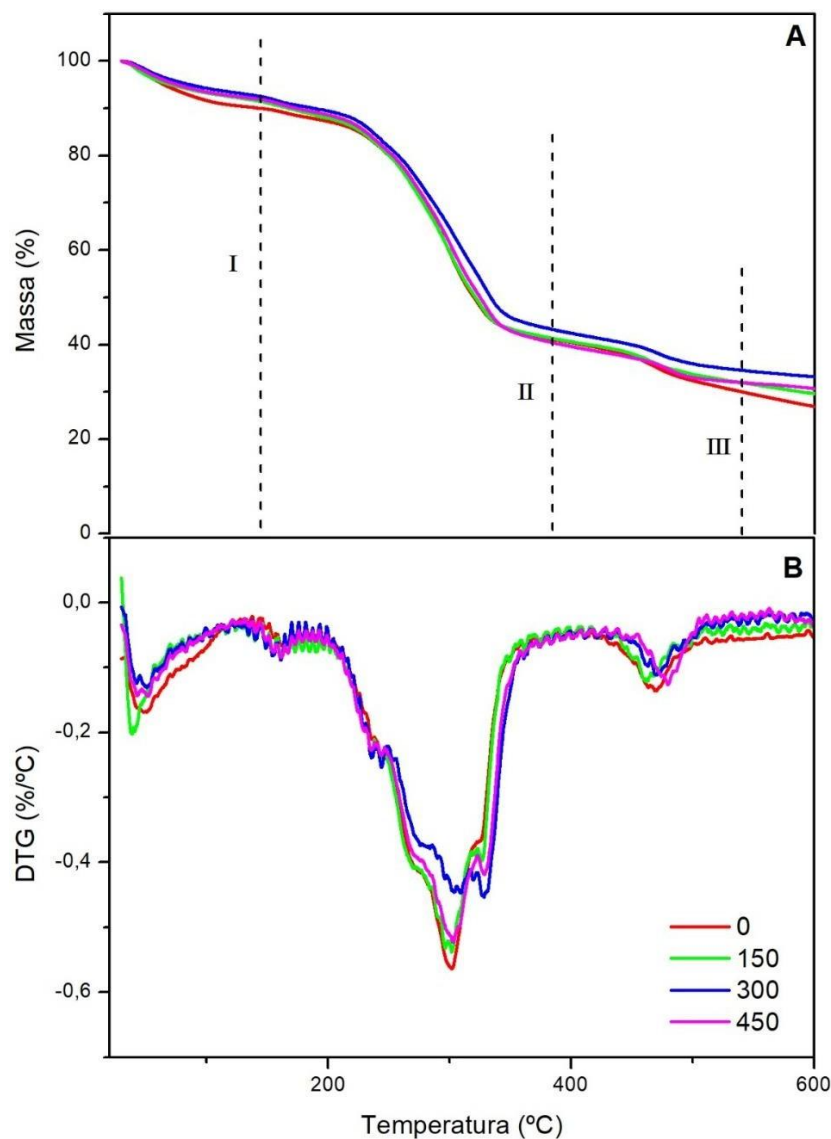


Figura 6: TGA (%) (A) e DTG (%/°C) (B) dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de palma (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha⁻¹).



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
 Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



Tabela 3: Parâmetros térmicos dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de palma (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.), submetida a diferentes doses de adubação nitrogenada (0, 150, 300 e 450 kg N ha⁻¹).

Estágio de degradação		DOSE			
		0	150	300	450
I	T onset	35,0	33,6	34,8	36,1
	T máx.	50,1	40,4	50,1	51,8
	T endset	90,6	54,4	65,9	64,3
	PM (%)	7,9	4,2	3,9	4,2
II	T onset	236,8	236,5	227,5	238,3
	T máx.	303,9	302,4	329,8	303,9
	T endset	326,6	334,2	341,0	335,2
	PM (%)	40,5	42,6	42,7	43,3
III	T onset	449,7	444,8	457,4	461,6
	T máx.	470,5	465,6	473,6	481,7
	T endset	480,3	479,0	485,3	490,1
	PM (%)	4,7	4,5	3,3	4,0

T onset: temperatura inicial (°C); T máx.: temperatura máxima (°C); T endset: temperatura final (°C) e PM: perda de massa (%).



4. DISCUSSÃO

A palma forrageira tem na sua composição a mucilagem que é um polímero natural complexo formado por polissacarídeos, suas propriedades físico-químicas podem ser modificadas por diversos fatores, como a espécie, horário de colheita, estações do ano e evapotranspiração da cultura^{5,31,32}. Mas ainda a necessidade e aprimoramento dos estudos com a utilização da biomassa da palma que apresentam um alto teor de polissacarídeos na sua estrutura, que permite a produção de filmes biopoliméricos e revestimentos biodegradáveis, associando com técnicas de adubação nitrogenada e consórcio para aprimorar suas propriedades físicas e estruturais.

A adubação nitrogenada é primordial para o crescimento das plantas, pois apresenta componentes de moléculas orgânicas essenciais, como proteínas, aminoácidos, enzimas, ácidos nucleicos e clorofilas responsáveis pela captação de luz durante a fotossíntese. O nitrogênio é o principal regulador do processo fotossintético, que influencia de modo direto na conversão de energia solar em energia química, sendo essencial para o desenvolvimento das plantas^{33,34}. A adubação associada ao consórcio com espécies adaptadas a seca como a palma forrageira, sorgo e guandu podem favorecer a eficiência no uso da água e aumenta a produção de biomassa³⁵. Esses fatores podem aprimorar a produção da mucilagem, contribuindo para produção de filmes biopoliméricos de metabolismo vegetal.

O teor de Na^+ se manteve constante e o teor de K^+ na mucilagem diminuiu com o incremento de N no solo, essa redução pode estar relacionada a diluição dos metabólitos (Tabela 1). A diminuição desses teores está atrelada a competição interespecíficas entre os elementos no solo e na planta, consequentemente a diminuição desses elementos nos teores foliares do tecido vegetal³⁶. Tais resultados mostraram valores abaixo dos encontrados por Garcia et al., e Pinheiro et al.,^{5,37} 0,67 g.100 g⁻¹ MS de Na^+ e 0,73 g.100 g⁻¹ MS de K^+ na mucilagem de palma forrageira, respectivamente. O rendimento (RM) em pó dos cladódios de *Opuntia stricta* (Haw.) Haw. indicaram que o incremento na adubação nitrogenada levou a um aumento significativo de $0,60 \pm 0,01\%$ com base no peso do cladódio (MF) (Tabela 1). Esse valor foi maior que os encontrados anteriormente por Pinheiro et al., $0,36 \pm 0,13\%$ e Garcia et al., $0,54 \pm 0,04\%$ ^{5,37}. A mucilagem pode



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



sofrer variações ambientais impactando diretamente o estado da planta e as substâncias que ela produz, essas alterações podem ser explicadas devido ao manejo utilizado e ao material vegetal (espécies, estresse hídrico, irrigação, adubação, estágio de desenvolvimento, hora e época de colheita)³⁸. Com isso, alguns estudos mostram que o uso de adubação nitrogenada associada ao consórcio, aumentam o rendimento da biomassa da palma forrageira com o uso eficiente desses manejos^{39,40}.

A acidez titulável (ATT) teve um aumento com o incremento das doses de N chegando ao seu ponto máximo com a dose 300 kg N ha⁻¹ (Tabela 1). A ATT é um dos parâmetros que influencia nas particularidades da mucilagem, quando seus valores são elevados podem interferir no desempenho como agente espessante, emulsificante ou na formação do biofilme^{34,41}. A mucilagem por ser um polieletrólito aniônico é rico em ácidos, tendo cargas negativas o que contribuem para acidez titulável⁴². Essa acidez reflete aos ácidos orgânicos livres e aos grupos de ácidos ligados a rede polissacarídica, devido a isso está ligado ao grau de ionização e a interação com íons⁴¹. Tanto a acidez como o pH, SS e a CE, são parâmetros importantes para formulação dos filmes biopoliméricos a base de mucilagem de palma forrageira⁴³. O pH no presente estudo apresentou valores variando entre 4,5 e 5,5, mostrando-se levemente ácido (Tabela 1). Na mucilagem pode haver variações do pH que influenciam diretamente na formação dos biofilmes, estudos mostram que esses valores estão aproximadamente entre 5,0 e 7,0 que tendem a favorecer as propriedades mecânicas desejáveis, tais como maior resistência e espessura^{44,45}.

A condutividade elétrica (CE) tendeu a diminuir com as maiores doses de N, pouco se sabe sobre a condutividade de mucilagem com adubação nitrogenada (Tabela 1). Porém, o uso de N pode aumentar a eficiência do sistema radicular na absorção de íons, esses elementos acumulam-se nos cladódios, e consequentemente na mucilagem^{34,46}. Além disso, a CE é um dos indicadores diretos da concentração de íons na mucilagem, a elevação dessas concentrações pode modificar as cadeias poliméricas, influenciando diretamente na diminuição da viscosidade da mucilagem^{47,48}. A CRA e a CRO da mucilagem de orelha de elefante mexicana (OEM), mostrou resultado maiores para a CRA enquanto a CRO foi menor. A literatura relata que a mucilagem apresenta mais afinidade com água, o que explica sua menor relação com CRO⁴⁹. A mucilagem de OEM apresenta



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



uma predominância de carboidratos na sua composição que faz com que haja uma forte interação com a água⁵⁰. Isso se deve ao fato de que a mucilagem por ser um polissacarídeo está associada aos grupos hidrofílicos com hidroxila (-OH) e carboxila (-COOH), que formam ligações de átomos de hidrogênio com moléculas de água⁵¹. Nkoi et al.,⁵², apresentou resultados inferiores de CRA e CRO para *Opuntia ficus-indica* com diferentes doses de adubação nitrogenada, apresentando valores de 0,1808 g.g⁻¹ CRA e 1,383 g.g⁻¹ CRO, essa mudança talvez seja pelo diferente modo de extração e pelas doses de N serem menores (0, 60, 120 e 240 kg N ha⁻¹).

O aumento da adubação nitrogenada em palma OEM, favorece o aumento no teor de proteína solúveis totais (PST), devido ter relação direta do N com a enzima nitrato redutase e a síntese de aminoácidos. O N é o elemento chave da estrutura para construção das proteínas, sendo essencial para estimulação de crescimento celular e para funções metabólicas das plantas⁵³. O teor de compostos fenólicos totais CFT no pó de OEM, atingiu seu maior valor até a dose 300 kg N ha⁻¹, e a vitamina C aumentou com o incremento das doses de N (Figura 1). A elevação nos níveis de N e a competição por nutriente devido ao consorcio, pode estar associada a um sistema de defesa da planta influenciado por fatores bióticos e abióticos⁴⁵. Por serem metabólitos secundários os CFT são amplamente encontrados em diversas partes das plantas devido ser composto por um anel aromático ligado a uma ou mais hidroxila, tornando-se forte em atividade antioxidante⁵⁴. A planta quando exposta ao estresse acumula metabólitos secundários como método fisiológico para evitar danos por radicais livres⁵. Para aplicação na indústria alimentícia os teores elevados de CFT e vitamina C são favoráveis devido sua capacidade antioxidante^{55,56}. Concentrações elevadas de CFT para formulação dos filmes biopoliméricos, no entanto, não são ideais, pois esses compostos reagem com os polissacarídeos reduzindo a elaboração dos filmes, expandindo as barreiras de água⁵⁷.

Os valores de carboidratos (CST) tenderam a aumentar com a elevação dos níveis de adubação nitrogenada (Figura 1). O N é um nutriente que atua na biossíntese de aminoácidos, proteínas e outros compostos nitrogenados, favorecendo o desenvolvimento da planta e sua fotossíntese⁵⁸. Além da adubação, as plantas foram consorciadas com leguminosas e gramíneas, que melhoram as atividades enzimáticas no solo, aumentando a mineralização de N favorecendo o



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



uso de carboidratos nas plantas com a melhoria do estado nutricional⁵⁹. Neste estudo o maior valor de carboidratos encontrado foi de 20,47 mg 100 g⁻¹ MS, esse valor foi inferior ao encontrado por Pinheiro et al.,⁵ de 35,89 mg 100 g⁻¹ MS, esses valores dependem muito do tipo de manejo, época de colheita e outros fatores. Além disso, o excesso de N pode reduzir a fixação de N pelas leguminosas, possibilitando a redução de carboidratos devido a diluição dos metabólitos^{60,61}.

Foram observadas as características dos filmes produzidos da mucilagem de OEM, e observou-se que a dose de N 300 kg N ha⁻¹ (Tabela 2) apresentou os parâmetros de cor com maior luminosidade L^* e com um dos valores menores para b^* (amarelo/azul), indicando ser um filme mais claro e menos amarelo, e mostrou-se ser um filme menos transparente. Filmes com menor transparência restringe mais a incidência de luz, sendo ideal para aplicações de embalagens de produtos sensíveis a oxidação, proporcionando mais vida útil para o alimento^{5,62}. Filmes mais transparente tem suas cadeias poliméricas mais cristalinas⁶³. Além disso, esse filme apresentou uma maior espessura, sendo um dos parâmetros que determina a propriedade física como resistência mecânica dos filmes, e com o aumento da espessura o filme se torna menos transparente⁶⁴.

O espectro de infravermelho apresenta bandas vibracionais características de cada composto químico, uma vez que existe um padrão de absorção de luz do infravermelho. Esses compostos apresentam diferentes frequências de absorção que correspondem as vibrações das ligações químicas presentes nas moléculas do material⁶⁵. As bandas dos grupos funcionais da mucilagem, as respostas mais intensas foram nas doses de nitrogênio 0 e 450 (kg N ha⁻¹) (Figura 3A) os filmes biopoliméricos apresentaram ondas mais intensas nas doses de N de 150 e 450 (kg N ha⁻¹) (Figura 3B), mostrando-se semelhantes aos resultados de trabalhos anteriores^{5,32,34}. As bandas 3349 e 3245 cm⁻¹ correspondem as vibrações de estiramento assimétrico dos grupos dos álcoois e ácidos carboxílicos -OH, devido as bandas largas de ligação de hidrogênio, proveniente de arranjo polimérico à base de açúcar^{1,66}. As bandas 2932 e 2923 cm⁻¹ estão relacionadas as vibrações assimétricas da ligação CH ou CH₂, que estão relacionados a cadeia alifática da mucilagem e dos filmes⁶⁷. O pico de absorção 1720 cm⁻¹ mostra a baixa intensidade de vibração do grupo carboxílicos C=O⁶⁸. O surgimento de picos 1619 cm⁻¹ é um indicativo de amida I⁶⁹. Um



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



conjunto de bandas 1407, 1367 e 1149 cm^{-1} , correspondem a ligações C-H ou O-H, um intenso pico pode ser observado em 1002 cm^{-1} , que é específico para ligações C-O-C ou C-O-H implica na presença de anéis de piranose de monossacarídeos em carboidratos⁷⁰.

A SA é um dos fatores importantes para formação dos filmes poliméricos, isso deve ao fato da mucilagem ser um material hidrofílico que apresenta boa solubilidade a água, sendo bastante vantajoso para dispensar solutos e obter filmes homogêneos³². Para aplicação em embalagens de alimentos, a necessidade de que se tenha uma menor solubilidade em água, aumentando a integridade do produto e sua resistência a água⁷¹. Os resultados encontrados nesse estudo (Figura 4A) mostram valores bem inferiores aos encontrados por Silva et al., e Souza et al.,^{32,72} que encontraram valores de aproximadamente 60%. Assim como a SA o TU (Figura 4B) também apresentou valores inferiores aos achados por Pinheiro et al., e Saberi et al.,^{5,72}.

A estabilidade térmica é uma análise que estuda as propriedades dos materiais, que investiga os polímeros e prevê o comportamento térmico sob diferentes temperaturas para fabricação e comercialização⁷³. As curvas de TGA dos filmes de palma apresentaram três etapas de perda de massa, que ocorreram entre a faixa de temperatura de 30 °C a 600 °C, o primeiro estágio de degradação está associado a volatilização da umidade da amostra ou a moléculas de água aglutinadas na superfície do filme biopolimérico⁷⁴. Nesse estágio a dose 0 (kg N ha^{-1}) apresentou maior perda de massa, indicando uma maior interação das moléculas de água aderidas a superfície da matriz polimérica e com fortes ligação de hidrogênio e números de menores de hidroxila livres, correlacionando a perda de massa retardada (Figura 5, Tabela 3)⁵. No estágio II, a dose 300 (kg N ha^{-1}) apresentou maior temperatura de degradação que ocorreu entre 146 °C e 385 °C, nessa etapa ocorre a mudança na composição do biopolímero, com a degradação do glicerol e proteínas, esse estágio apresentou as maiores perdas de massa (Figura 5, Tabela 3)^{73,75}. No terceiro estágio, ocorre a degradação oxidativa de resíduos de carbono e minerais presente nos filmes, nessa etapa ocorreu uma baixa perda de massa para todos os filmes biopoliméricos, sucedendo na não degradação da amostra completa⁷⁶. Os efeitos das doses de N e o consórcio, os filmes tenderam a diminuir o uso de glicerol, tornando-se menos solúvel em água. Portanto, faz-se necessário buscar novos métodos que busquem a diminuição do glicerol.



5. CONCLUSÕES

O estudo com o material vegetal residual de cladódios de Orelha de Elefante Mexicana submetidas a quatro ciclos de consórcio (leguminosa e gramínea) associada a adubação nitrogenada, indicaram que a mucilagem é viável para a produção de filmes biopoliméricos. A dose 300 kg N ha⁻¹ destacou-se das demais, com a mucilagem mostrando um dos maiores rendimentos, menor condutividade elétrica e capacidade de retenção de água, e com pH ligeiramente ácido. Além disso, seus valores foram maiores para carboidratos, compostos fenólicos e vitamina C. Os filmes com doses de N de 300 kg N ha⁻¹ apresentaram, também, um aspecto visualmente melhor, se sobressaindo-se dos demais, apresentando menor transparência, maior luminosidade, solubilidade, teor de umidade, com picos mais intensos de FTIR, e mostrou as menores perda de massa na estabilidade térmica. Embora o uso de adubação nitrogenada aumente o custo da produção, os filmes se mostram promissores para a indústria alimentícia e embalagens.



6. REFERÊNCIAS

- (1) Mannai, F.; Mechi, L.; Alimi, F.; Alsukaibi, A. K. D.; Belgacem, M. N.; Moussaoui, Y. Biodegradable Composite Films Based on Mucilage from *Opuntia Ficus-Indica* (Cactaceae): Microstructural, Functional and Thermal Properties. *Int. J. Biol. Macromol.* **2023**, *252*, 126456. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.126456>.
- (2) Atiwesh, G.; Mikhael, A.; Parrish, C. C.; Banoub, J.; Le, T. A. T. Environmental Impact of Bioplastic Use: A Review. *Heliyon* **2021**, *7* (9), e07918. <https://doi.org/10.1016/J.HELİYON.2021.E07918>.
- (3) Okoffo, E. D.; Donner, E.; McGrath, S. P.; Tschärke, B. J.; O'Brien, J. W.; O'Brien, S.; Ribeiro, F.; Burrows, S. D.; Toapanta, T.; Rauert, C.; Samanipour, S.; Mueller, J. F.; Thomas, K. V. Plastics in Biosolids from 1950 to 2016: A Function of Global Plastic Production and Consumption. *Water Res.* **2021**, *201*, 117367. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2021.117367>.
- (4) El-Sheekh, M. M.; Alwaleed, E. A.; Ibrahim, A.; Saber, H. Preparation and Characterization of Bioplastic Film from the Green Seaweed *Halimeda Opuntia*. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, *259* (P2), 129307. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129307>.
- (5) Pinheiro, J. C.; Silva, L. J. V.; Lopes, B. K. A.; Ferreira, N. L.; Fonseca, K. S.; de Brito, F. A. L.; da Silva, T. G. F.; Brito, A. M. S. S.; de Lima Silva, I. D.; Vinhas, G. M.; do Nascimento Simões, A. Effects of Cactus Pear Clone Harvest Seasons and Times on the Physicochemical and Technological Properties of Resulting Mucilage and Biopolymeric Films. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, *257*, 128374. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.128374>.
- (6) Nanda, S.; Patra, B. R.; Patel, R.; Bakos, J.; Dalai, A. K. Innovations in Applications and Prospects of Bioplastics and Biopolymers: A Review. *Environ. Chem. Lett.* **2022**, *20* (1), 379–395. <https://doi.org/10.1007/S10311-021-01334-4>.



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



- (7) Gheribi, R.; Habibi, Y.; Khwaldia, K. Prickly Pear Peels as a Valuable Resource of Added-Value Polysaccharide: Study of Structural, Functional and Film Forming Properties. *Int. J. Biol. Macromol.* **2019**, *126*, 238–245. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2018.12.228>.
- (8) Jardim, A. M. da R. F.; Morais, J. E. F. de; Souza, L. S. B. de; Marin, F. R.; Moura, M. S. B. de; Morellato, L. P. C.; Montenegro, A. A. de A.; Ometto, J. P. H. B.; de Lima, J. L. M. P.; Dubeux Júnior, J. C. B.; Silva, T. G. F. da. Sink or Carbon Source? How the Opuntia Cactus Agroecosystem Interacts in the Use of Carbon, Nutrients and Radiation in the Brazilian Semi-Arid Region. *J. Hydrol. (Amst)*. **2023**, *625* (September). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130121>.
- (9) Gheribi, R.; Puchot, L.; Verge, P.; Jaoued-Grayaa, N.; Mezni, M.; Habibi, Y.; Khwaldia, K. Development of Plasticized Edible Films from Opuntia Ficus-Indica Mucilage: A Comparative Study of Various Polyol Plasticizers. *Carbohydr. Polym.* **2018**, *190*, 204–211. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2018.02.085>.
- (10) Costa, S. A. T. da; Souza, L. S. B. de; Montenegro, A. A. de A.; Souza, C. A. A. de; Morais, J. E. F. de; Lopes, D. de C.; Steidle Neto, A. J.; Santos, J. P. A. de S.; Jardim, A. M. da R. F.; Alves, C. P.; Silva, M. V. da; Silva, T. G. F. da. Calibration and Validation of the AquaCrop Model for Forage Cactus Production Systems under Different Management Interventions in the Semi-Arid Region of Brazil. *Physics and Chemistry of the Earth* **2024**, *136* (August). <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103716>.
- (11) Jardim, A. M. da R. F.; Silva, T. G. F. da; Souza, L. S. B. de; Araújo Júnior, G. do N.; Alves, H. K. M. N.; Souza, M. de S.; Araújo, G. G. L. de; Moura, M. S. B. de. Intercropping Forage Cactus and Sorghum in a Semi-Arid Environment Improves Biological Efficiency and Competitive Ability through Interspecific Complementarity. *J. Arid Environ.* **2021**, *188*, 104464. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2021.104464>.
- (12) Santos, J. P. A. de S.; Oliveira, A. C. de; Morais, J. E. F. de; Jardim, A. M. da R. F.; Alves, C. P.; Araújo Júnior, G. do N.; Souza, C. A. A. de; Silva, M. J. da; Souza, L. F. de; Souza, L. S. B. de; Campos, F. S.; Simões, A. do N.; Queiroz, M. A. Á.; Montenegro, A. A. de A.; Silva, T. G. F. da. Morphophysiological Responses, Water, and Nutritional Performance of



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



- the Forage Cactus Submitted to Different Doses of Nitrogen. *Field Crops Res.* **2024**, 308 (February). <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109273>.
- (13) Jardim, A. M. da R. F.; Silva, T. G. F. da; Souza, L. S. B. de; Araújo Júnior, G. do N.; Alves, H. K. M. N.; Souza, M. de S.; Araújo, G. G. L. de; Moura, M. S. B. de. Intercropping Forage Cactus and Sorghum in a Semi-Arid Environment Improves Biological Efficiency and Competitive Ability through Interspecific Complementarity. *J. Arid Environ.* **2021**, 188, 104464. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2021.104464>.
- (14) de Andrada, L. V. P.; do Nascimento Souza, J. F.; de Sousa, L. D. C.; Brito, A. M. S. S.; de Lima Silva, I. D.; Vinhas, G. M.; da Silva, T. G. F.; Ferreira, N. L.; de Brito, F. A. L.; do Nascimento Simões, A. A New Protocol for Obtaining Mucilage and Biopolymeric Ecofilms From Cacti. *Packaging Technology and Science* **2024**, 37 (5), 365–377. <https://doi.org/10.1002/pts.2799>.
- (15) Silva, T. G. F. da; Primo, J. T. A.; de Mura, M. S. B.; Silva, S. M. S. e.; de Moraes, J. E. F.; de Caldas Pereira, P.; de Souza, C. A. A. Soil Water Dynamics and Evapotranspiration of Forage Cactus Clones under Rainfed Conditions. *Pesqui. Agropecu. Bras.* **2015**, 50 (7), 515–525. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000700001>.
- (16) Pereira, P. D. C.; Da Silva, T. G. F.; Zolnier, S.; De Moraes, J. E. F.; Dos Santos, D. C. MORFOGÊNESE DA PALMA FORRAGEIRA IRRIGADA POR GOTEJAMENTO. *Revista Caatinga* **2015**, 28 (3), 184–195. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015V28N321RC>.
- (17) Jardim, A. M. da R. F.; Santos, H. R. B.; Alves, H. K. M. N.; Ferreira-Silva, S. L.; Souza, L. S. B. de; Araújo Júnior, G. do N.; Souza, M. de S.; Araújo, G. G. L. de; Souza, C. A. A. de; Silva, T. G. F. da. Genotypic Differences Relative Photochemical Activity, Inorganic and Organic Solutes and Yield Performance in Clones of the Forage Cactus under Semi-Arid Environment. *Plant Physiology and Biochemistry* **2021**, 162, 421–430. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2021.03.011>.



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



- (18) Allen, R. G.; Pereira, L. S. *Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Requirements. FAO Irrig. Drain. Report Modeling and Application*; 1998. <https://www.researchgate.net/publication/290988983>.
- (19) Andrada, L. V. P.; do Nascimento Souza, J. F.; de Sousa, L. D. C.; Brito, A. M. S. S.; de Lima Silva, I. D.; Vinhas, G. M.; da Silva, T. G. F.; Ferreira, N. L.; de Brito, F. A. L.; do Nascimento Simões, A. A New Protocol for Obtaining Mucilage and Biopolymeric Ecofilms From Cacti. *Packaging Technology and Science* **2024**, 37 (5), 365–377. <https://doi.org/10.1002/pts.2799>.
- (20) Instituto Adolfo Lutz. 1ª Edição Digital. *Métodos físicos-químicos para análise de Alimentos* **2008**.
- (21) Astello-García, M. G.; Cervantes, I.; Nair, V.; Santos-Díaz, M. del S.; Reyes-Agüero, A.; Guéraud, F.; Negre-Salvayre, A.; Rossignol, M.; Cisneros-Zevallos, L.; Barba de la Rosa, A. P. Chemical Composition and Phenolic Compounds Profile of Cladodes from Opuntia Spp. Cultivars with Different Domestication Gradient. *Journal of Food Composition and Analysis* **2015**, 43, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.04.016>.
- (22) Souza, J. F. do N.; Andrada, L. V. P. de; Martins, L. D. C. de S.; Brito, A. M. S. S.; Silva, L. J. V.; Silva, I. D. de L.; Vinhas, G. M.; Silva, T. G. F. da; Simões, A. do N. Storage Potential of Cactus Mucilage Powder for Incorporation into Foods and Production of Biopolymeric Films. *ACS Omega* **2024**, 9 (43), 43624–43634. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05691>.
- (23) Bradford, M. M. Determinación de Proteínas: Método de Bradford. *Anal. Biochem.* **1976**.
- (24) Zimmermann, P.; Heinlein, C.; Orendi, G.; Zentgraf, U. Senescence-Specific Regulation of Catalases in Arabidopsis Thaliana (L.) Heynh. *Plant Cell Environ.* **2006**, 29 (6), 1049–1060. <https://doi.org/10.1111/J.1365-3040.2005.01459.X>.
- (25) Jaramillo-Flores, M. E.; González-Cruz, L.; Cornejo-Mazón, M.; Dorantes-álvarez, L.; Gutiérrez-López, G. F.; Hernández-Sánchez, H. Effect of Thermal Treatment on the Antioxidant Activity and Content of Carotenoids and Phenolic Compounds of Cactus Pear



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



- Cladodes (Opuntia Ficus-Indica). *Food Chem.* **2003**.
<https://doi.org/10.1177/108201303036093>.
- (26) Souza, J. F. do N.; Andrada, L. V. P. de; Martins, L. D. C. de S.; Brito, A. M. S. S.; Silva, L. J. V.; Silva, I. D. de L.; Vinhas, G. M.; Silva, T. G. F. da; Simões, A. do N. Storage Potential of Cactus Mucilage Powder for Incorporation into Foods and Production of Biopolymeric Films. *ACS Omega* **2024**. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05691>.
- (27) Sánchez-Rangel, J. C.; Benavides, J.; Heredia, J. B.; Cisneros-Zevallos, L.; Jacobo-Velázquez, D. A. The Folin–Ciocalteu Assay Revisited: Improvement of Its Specificity for Total Phenolic Content Determination. *Analytical Methods* **2013**, 5 (21), 5990–5999. <https://doi.org/10.1039/C3AY41125G>.
- (28) Han, J. H.; Floros, J. D. Casting Antimicrobial Packaging Films and Measuring Their Physical Properties and Antimicrobial Activity. *Journal of Plastic Film & Sheeting* **1997**, 13 (4), 287–298. <https://doi.org/10.1177/875608799701300405>.
- (29) de Alvarenga Pinto Cotrim, M.; Mottin, A. C.; Ayres, E. Preparation and Characterization of Okra Mucilage (*Abelmoschus Esculentus*) Edible Films. *Macromol. Symp.* **2016**, 367 (1), 90–100. <https://doi.org/10.1002/masy.201600019>.
- (30) Jouki, M.; Tabatabaei Yazdi, F.; Mortazavi, S. A.; Koocheki, A. Physical, Barrier and Antioxidant Properties of a Novel Plasticized Edible Film from Quince Seed Mucilage. *Int. J. Biol. Macromol.* **2013**, 62, 500–507. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2013.09.031>.
- (31) Du Toit, A.; De Wit, M.; Fouché, H. J.; Taljaard, M.; Venter, S. L.; Hugo, A. Mucilage Powder from Cactus Pears as Functional Ingredient: Influence of Cultivar and Harvest Month on the Physicochemical and Technological Properties. *J. Food Sci. Technol.* **2019**, 56 (5), 2404–2416. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03706-9>.
- (32) Silva, L. J. V.; Soares, A. L.; Pinheiro, J. C.; Lopes, B. K. A.; Ferreira, N. L.; de Andrada, L. V. P.; do Nascimento Souza, J. F.; de Brito, F. A. L.; de Araújo, L. G. C.; Pereira, J. F. Q.; Brito, A. M. S. S.; da Silva, T. G. F.; de Lima Silva, I. D.; Vinhas, G. M.; do Nascimento Simões, A. Excessive Availability of Water for Irrigation Results in Cactus Cladode Powder



- with Fewer Organic Biomolecules and Reduces the Quality of the Biopolymeric Film. *ACS Omega* **2025**, *10* (31), 34176–34189. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10894>.
- (33) Santos, J. P. A. de S.; Oliveira, A. C. de; Morais, J. E. F. de; Jardim, A. M. da R. F.; Alves, C. P.; Araújo Júnior, G. do N.; Souza, C. A. A. de; Silva, M. J. da; Souza, L. F. de; Souza, L. S. B. de; Campos, F. S.; Simões, A. do N.; Queiroz, M. A. Á.; Montenegro, A. A. de A.; Silva, T. G. F. da. Morphophysiological Responses, Water, and Nutritional Performance of the Forage Cactus Submitted to Different Doses of Nitrogen. *Field Crops Res.* **2024**, *308* (February). <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109273>.
- (34) Andrada, L. V. P. de; Brito, F. A. L. de; Soares, A. L.; Brito, A. M. S. S.; Silva, T. G. F. da; Silva, I. D. de L.; Vinhas, G. M.; Simões, A. do N. Nitrogen Fertilization Optimizes the Physicochemical Properties of Cactus Mucilage and the Biopolymeric Films Produced. *ACS Omega* **2026**. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c10740>.
- (35) Salvador, K. R. da S.; Jardim, A. M. da R. F.; Alves, C. P.; Araújo Júnior, G. do N.; Silva, M. J. da; Souza, L. F. de; Queiroz, M. A. Á.; Campos, F. S.; Gois, G. C.; França, J. G. E. de; Nunes Filho, J.; Steidle Neto, A. J.; Souza, L. S. B. de; Silva, T. G. F. da. Intercropping Impacts Growth in the Forage Cactus, but Complementarity Affords Greater Productivity, Competitive Ability, Biological Efficiency and Economic Return. *Agric. Syst.* **2024**, *218* (April). <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2024.103958>.
- (36) Henrique, J. C. G. S.; Carvalho, L. H. M.; Lisbôa, A. M. G.; Fonseca, G. R. F.; Andrada, L. V. P.; Santos, W. R.; Andrade, M. F.; Bezerra, R. C. A.; Cordeiro, L. R. B. A.; Leite, M. L. M. *Effects of Nitrogen Fertilization and Saline Water Irrigation on Biomass Production in Intercropped Forage Plants: A Review*; 2024. <https://orcid.org/0000-0003-1852-6169>.
- (37) García, A. L.; Pérez Zamora, C. M.; Michaluk, A. G.; Nuñez, M. B.; Gonzalez, A. M.; Torres, C. A. Physicochemical and Functional Characterization of the Mucilage Obtained from Cladodes of Two *Opuntia* Species. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, *283*, 137802. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.137802>.



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



- (38) Monrroy, M.; García, E.; Ríos, K.; García, J. R. Extraction and Physicochemical Characterization of Mucilage from *Opuntia Cochenillifera* (L.) Miller. *J. Chem.* **2017**, 2017 (1), 4301901. <https://doi.org/10.1155/2017/4301901>.
- (39) Dubeux, J. C. B.; dos Santos, M. V. F.; de Andrade Lira, M.; dos Santos, D. C.; Farias, I.; Lima, L. E.; Ferreira, R. L. C. Productivity of *Opuntia Ficus-Indica* (L.) Miller under Different N and P Fertilization and Plant Population in North-East Brazil. *J. Arid Environ.* **2006**, 67 (3), 357–372. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2006.02.015>.
- (40) da Silva, T. G. F.; de Medeiros, R. S.; Arraes, F. D. D.; Ramos, C. M. C.; Araújo Júnior, G. do N.; Jardim, A. M. da R. F.; Alves, C. P.; Campos, F. S.; da Silva, M. V.; de Moraes, J. E. F.; de Souza, C. A. A.; Siqueira e Silva, S. M.; dos Santos, D. C.; de Carvalho, A. A.; de Souza, L. S. B. Cactus–Sorghum Intercropping Combined with Management Interventions of Planting Density, Row Orientation and Nitrogen Fertilisation Can Optimise Water Use in Dry Regions. *Science of The Total Environment* **2023**, 895, 165102. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.165102>.
- (41) Medeiros, V. P. B. de; Oliveira, K. Á. R. de; Queiroga, T. S.; Souza, E. L. de. Development and Application of Mucilage and Bioactive Compounds from Cactaceae to Formulate Novel and Sustainable Edible Films and Coatings to Preserve Fruits and Vegetables—A Review. *Foods* **2024**, Vol. 13, Page 3613 **2024**, 13 (22), 3613. <https://doi.org/10.3390/FOODS13223613>.
- (42) Oliveira, F. R. de; Fonseca, K. S.; Ferraz Jardim, A. M. da R.; Souza, J. F. D. N.; Viégas, E. K. D.; Silva, A. R. da; Simões, A. D. N. Influence of Irrigation, Cladode Size, Harvest Time and Addition of Citric Acid on the Properties of Cactus Mucilage. *Pesqui. Agropecu. Trop.* **2022**, 52, e72559. <https://doi.org/10.1590/1983-40632022V5272559>.
- (43) Liguori, G.; Gaglio, R.; Greco, G.; Gentile, C.; Settanni, L.; Inglese, P. Effect of *Opuntia Ficus-Indica* Mucilage Edible Coating on Quality, Nutraceutical, and Sensorial Parameters of Minimally Processed Cactus Pear Fruits. *Agronomy* **2021**, 11 (10), 1963. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY11101963>.



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



- (44) Van Rooyen, B.; De Wit, M.; Osthoff, G.; Van Niekerk, J.; Hugo, A. Effect of PH on the Mechanical Properties of Single-Biopolymer Mucilage (Opuntia Ficus-Indica), Pectin and Alginate Films: Development and Mechanical Characterisation. *Polymers (Basel)*. **2023**, *15* (24), 4640. <https://doi.org/10.3390/POLYM15244640>.
- (45) Silva, L. J. V.; Soares, A. L.; Pinheiro, J. C.; Lopes, B. K. A.; Ferreira, N. L.; de Andrada, L. V. P.; do Nascimento Souza, J. F.; de Brito, F. A. L.; de Araújo, L. G. C.; Pereira, J. F. Q.; Brito, A. M. S. S.; da Silva, T. G. F.; de Lima Silva, I. D.; Vinhas, G. M.; do Nascimento Simões, A. Excessive Availability of Water for Irrigation Results in Cactus Cladode Powder with Fewer Organic Biomolecules and Reduces the Quality of the Biopolymeric Film. *ACS Omega* **2025**, *10* (31), 34176–34189. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.4C10894>.
- (46) Niechayev, N. A.; Pereira, P. N.; Cushman, J. C. The Nitrogen Preference of Cactus Pear (Opuntia Ficus-Indica): A Sand Culture Snapshot. *Plants* **2024**, *13* (24), 3489. <https://doi.org/10.3390/PLANTS13243489/S1>.
- (47) Singh, S.; Bothara, S. B. Physico-Chemical and Structural Characterization of Mucilage Isolated from Seeds of Diospyros Melonoxylon Roxb. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences* **2014**, *50* (4), 713–725. <https://doi.org/10.1590/S1984-82502014000400006>.
- (48) Raja, A.; Wilfert, P. K.; Picken, S. J. Charge Mediated Changes to the Intrinsic Viscosity of Biopolymer Systems. *Polymers (Basel)*. **2024**, *16* (20), 2894. <https://doi.org/10.3390/POLYM16202894/S1>.
- (49) Souza, J. F. do N.; Andrada, L. V. P. de; Martins, L. D. C. de S.; Brito, A. M. S. S.; Silva, L. J. V.; Silva, I. D. de L.; Vinhas, G. M.; Silva, T. G. F. da; Simões, A. do N. Storage Potential of Cactus Mucilage Powder for Incorporation into Foods and Production of Biopolymeric Films. *ACS Omega* **2024**, *9* (43), 43624–43634. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.4C05691>.
- (50) Van Rooyen, B.; De Wit, M.; Osthoff, G.; Van Niekerk, J. Cactus Pear Mucilage (Opuntia Spp.) as a Novel Functional Biopolymer: Mucilage Extraction, Rheology and Biofilm Development. *Polymers (Basel)*. **2024**, *16* (14), 1993. <https://doi.org/10.3390/POLYM16141993>.



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



- (51) Monrroy, M.; García, E.; Ríos, K.; García, J. R. Extraction and Physicochemical Characterization of Mucilage from *Opuntia Cochenillifera* (L.) Miller. *J. Chem.* **2017**, 2017 (1), 4301901. <https://doi.org/10.1155/2017/4301901>.
- (52) Nkoi, V.; de Wit, M.; van Biljon, A.; van Niekerk, J.; van Rooyen, B.; Pretorius, W. Impact of Nitrogen Fertilisation on Cactus Pear Mucilage Functionality. *S. Afr. J. Sci.* **2025**, 121 (7–8). <https://doi.org/10.17159/sajs.2025/19012>.
- (53) Costa, D. B. da; Souza, A. P. de; Felix, E. dos S.; Vasconcelos, E. S. A. G. de; Negreiros, E. D. de; Lima, R. P.; Carvalho, A. C. C. de; Araújo, J. S. Resposta Da Palma Forrageira a Adubação Nitrogenada e Potássica Sob Calagem. *OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA* **2025**, 22 (12), e8485. <https://doi.org/10.55905/oelv22n12-303>.
- (54) Astello-García, M. G.; Cervantes, I.; Nair, V.; Santos-Díaz, M. del S.; Reyes-Agüero, A.; Guéraud, F.; Negre-Salvayre, A.; Rossignol, M.; Cisneros-Zevallos, L.; Barba de la Rosa, A. P. Chemical Composition and Phenolic Compounds Profile of Cladodes from *Opuntia* Spp. Cultivars with Different Domestication Gradient. *Journal of Food Composition and Analysis* **2015**, 43, 119–130. <https://doi.org/10.1016/J.JFCA.2015.04.016>.
- (55) Dick, M.; Limberger, C.; Cruz Silveira Thys, R.; de Oliveira Rios, A.; Hickmann Flôres, S. Mucilage and Cladode Flour from Cactus (*Opuntia Monacantha*) as Alternative Ingredients in Gluten-Free Crackers. *Food Chem.* **2020**, 314, 126178. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.126178>.
- (56) Kumar Gupta, R.; Manisha; E. Ali, E. A.; Naijo Areekal, N.; Jyotsana Patel; Sunil Pipliya; Prakash Srivastav, P.; Chin-Kun Wang; Roberto Castro-Muñoz. Vitamin C-Infused Biopolymer Films: A Multifunctional Approach for Active Food Packaging and Preservation. *Sustainable Food Technology* **2026**. <https://doi.org/10.1039/D5FB00282F>.
- (57) Nabil, B.; Ouabou, R.; Ouhammou, M.; Saadouni, L.; Mahrouz, M. Impact of Particle Size on Functional, Physicochemical Properties and Antioxidant Activity of Cladode Powder (*Opuntia Ficus-Indica*). *Journal of Food Science and Technology* 2019 57:3 **2019**, 57 (3), 943–954. <https://doi.org/10.1007/S13197-019-04127-4>.



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



- (58) Rodrigues, G. do N.; Cunha, J. L. X. L.; Souza, R. C. de; Lima, L. A. R. de; Soares, M. A. da S.; Silva, E. M. da; Silva, E. M. da; Santos, E. F. dos; Moura, A. C. de A. Adubação Nitrogenada Sobre o Desenvolvimento e a Produtividade Da Palma Forrageira (*Nopalea Cochenillifera*) (L.) Salm – Dick Cv Miúda. *CONTRIBUCIONES A LAS CIENCIAS SOCIALES* **2024**, *17* (6), e7677–e7677. <https://doi.org/10.55905/REVCONV.17N.6-255>.
- (59) Luo, F.; Mi, W.; Liu, W. Legume-Grass Mixtures Improve Biological Nitrogen Fixation and Nitrogen Transfer by Promoting Nodulation and Altering Root Conformation in Different Ecological Regions of the Qinghai-Tibet Plateau. *Front. Plant Sci.* **2024**, *15*, 1375166. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2024.1375166/FULL>.
- (60) Leite, R. G.; Cardoso, A. da S.; Fonseca, N. V. B.; Silva, M. L. C.; Tedeschi, L. O.; Delevatti, L. M.; Ruggieri, A. C.; Reis, R. A. Effects of Nitrogen Fertilization on Protein and Carbohydrate Fractions of Marandu Palisadegrass. *Sci. Rep.* **2021**, *11* (1), 14786. <https://doi.org/10.1038/S41598-021-94098-4>.
- (61) Tahir, M.; Wei, X.; Liu, H.; Li, J.; Zhou, J.; Kang, B.; Jiang, D.; Yan, Y. Mixed Legume–Grass Seeding and Nitrogen Fertilizer Input Enhance Forage Yield and Nutritional Quality by Improving the Soil Enzyme Activities in Sichuan, China. *Front. Plant Sci.* **2023**, *14*, 1176150. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1176150/BIBTEX>.
- (62) Oliveira, N. L.; Rodrigues, A. A.; Oliveira Neves, I. C.; Teixeira Lago, A. M.; Borges, S. V.; de Resende, J. V. Development and Characterization of Biodegradable Films Based on *Pereskia Aculeata* Miller Mucilage. *Ind. Crops Prod.* **2019**, *130*, 499–510. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2019.01.014>.
- (63) Saberi, B.; Thakur, R.; Vuong, Q. V.; Chockchaisawasdee, S.; Golding, J. B.; Scarlett, C. J.; Stathopoulos, C. E. Optimization of Physical and Optical Properties of Biodegradable Edible Films Based on Pea Starch and Guar Gum. *Ind. Crops Prod.* **2016**, *86*, 342–352. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2016.04.015>.
- (64) Monjazebe Marvdashti, L.; Koocheki, A.; Yavarmanesh, M. Alyssum Homolocarpum Seed Gum-Polyvinyl Alcohol Biodegradable Composite Film: Physicochemical, Mechanical,



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



- Thermal and Barrier Properties. *Carbohydr. Polym.* **2017**, *155*, 280–293. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2016.07.123>.
- (65) Fox, D. I.; Pichler, T.; Yeh, D. H.; Alcantar, N. A. Removing Heavy Metals in Water: The Interaction of Cactus Mucilage and Arsenate (As (V)). *Environ. Sci. Technol.* **2012**, *46* (8), 4553–4559. <https://doi.org/10.1021/es2021999>.
- (66) Koc-Bilican, B. Linden-Based Mucilage Biodegradable Films: A Green Perspective on Functional and Sustainable Food Packaging. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, *261*, 129805. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.129805>.
- (67) Martín, C. del M. G.; Ramírez, O.; Bonardd, S.; López-Darias, M.; Franco, L.; M'Rabet, Y.; Khwaldia, K.; Díaz Díaz, D. Unlocking the Potential of Opuntia Species Mucilage in Chemistry. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, 268. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131647>.
- (68) Gheribia, R.; Puchotb, L.; Vergeb, P.; Jaoued-grayaac, N.; Meznic, M.; Habibib, Y.; Khwaldiaa, K. Machine Translated by Google Polímeros de Carboidratos Um Estudo Comparativo de Vários Plastificantes Poliol Machine Translated by Google. **2020**, *190* (2018), 204–211.
- (69) Das, I. J.; Kashyap, S.; Bal, T.; Jena, K.; Sinha, A.; Chinnappan, B. A.; Rangappa, S. M.; Siengchin, S.; Chakroborty, S. Evaluation of Microwave Irradiated Polyacrylamide Grafted Opuntia Leaf Mucilage Graft Copolymer (OPM-g-PAM) as Effective Controlled Release Polymer for Release of Rosuvastatin as Model Drug. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, 275. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133200>.
- (70) Mannai, F.; Elhleli, H.; Ben Mosbah, M.; Khiari, R.; Nacer, S. N.; Belgacem, M. N.; Moussaoui, Y. Comparative Study of Conventional and Combined Ultrasound-Assisted Methods on the Quality of Mucilage Extracted from Opuntia Ficus-Indica Cladodes. *Ind. Crops Prod.* **2024**, *214*, 118566. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2024.118566>.
- (71) Tongdeesoontorn, W.; Mauer, L. J.; Wongruong, S.; Sriburi, P.; Rachtanapun, P. Effect of Carboxymethyl Cellulose Concentration on Physical Properties of Biodegradable Cassava



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



- Starch-Based Films. *Chemistry Central Journal* 2011 5:1 **2011**, 5 (1), 6-.
<https://doi.org/10.1186/1752-153X-5-6>.
- (72) Souza, J. F. do N.; Andrada, L. V. P. de; Martins, L. D. C. de S.; Brito, A. M. S. S.; Silva, L. J. V.; Silva, I. D. de L.; Vinhas, G. M.; Silva, T. G. F. da; Simões, A. do N. Storage Potential of Cactus Mucilage Powder for Incorporation into Foods and Production of Biopolymeric Films. *ACS Omega* **2024**. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05691>.
- (73) Silva, S. H.; Neves, I. C. O.; Oliveira, N. L.; de Oliveira, A. C. F.; Lago, A. M. T.; de Oliveira Giarola, T. M.; de Resende, J. V. Extraction Processes and Characterization of the Mucilage Obtained from Green Fruits of *Pereskia Aculeata* Miller. *Ind. Crops Prod.* **2019**, 140, 111716. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111716>.
- (74) Rahman, M. M.; Maniruzzaman, M.; Zaman, M. N. Fabrication and Characterization of Environmentally Friendly Biopolymeric Nanocomposite Films from Cellulose Nanocrystal of Banana *M. Oranta* (Sagar Kala) Tree Rachis Fibers and Poly Lactic Acid: A New Route. *S. Afr. J. Chem. Eng.* **2024**, 50 (8), 451–465. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.10.002>.
- (75) Iñiguez-Moreno, M.; Ragazzo-Sánchez, J. A.; Barros-Castillo, J. C.; Solís-Pacheco, J. R.; Calderón-Santoyo, M. Characterization of Sodium Alginate Coatings with *Meyerozyma Caribbica* and Impact on Quality Properties of Avocado Fruit. *LWT* **2021**, 152, 112346. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112346>.
- (76) Santos, M. B.; dos Santos, C. H. C.; de Carvalho, M. G.; de Carvalho, C. W. P.; Garcia-Rojas, E. E. Physicochemical, Thermal and Rheological Properties of Synthesized Carboxymethyl Tara Gum (*Caesalpinia Spinosa*). *Int. J. Biol. Macromol.* **2019**, 134, 595–603. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.025>.



Capítulo 2 – Caracterização físico-química e tecnológica de mucilagem e filmes biopoliméricos oriundo de plantas de pitaia proveniente de adubação com esterco bovino

RESUMO

A elevada demanda por embalagens plásticas convencionais tem gerado graves impactos ambientais, impulsionando alternativas sustentáveis como filmes biopoliméricos de mucilagem de pitaia. No entanto, há escassez de estudos sobre biofilmes derivados especificamente do cladódio da pitaia, cujas características hidrofílicas e funcionais são promissoras para essa aplicação. Nesse contexto, a mucilagem de *Hylocereus polyrhizus* surge como fonte alternativa de polímeros para formulação de tais filmes. Este estudo teve como objetivo investigar a formação e caracterização de filmes biopoliméricos à base de mucilagem extraída de cladódios de pitaia submetidos a diferentes doses de adubação com esterco bovino (10,66; 21,33 e 49,33 kg planta⁻¹) e obter características físico-químicas da mucilagem e as propriedades estruturais, ópticas e funcionais dos filmes biopoliméricos. ⁻¹. Os cladódios foram colhidos por meio da poda de limpeza selecionando os sadios, posteriormente foram cortados e lavado com etanol (99,3%) o precipitado foi seco em estufa obter a mucilagem e usado para análises e elaboração dos filmes biopoliméricos utilizou-se 3g de mucilagem e 150 ml de água e glicerol (35%), foi seco em estufa a 45 °C por 8 h. As mucilagens com adubação dose (49,33 kg planta⁻¹) mostraram modulações significativas para aumento o rendimento e teor de potássio, assim como teor de proteína, carboidratos, composto fenólico e Vitamina C. A mucilagem (49,33 kg planta⁻¹), obteve-se filmes biopoliméricos com matriz homogênea, mais transparente, e mostrando coloração mais amarelada e com maior teor de umidade. O espectro de FTIR confirmou a estabilidade estrutural do biopolímero, e a preservação dos grupos funcionais. A degradação térmica apresentou três estágio, com baixa perda de massa e degradação incompleta. Os resultados mostram que a dose de adubação (49,33 kg planta⁻¹), resultou em mucilagem com propriedades físico-químicas mais desejáveis para a produção de filmes. Os resultados mostram o potencial do cladódio de pitaia com material sustentáveis para aplicação de embalagens.

Palavras-chave: Biopolímeros, *Hylocereus polyrhizus*, Polissacarídeos, Cactos, Glicerol.



1. INTRODUÇÃO

A produção e o consumo de polímeros sintéticos de origem petroquímica cresceram exponencialmente nas últimas décadas, impulsionados pelo crescimento populacional e pela expansão do consumo global. Entre 1950 e 2018, a produção mundial de plásticos aumentou de aproximadamente 2 milhões para mais de 359 milhões de toneladas anuais, sendo que o setor de embalagens representa cerca de 40% da demanda total ^{1,2}. A ampla utilização de materiais como tereftalato de polietileno (PET), polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC) e poliestireno (PS), aliada ao descarte inadequado, tem contribuído significativamente para o acúmulo de resíduos sólidos e para a poluição ambiental em escala global ¹.

Diante desse cenário, cresce o interesse por alternativas sustentáveis, entre elas os filmes e revestimentos à base de biopolímeros, obtidos a partir de fontes renováveis como polissacarídeos, proteínas e lipídios. Esses materiais apresentam biodegradabilidade, biocompatibilidade e potencial para reduzir a dependência de polímeros sintéticos ^{3,4}. Filmes à base de polissacarídeos têm se destacado devido às suas propriedades de formação de rede, boa adesão à superfície dos alimentos e adequadas propriedades mecânicas e de barreira a gases ^{4,5}. Entre os biopolímeros mais estudados estão quitosana, alginato, amido e gelatina, amplamente aplicados no desenvolvimento de embalagens biodegradáveis.

Nesse contexto, mucilagens vegetais têm despertado interesse como matéria-prima para produção de filmes biopoliméricos. A mucilagem extraída de cactáceas é composta predominantemente por polissacarídeos, além de proteínas e pequenas quantidades de lipídios, apresentando propriedades reológicas e capacidade de formação de filmes ⁶ (Dick et al., 2020). Estudos com mucilagem de *cactáceas* demonstram potencial para aplicação em revestimentos e filmes biodegradáveis destinados à conservação de alimentos (Dick et al., 2020).

A pitia vermelha (*Hylocereus polyrhizus*), pertencente à família Cactaceae, é uma espécie trepadeira originária das Américas, caracterizada por cladódios triangulares e produção de frutos com polpa firme, sabor adocicado e elevado valor funcional, o que favorece sua aceitação comercial ^{7,8}. Diferentes partes da planta apresentam potencial de aproveitamento, incluindo sementes para extração de óleo e cascas ricas em compostos bioativos ^{8,9}. Além disso, resíduos



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



provenientes de podas agrícolas, como cladódios, podem constituir fonte alternativa de mucilagem, agregando valor a subprodutos que seriam descartados.

Embora existam estudos sobre propriedades bioativas e composição química da pitaia, ainda são limitadas as informações acerca do potencial formador de filmes da mucilagem extraída de seus cladódios, bem como sobre suas propriedades físico-químicas e mecânicas. Considerando que práticas de manejo e adubação podem influenciar a composição estrutural dos tecidos vegetais, incluindo polissacarídeos da parede celular, torna-se relevante investigar possíveis efeitos da adubação orgânica sobre a qualidade da mucilagem obtida.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo investigar a formação e caracterização de filmes biopoliméricos à base de mucilagem extraída de cladódios de pitaia (*Hylocereus polyrhizus*) submetidos a diferentes doses de adubação com esterco bovino, visando o desenvolvimento de materiais com potencial aplicação em embalagens alimentícias sustentáveis e biodegradáveis.



2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 LOCAL DO EXPERIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

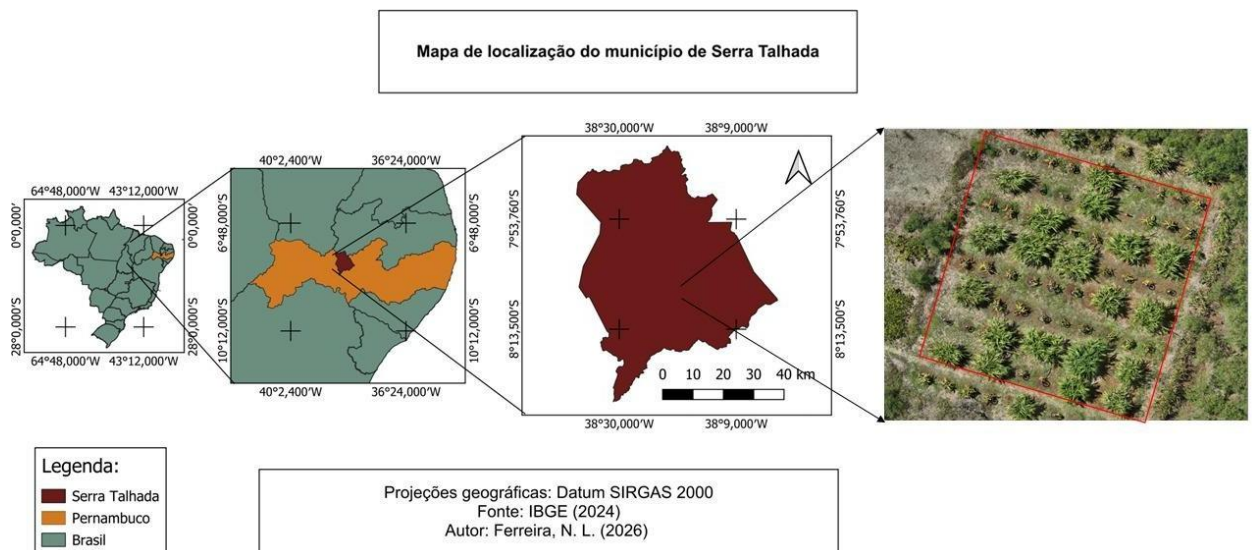


Figura 1. Mapa de localização da área experimental no município de Serra Talhada.

O experimento foi conduzido na Universidade Federal Rural de Pernambuco – Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UFRPE/UAST), localizada no município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil (07°56'20" S, 38°17'31" O, 499 m de altitude).

A região está inserida no domínio morfoclimático da Caatinga, apresentando vegetação xerófita de pequeno porte, adaptada à escassez hídrica. O clima é classificado como BSw^h (semiárido quente), segundo Köppen, caracterizado por chuvas irregulares, concentradas entre janeiro e abril, com precipitação média anual de 642 mm, temperatura média mínima de 20,1 °C, máxima de 32,9 °C e umidade relativa do ar de aproximadamente 63%^{10,11}. O solo da área experimental foi classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico¹², com textura média e boa drenagem natural.



2.2 MATERIAL VEGETAL, DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E MANEJO DA ÁREA

O material vegetal estudado no trabalho foram cladódios de pitaiá vermelha (*Hylocereus polyrhizus*). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizados (DIC) com cinco repetições. Os tratamentos consistiram em três doses de adubação orgânica com esterco bovino (10,66; 21,33 e 49,33 kg planta⁻¹). Essas doses equivalem a 18; 36 e 81 t ha⁻¹ de esterco, e foram definidas levando-se em consideração o teor médio de nitrogênio total presente no esterco bovino curtido (15 g kg⁻¹) e a exigência da cultura em nitrogênio (160; 320 e 740 g planta⁻¹) (Aremanda et al., 2023; Karunakaran et al., 2025).

O manejo da irrigação foi realizado três vezes por semana, durante 1 hora e 20 minutos por meio de sistema de microaspersores, vazão de 40 L h⁻¹ e pressão de serviço de 1 atm, apresentando coeficiente de uniformidade de 90%. A água de irrigação foi proveniente de poço artesiano, com condutividade elétrica média de 1,62 dS m⁻¹ e pH de 6,84, classificada como C3 – alta salinidade. A lâmina aplicada foi calculada com base em 100% da evapotranspiração de referência (ET_o), estimada pela equação de Penman-Monteith, conforme metodologia preconizada pela FAO¹³.

A colheita do material vegetal foi realizada no dia 26 de junho de 2024, antes do período de frutificação. Os cladódios colhidos foram selecionados e levados para laboratório para extração e obtenção da mucilagem.

2.3 EXTRAÇÃO E PREPARO DA MUCILAGEM

A extração da mucilagem foi realizada em cladódios colhidos às 6 h da manhã, horário de maior estabilidade fisiológica do tecido vegetal. Os cladódios foram encaminhados ao laboratório, submetidos à lavagem em água corrente para remoção de impurezas superficiais, posteriormente secos com papel absorvente e, em seguida, pesados em balança semi analítica. A mucilagem foi obtida segundo metodologia proposta por Andrada et al.,¹⁴ com modificações adaptadas às condições experimentais. Inicialmente, foram removidos os espinhos caulinares e o eixo vascular



dos cladódios, posteriormente foram fatiados e homogeneizados em processador de alimentos por 60 s com álcool etílico (99,3%), a fim de promover a precipitação e a separação de pigmentos e compostos insolúveis. O extrato foi então filtrado em tecido de polipropileno e novamente lavado com álcool etílico (99,3%) até a obtenção de um material esbranquiçado, livre de pigmentos clorofilados¹⁴. O filtrado obtido foi submetido à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 55 °C durante 24 h. Após a secagem, o material foi triturado em moinho de facas até a formação de um pó fino, acondicionado em recipientes herméticos sob atmosfera seca, constituindo a mucilagem em pó utilizada nas etapas subsequentes.

2.4 AVALIAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS DA MUCILAGEM

2.4.1 Teor de sódio (Na⁺), potássio (K⁺), rendimento da mucilagem (RM) e acidez total titulável (ATT)

Os teores de Na⁺ e K⁺ foram obtidos conforme metodologia descrita por Astello-García et al.,¹⁵ que se baseia na técnica de fotometria de emissão de chamas com o uso do fotômetro de chamas (modelo MICRONAL B462). Foi utilizada uma alíquota de 5.000 µL, composta por 4.900 µL de água deionizada e 100 µL da amostra de mucilagem. As concentrações foram determinadas com base na curva padrão previamente estabelecida, e os resultados expressos em mg 100 g⁻¹ MS.

A quantificação do RM, foi calculada com base no peso da mucilagem seca dividida pelo peso fresco do cladódio inteiro, e expresso em porcentagem, de acordo com a Equação 1:

$$RM = \frac{\text{Massa de mucilagem em pó (g)}}{\text{Massa do cladódio fresco (g)}} \times 100 \quad (1)$$



A ATT foi realizada segundo Andrade viera et al.,¹⁶, com adaptações, utilizando solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 N. Os resultados foram calculados de acordo com a Equação 2 e expressos em % de ácido cítrico.

$$ATT = \frac{N \times V \times Eq \text{ ácido cítrico}}{v}$$

(2)

Em que AT = acidez total titulável, (% de ácido cítrico); N = concentração de NaOH; V = volume de NaOH usado na titulação, (mL); Eq = equivalente gramas de ácido cítrico (64,02); v = volume da amostra utilizada (mL).

2.4.2 Sólidos solúveis totais (SST), potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica (CE)

As medições de SST foram feitas com utilização de um refratômetro de bancada (Instrutherm, RTD-95, São Paulo, Brasil). Para a leitura, foi utilizado 1 mL de mucilagem hidratada, e os resultados foram expressos em °Brix.

Para aferição do pH foi utilizado um pHmetro (TECNAL, modelo TEC-5, Piracicaba, Brasil).

A CE foi medida com uso de um condutivímetro (TECNAL, modelo Tec-4MP, Piracicaba, Brasil), a amostra da mucilagem hidrata foi colocada em um béquer, e imergido o eletrodo para fazer as leituras. Os resultados foram expressos em mS cm⁻¹.

2.4.3 Capacidade de retenção água (CRA) e de óleo (CRO)

A CRA foi determinada conforme descrito por Souza et al.,¹⁷ com adaptações. Para determinar a CRA, amostras de 0,03 g de mucilagem foram adicionadas a 1,5 mL de água destilada, em micro tubos de centrífuga de 2 mL, mantidas por 1 h em temperatura ambiente e agitadas por 5 s a cada 15 min. Em seguida, foram centrifugados a 5.000 rpm por 20 min. O sobrenadante foi descartado e a água restante foi drenada por 3:30 h min⁻¹. A CRA foi calculada e expressa como a quantidade em g de água retida por g da mucilagem seca (g.g⁻¹).



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



Para a determinação da CRO, amostras de 0,1 g foram adicionadas a 10 mL de óleo de soja, em tubos Falcon de 50 mL e agitadas a 200 rpm, em incubadora (TECNAL, modelo TE-420), por 5 h. A mistura foi centrifugada a 5.000 rpm por 15 min, o sobrenadante foi descartado e o precipitado foi drenado. A CRO foi calculada e os resultados expressos em gramas de óleo adsorvido por grama de mucilagem ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$), de acordo com a Equação 3:

$$\text{CRA} = \text{CRO} = \frac{\text{Peso da mucilagem após drenagem (g)}}{\text{Peso da mucilagem seca (g)}} \quad (3)$$



2.4.4 Proteínas Solúveis Totais (PST) e Compostos Fenólicos Totais (CFT)

O conteúdo de PST foi determinado conforme o método descrito por Bradford e Zimmermann et al.,^{18,19}. Para o extrato foram utilizados 2 mL de mucilagem hidratada (4 g de mucilagem e 100 mL de água destilada) que foram centrifugados a 10.000 rpm por 21 minutos a 4 °C.

O ensaio de proteína foi feito adicionando-se 100 µL de extrato em meio de reação contendo 1 mL de solução de Bradford, sendo homogeneizado. Após 15 minutos, as leituras foram feitas no espectrofotômetro (Biochrom, Libra S8, Cambridge, Inglaterra) com absorvância 595 nm, e o conteúdo de proteína foi estimado de acordo com curva padrão elaborada com albumina do soro bovino (BSA), sendo determinada em mg proteína 100.g⁻¹ de matéria fresca (MF).

A determinação dos CFT foi realizada segundo a metodologia descrita por Jaramillo-Flores et al.,²⁰ com adaptações. A extração foi efetuada utilizando-se 2 mL da mucilagem (4 g de mucilagem e 100 mL de água), que posteriormente foi centrifugada a 10.000 rpm, a 4 °C, por 21 minutos.

Para o ensaio de quantificação dos CFT, foram utilizados 150 µL da alíquota e adicionado o meio de reação contendo 250 µL do reagente Folin–Ciocalteu (1 N) e 600 µL de água deionizada. A mistura foi mantida em repouso por 2 minutos, sendo então adicionado 500 µL de solução de carbonato de sódio a 20% (p/v). Após um novo período de repouso de 10 minutos, as leituras de absorvância foram realizadas em espectrofotômetro (Biochrom, Libra S8, Cambridge, Inglaterra) a 757 nm.

A quantificação foi efetuada com base em uma curva padrão de ácido gálico, expressando os resultados em mg ácido gálico 100.g⁻¹ de MF.

2.4.5 Carboidratos Solúveis Totais (CST) e Vitamina C

A determinação do teor de CST foi de acordo com a metodologia proposta por Souza et al.,²¹. A mucilagem hidratada (2 mL) foi centrifugada (Hettich, MIKRO 220, Berlim, Alemanha)



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



a 10.000 rpm por 21 minutos a 4 °C. A alíquota de 5 µL do extrato bruto da amostra foi adicionada a 495 µL de água deionizada, 500 µL de fenol a 5% e 2.500 µL de ácido sulfúrico 98,08%, em tubos de ensaio que foram agitados. Em seguida, os tubos foram deixados em repouso por 10 min em uma bandeja contendo água à temperatura ambiente. Posteriormente, as leituras foram feitas em espectrofotômetro (Modelo Libra S8, Biochrom, Cambridge, Reino Unido) a 490 nm. O branco foi constituído de 500 µL de água deionizada, 500 µL de fenol 5% e 2.500 µL de ácido sulfúrico 98,08%. Os resultados foram expressos em mg 100.g⁻¹ de MF e quantificados com base na equação obtida para a curva padrão.

A medição do conteúdo de ácido ascórbico foi determinada conforme o método proposto por Sanchez-Rangel et al.,²², com adaptações. A mucilagem hidratada (2 mL) foi centrifugada (Hettich, MIKRO 220, Berlim, Alemanha) a 10.000 rpm por 21 minutos a 4 °C. No ensaio, foram utilizados a alíquota 100 µL de sobrenadante, 400 µL de água deionizada e 500 µL do reagente Folin-Ciocalteu (1 N). A mistura foi homogeneizada em vórtice (TECNAL, AP56) e permaneceu em repouso por 2 min. As leituras foram realizadas em espectrofotômetro (Biochrom, Libra S8, Cambridge, Inglaterra) a 765 nm. A concentração total de ácido ascórbico (AA) foi expressa com base na curva padrão em mg AA 100.g⁻¹ MF.

2.5 PRODUÇÃO DOS FILMES BIOPOLIMÉRICOS

Os filmes foram produzidos conforme a metodologia de Andrada et al.,¹⁴, com ajustes na proporção de componentes. A mucilagem seca foi dissolvida em água destilada na proporção de 3% (p/v) (3 g de mucilagem para 150 mL de água), sob agitação contínua e aquecimento a 60 °C até completa solubilização. Posteriormente, adicionou-se glicerol (35%) como agente plastificante, garantindo maior flexibilidade à matriz polimérica. A solução homogênea foi mantida sob agitação por 10 min e, em seguida, 30 mL da mistura foram vertidos em placas de Petri de 9 cm de diâmetro e 1,5 cm de profundidade. As placas foram levadas à estufa de circulação de ar a 45 °C por 7 h para secagem e formação dos filmes biopoliméricos. Após completa desidratação, os filmes foram cuidadosamente removidos e armazenados em dessecadores sob controle de umidade até as análises físico-químicas.



2.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS FILMES

2.6.1 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

As análises espectrais na região do infravermelho médio foram realizadas em um espectrofotômetro de infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR) (Frontier da Perkin Elmer®), utilizando o acessório universal de reflexão total atenuada (UATR). Os espectros foram obtidos na região de 4000-600 cm^{-1} , resolução 8 cm^{-1} e 8 varreduras, e força 30 newtons. Para o branco, utilizará o ar e as medidas foram realizadas diretamente no filme sob o cristal de diamante.

2.6.2 Espessura dos filmes, transparência e cor

As medições de espessura do filme (mm) foram medidas com um paquímetro (calibrado de precisão). As medições foram feitas em dez posições diferentes de cada amostra²³.

A medida de transparência foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Han; Floros,²⁴. Os filmes foram cortados em forma retangular (3 x 1 cm) e colocados em cubeta de quartzo no espectrofotômetro UV-VIS, e o comprimento de onda obtido na região de 600 nm. A transparência dos filmes foi calculada por meio da Equação 4:

$$T = \frac{\log T}{X} \quad (4)$$



Em que, T é a transmitância (%), e X é a espessura do filme em mm.

A medida da cor foi realizada com uso de um colorímetro (COLOR ANALYZER, RGB-1002) em sistema RGB. Foi realizada uma medição em cada filme²³. Os resultados foram convertidos para valores CIE (Commission International de l'Eclairage) L^* , a^* e b^* , utilizando o website público EasyRGB²⁵, o qual levou em consideração D65 como iluminante padrão (luz do dia) e observador = 2°. O parâmetro luminosidade foi obtido diretamente pelo colorímetro, sem necessidade de conversão.

2.6.3 Teor de umidade (TU) e solubilidade em água (SA)

A determinação do TU foi realizada de acordo com Jouki et al.,²⁶ e expresso em porcentagem (%), os filmes foram cortados no tamanho de 2 x 2 cm, pesados e colocados na estufa a 55 °C, até a obter de peso constante. O cálculo foi feito conforme Equação 5:

$$TU = \frac{\text{massa inicial (g)} - \text{massa final (g)}}{(\text{massa inicial (g)})} \times 100 \quad (5)$$

A SA foi avaliada com os filmes cortados em pedaços de 2 x 2 cm e em seguida pesados e imersos em 50 mL de água destilada, sob agitação constante por 30 min., a 25 °C. Os pedaços de filmes restantes, foram secos a 55 °C em estufa, até obtenção do peso constante²⁶. Os resultados expressos em porcentagem (%) foram calculados conforme a Equação 6:

$$SA = \frac{\text{massa inicial (g)} - \text{massa final (g)}}{(\text{massa inicial (g)})} \times 100 \quad (6)$$

2.6.4 Análise termogravimétrica (TGA)

O teste termogravimétrico avalia a estabilidade térmica dos filmes através do TGA usando o equipamento TGA2 (Mettler Toledo). As amostras dos filmes foram realizadas sob atmosfera de



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



nitrogênio com uma taxa de aquecimento de $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ com temperatura de aquecimento de 30 a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ em cada amostra, sob atmosfera de nitrogênio a 50 mL.min^{-1} .

2.7 ANÁLISES ESTATÍSTICA

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizados. Os dados serão submetidos aos testes de normalidade, análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey a 5% de probabilidade com o auxílio do software R x 64 3.4.0. Os gráficos foram elaborados utilizando os softwares Origin 8.5 e Sigma Plot versão 15 (Systat Software Inc., 2020).



3. RESULTADOS

3.1 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DA MUCILAGEM DE PITAIA

A mucilagem obtida na dose de 49,33 kg planta⁻¹ apresentou maior rendimento de cladódio e maiores teores de potássio (K⁺) (Tabela 1), além de concentrações superiores de proteínas solúveis totais (PST), carboidratos solúveis totais (CST), compostos fenólicos totais (CFT) e vitamina C (Figura 2). O rendimento de parênquima (RP) e a capacidade de retenção de óleo (CRO) também apresentaram valores mais elevados nas doses de 21,33 e 49,33 kg planta⁻¹ (Tabela 1). Por outro lado, os maiores teores de sódio (Na⁺), sólidos solúveis (SS) e capacidade de retenção de água (CRA) foram observados na dose de 10,66 kg planta⁻¹ (Tabela 1). Os parâmetros acidez total titulável e condutividade elétrica não diferiram significativamente entre as doses de esterco avaliadas (Tabela 1).



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Unidade Acadêmica de Serra Talhada
 Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal



Tabela 1: Propriedades físico-químicas da mucilagem de cladódios de pitaia (*Hylocereus polyrhizus*), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49,33 kg planta⁻¹).

Quantificação	Dose de esterco bovino (kg planta ⁻¹)		
	10,66	21,33	49,33
RC	2,82 ± 0,09 b	2,81 ± 0,09 b	3,12 ± 0,05 a
RP	3,42 ± 0,17 b	3,71 ± 0,11 a	3,76 ± 0,09 a
Na ⁺	0,42 ± 0,05 a	0,40 ± 0,05 ab	0,34 ± 0,04 b
K ⁺	0,23 ± 0,03 b	0,27 ± 0,03 b	0,33 ± 0,01 a
ATT	4,03 ± 0,61 a	4,15 ± 0,41 a	4,51 ± 0,34 a
SS	1,20 ± 0,08 a	1,02 ± 0,14 b	0,87 ± 0,09 c
pH	4,78 ± 0,02 b	4,82 ± 0,02 a	4,75 ± 0,03 b
CRA	31,80 ± 2,28 a	27,71 ± 2,19 b	25,15 ± 2,01b
CRO	1,12 ± 0,12 b	1,45 ± 0,06 a	1,35 ± 0,16 a
CE	1827,11 ± 46,67 a	1788,04 ± 48,35 a	1832,71 ± 44,14 a

Os resultados foram expressos em média ± desvio padrão. RC: Rendimento do cladódio (%), RP: rendimento do parênquima (%), Na⁺: Teor de sódio (g.100g⁻¹ MS), K⁺: Teor de potássio (g.100g⁻¹ MS), ATT: Acidez total titulável (% de ácido málico), SS: sólidos solúveis totais (°BRIX), pH, CRA: capacidade de retenção de água e óleo (CRO) (g água por g mucilagem) e CE: condutividade elétrica (mS cm⁻¹). As letras significam diferenças estatísticas ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

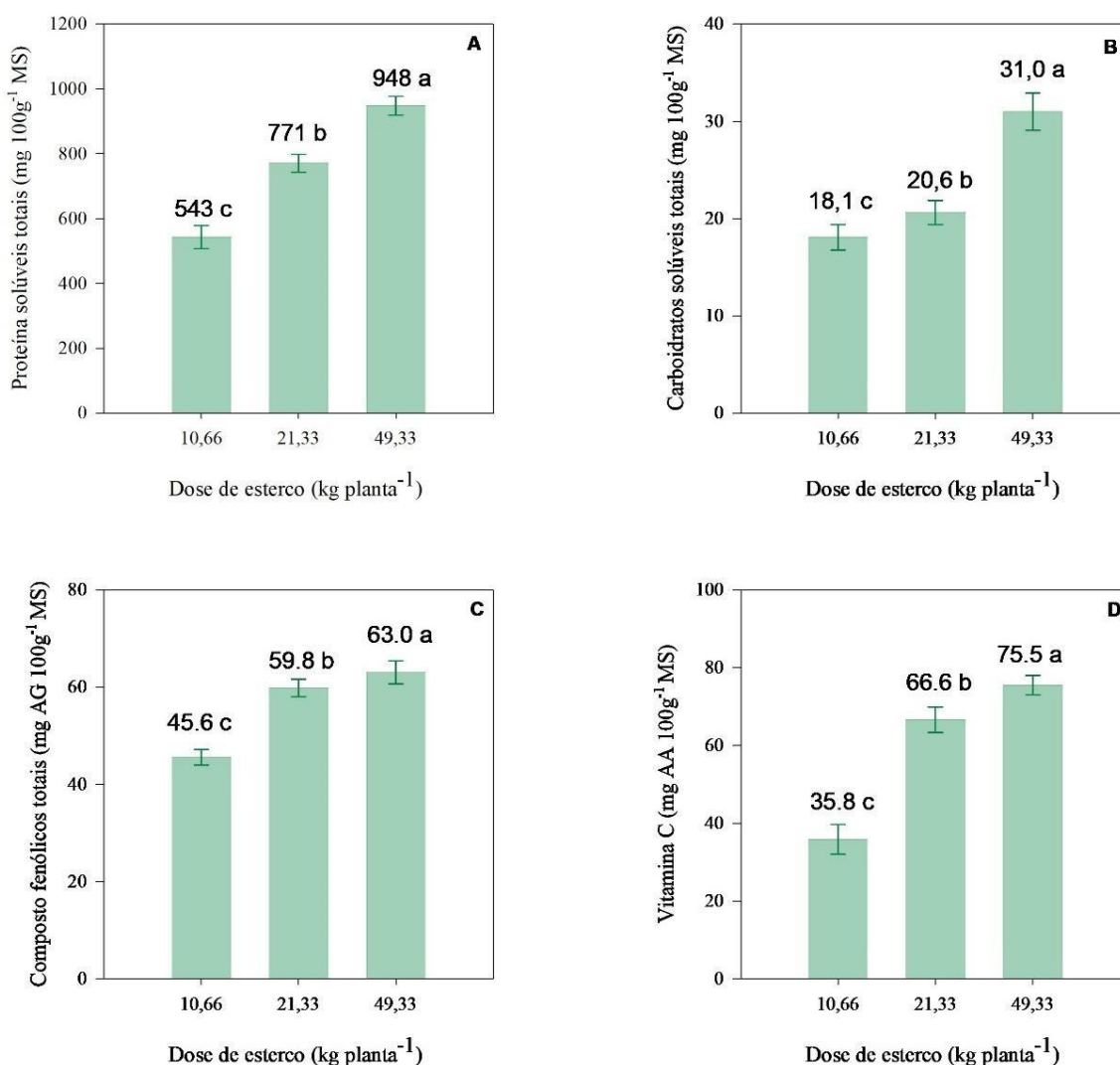


Figura 2: Proteínas solúveis totais (mg 100 g⁻¹ MS) (A), Compostos fenólicos totais (mg AG 100 g⁻¹ MS) (B), Carboidratos solúveis totais (mg 100 g⁻¹ MS) (C) e Vitamina C (mg AA 100 g⁻¹ MS) (D) de mucilagem de cladódios de pitaia (*Hylocereus polyrhizus*), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49,33 kg planta⁻¹), As letras significam diferenças estatísticas ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

3.2 PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS E ÓPTICAS DOS FILMES BIOPOLIMÉRICOS

Para a formulação dos filmes à base de mucilagem de cladódios de pitaia (*Hylocereus polyrhizus*) (Figura 2), adotou-se inicialmente o protocolo descrito por Gheribi et al.¹, utilizando baixas concentrações de glicerol; entretanto, não houve formação adequada dos filmes. Diante disso, foram realizados ajustes sucessivos, incluindo redução da temperatura e do tempo de secagem em estufa, aumento da concentração de glicerol para 35% e elevação do volume de água de 100 mL para 150 mL. Simultaneamente, a quantidade de mucilagem foi reduzida de 4 g para 3 g. Após os testes, estabeleceu-se como formulação adequada a utilização de 3 g de mucilagem, 150 mL de água e 35% de glicerol, com secagem em estufa a 45 °C por 8 horas (Figura 2).



Figura 3: Filmes biopoliméricos elaborados a partir de mucilagem de cladódios de pitaiá (*Hylocereus polyrhizus*), obtidos após ajustes nas condições de formulação e secagem, incluindo variações na concentração de glicerol, proporção mucilagem/água e parâmetros de secagem, até o estabelecimento da formulação adequada (3 g de mucilagem, 150 mL de água e 35% de glicerol, com secagem a 45 °C por 8 h).

Os filmes obtidos das doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49, 33 kg planta⁻¹) foram elaborados e apresentaram estruturas afiladas, superfície áspera, flexível e pouca elasticidade (Figura 3). O filme formulado com a mucilagem da dose 49, 33 (kg planta⁻¹) (Figura 2C) apresentou uma matriz mais homogênea e com cor mais uniforme, sendo compatível para indústria de filmes biopoliméricos, se diferenciando dos demais que apresentaram uma matriz menos uniforme (Figura 3A e B).

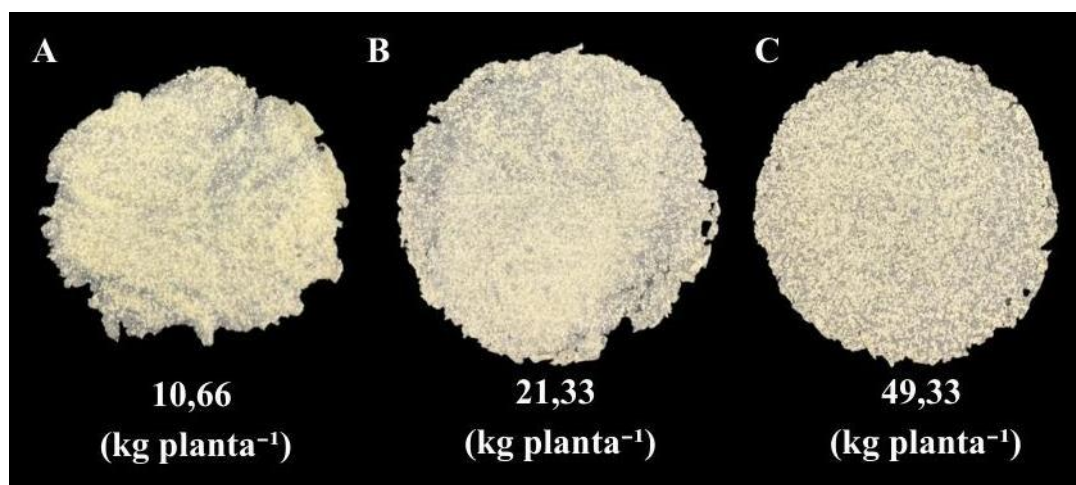


Figura 4: Filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de cladódios de pitiaia (*Hylocereus polyrhizus*), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49,33 kg planta⁻¹).

Não foram observadas diferenças significativas na espessura dos filmes entre os tratamentos avaliados (Tabela 2). Quanto à transparência visual, o filme elaborado com mucilagem proveniente da dose de 49,33 kg planta⁻¹ apresentou maior transparência em comparação aos demais, enquanto o filme da dose de 10,66 kg planta⁻¹ apresentou menor transparência.

Os parâmetros instrumentais de transparência e a^* não diferiram significativamente entre as doses de esterco bovino (Tabela 2). Em relação à b^* , as doses de 10,66 e 49,33 kg planta⁻¹ apresentaram valores positivos, indicando tonalidade mais amarelada dos filmes quando comparados ao obtido na dose de 21,33 kg planta⁻¹ (Tabela 2).

Tabela 2: Espessura, transparência e cor dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de cladódios de pitaia (*Hylocereus polyrhizus*), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49,33 kg planta⁻¹).

Quantificação	Dose de esterco bovino (kg planta ⁻¹)		
	10,66	21,33	49,33
Espessura	0,28 ± 0,01 a	0,28 ± 0,01 a	0,29 ± 0,01 a
Transparência	0,68 ± 0,16 b	1,02 ± 0,41 ab	1,57 ± 0,56 a
<i>L</i>	77,79 ± 5,7 a	82,76 ± 2,21 a	79,45 ± 4,85 a
<i>a</i> *	3,01 ± 0,57 a	3,10 ± 0,38 a	3,46 ± 0,41 a
<i>b</i> *	18,04 ± 1,68 a	14,56 ± 1,40 b	17,13 ± 2,20 ab
Cor			

Os resultados foram expressos em média ± desvio padrão e equação. Espessura (mm), Transparência (% mm⁻¹), colorimetria e cor dos filmes biopoliméricos. As l e t r a s significam diferenças estatísticas ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

Os espectros FTIR foi utilizada para avaliar a interações moleculares da mucilagem e dos filmes de *Hylocereus polyrhizus*, mostrando a preservação dos grupos funcionais (Figura 3A e B). As curvas de ambas as amostras mostraram picos semelhantes, porém os picos dos filmes se mostraram mais intensos. As bandas dos grupos funcionais da mucilagem e dos filmes, obtiveram respostas mais intensas nas doses 10,66 e 49,33 (kg planta⁻¹) (Figura 3A e B). As bandas amplas em 3470 – 3149 cm⁻¹ indicam vibrações de estiramento de O–H dos presentes polissacarídeos. As bandas 2960 e 2858 cm⁻¹ estão relacionadas as vibrações assimétricas da ligação CH ou CH₂ dos grupos da piranose. O pico de absorção 1738 – 1720 cm⁻¹ mostra grupo carboxílicos C=O. Os sinais em 1627 e 1413 cm⁻¹ estão associados aos sais de ácidos carboxilato (COO⁻). As bandas 1370, 1320 e 1238 cm⁻¹, correspondem a ligações C–H ou O–H. O pico 1032 cm⁻¹, é específico para ligações C–O–C ou C–O–H. A análise espectral revela que a formação dos filmes ocorreu sem alteração significativa das frações da mucilagem, enfatizando a viabilidade do biopolímero.

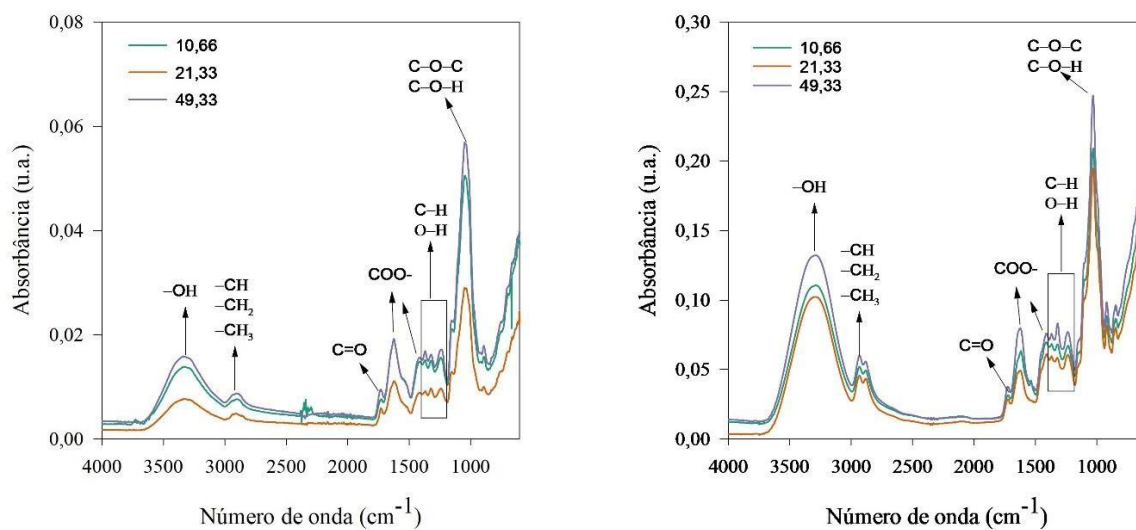


Figura 5: Espectros de infravermelho (FTIR) da mucilagem (A) e dos filmes biopoliméricos (B) oriundos de mucilagem de cladódios de pitaia (*Hylocereus polyrhizus*), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49,33 kg planta⁻¹).

O filme elaborado com mucilagem proveniente da dose de 10,66 kg planta⁻¹ apresentou o menor teor de umidade, diferindo das demais doses avaliadas. Observou-se tendência de aumento no teor de umidade com o incremento das doses de esterco bovino (Figura 4A).

Quanto à solubilidade em água, não foram verificadas diferenças significativas entre os tratamentos (Figura 4B).

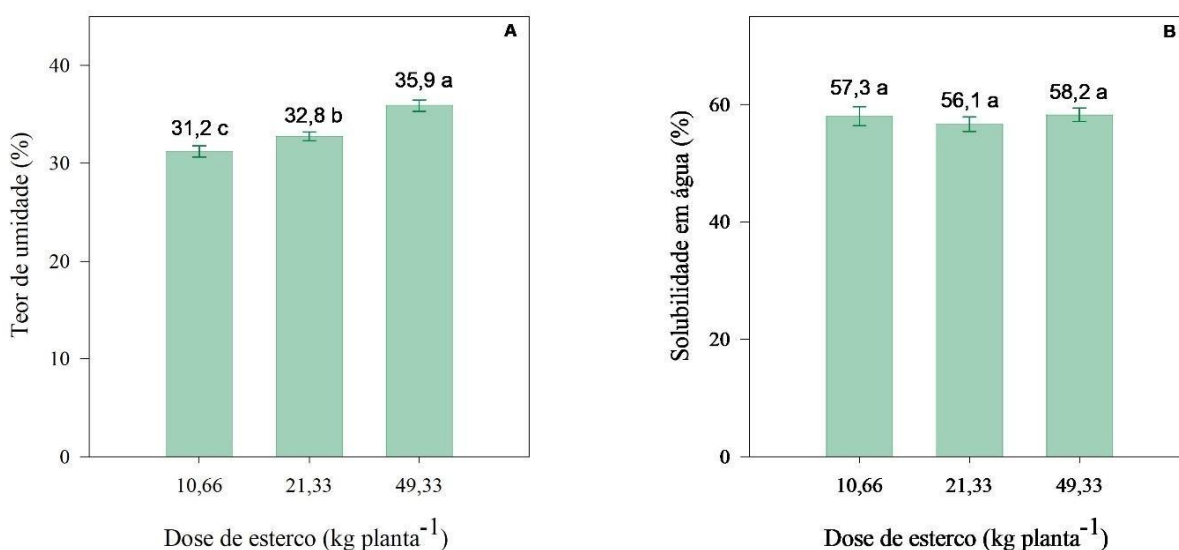


Figura 6: Solubilidade em água (%) (A) e Teor de umidade (%) (B) dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de cladódios de pitaia (*Hylocereus polyrhizus*), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49,33 kg planta⁻¹). As letras significam diferenças estatísticas ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey

A degradação térmica e a massa residual dos filmes biopoliméricos de pitaia através das curvas de termogravimétrica (TGA) das doses de adubação nitrogenada (10,66; 21,33 e 49,33 kg planta⁻¹) (Figura 7A) e termogravimétrica derivada (DTG) (Figura 7B), apresentaram três estágios de degradação ao longo da faixa de 30 a 600 °C, com temperaturas iniciais (T onset), máximas (T máx), finais (T endset) e a perda de massa (PM) de cada estágio de degradação (Tabela 3). As curvas de TGA e DTG apresentaram apenas três estágios de degradação. O estágio I atingiu pico máximo de degradação entre 51,8 e 53,3 °C, e perda de massa variando de 7,7 a 11,6 % entre as doses. No estágio II as T máx alteraram entre 194,1 e 196,1 °C. Em seguida o estágio III apresentou a perda de massa variando entre 25,3 e 35,0 % (Tabela 3).

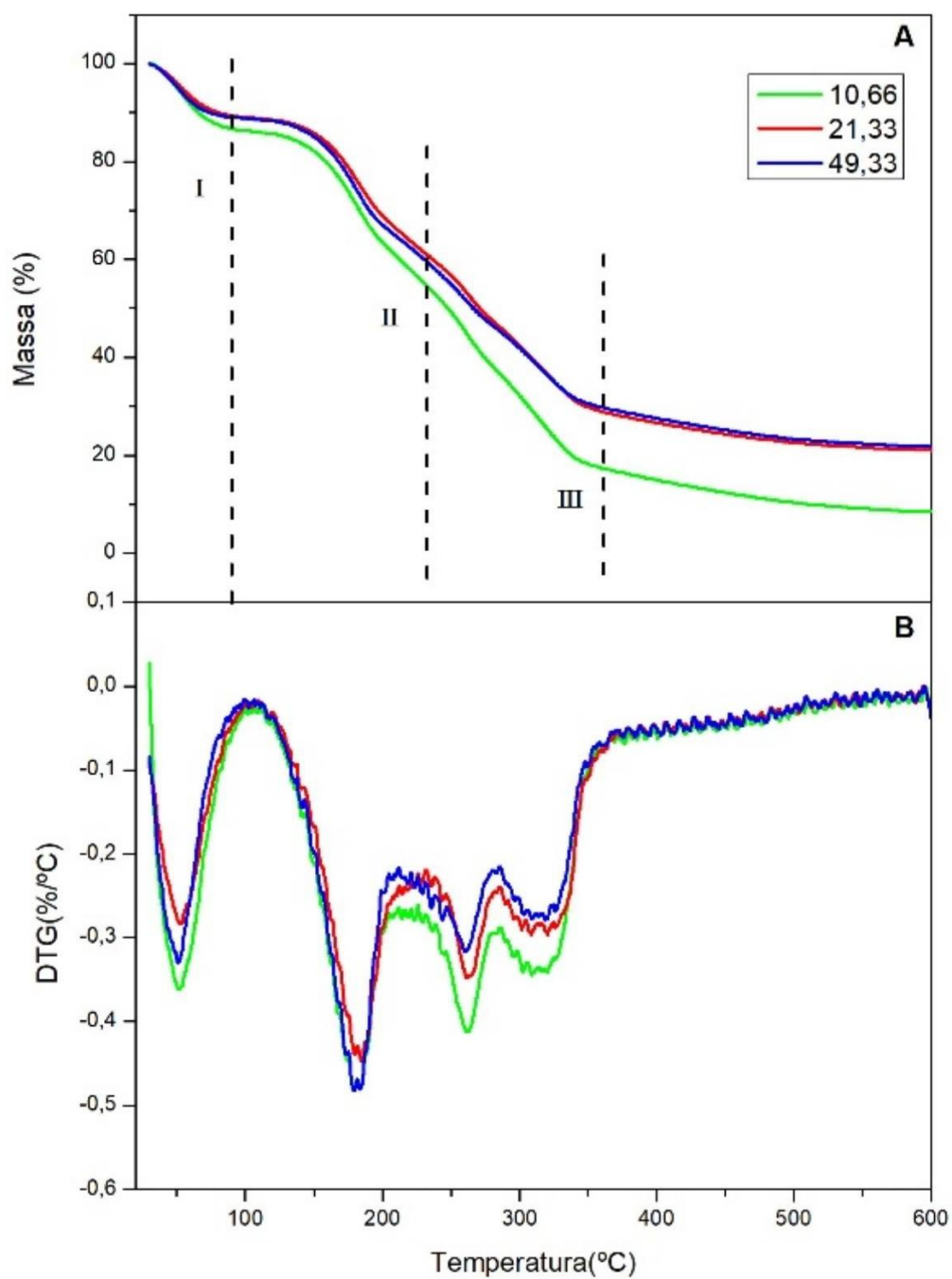


Figura 7: Análise termogravimétrica (TGA) massa residual (%) (A) e DTG (%/°C) (B) dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de cladódios de pitaia (*Hylocereus polyrhizus*), submetido a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49,33 kg planta⁻¹).

Tabela 3: Parâmetros térmicos dos filmes biopoliméricos oriundos de mucilagem de cladódios de pitaia (*Hylocereus polyrhizus*), submetidos a diferentes doses de esterco bovino (10,66; 21,33 e 49,33 kg planta⁻¹).

Estágio de degradação		DOSE		
		10,66	21,33	49,33
I	T onset	32,8	42,3	39,1
	T máx.	53,3	51,8	51,8
	T endset	69,7	69,5	64,1
	PM (%)	11,6	7,8	7,7
II	T onset	143,7	152,2	153,0
	T máx.	179,4	184,3	182,6
	T endset	194,1	196,1	194,8
	PM (%)	19,8	18,7	18,8
III	T onset	240,1	252,4	248,5
	T máx.	263,6	262,5	260,2
	T endset	340,8	340,8	342,7
	PM (%)	35	26,1	25,3

T onset: temperatura inicial (°C); T máx.: Temperatura máxima (°C); T endset: Temperatura final (°C) e PM: perda de massa (%).

4. DISCUSSÃO

As preocupações ambientais associadas à produção e ao descarte de plásticos sintéticos^{1,2}, têm impulsionado o desenvolvimento de materiais biodegradáveis a partir de fontes renováveis. Nesse cenário, filmes à base de polissacarídeos destacam-se como alternativas promissoras para aplicações em embalagens alimentícias^{3,4}. Os resultados deste estudo demonstram que a mucilagem extraída de cladódios de pitia cultivados em sistema orgânico apresenta capacidade de formação de filmes contínuos, com propriedades estruturais e funcionais compatíveis com matrizes poliméricas naturais.

A caracterização estrutural evidenciou a presença de grupos funcionais típicos de polissacarídeos vegetais, especialmente grupos hidroxila, capazes de estabelecer extensas redes de ligações de hidrogênio. Essas interações são determinantes para a coesão da matriz e para a formação de filmes homogêneos^{27,28}. Comportamento semelhante tem sido descrito para mucilagem de *Opuntia ficus-indica*^{6,29}, reforçando o potencial de polissacarídeos derivados de cactáceas como materiais filmogênicos.

A adição de plastificante desempenhou papel central na modulação das interações intermoleculares. Polióis reduzem as forças intermoleculares entre cadeias poliméricas, promovendo maior flexibilidade, embora possam impactar a resistência mecânica^{5,30}. O equilíbrio observado entre integridade estrutural e mobilidade molecular indica adequada plasticização da matriz.

O desempenho mecânico obtido é consistente com o relatado para filmes à base de mucilagem de cactáceas e outras matrizes vegetais^{26,31,32}. A resistência à tração e a elongação refletem a densidade de ligações de hidrogênio e a organização da rede polimérica^{33,34}.

Além disso, fatores agronômicos podem influenciar a composição da mucilagem e, consequentemente, o desempenho do filme. Estudos demonstram que época de colheita e condições de cultivo alteram características estruturais da mucilagem³⁵⁻³⁷. Assim, o perfil mecânico observado pode refletir não apenas características intrínsecas da espécie, mas também o sistema de cultivo adotado.

O conjunto dos resultados indica que os filmes não apresentaram comportamento excessivamente frágil, limitação comum em matrizes polissacarídicas³, sugerindo adequada interação entre cadeias e eficiência do plastificante.

Como esperado para sistemas hidrofílicos, os filmes apresentaram sensibilidade à umidade e características de permeabilidade típicas de matrizes polissacarídicas^{27,38}. A elevada disponibilidade de grupos hidroxila favorece a interação com moléculas de água, influenciando solubilidade e permeabilidade ao vapor.

Resultados semelhantes foram reportados para filmes de mucilagem de *Opuntia ficus-indica*^{34,39} e para outras mucilagens vegetais³¹. Embora a natureza hidrofílica limite aplicações que exijam alta resistência à umidade, o material pode ser adequado para alimentos com baixa atividade de água ou para uso como revestimento comestível, conforme discutido por Souza et al.¹⁷ e Mbonambi et al.⁴⁰.

A fisiologia das cactáceas, incluindo eficiência no uso da água e metabolismo de carboidratos, influencia diretamente a composição bioquímica dos cladódios⁴¹⁻⁴³. Condições de irrigação e manejo nutricional podem alterar o conteúdo de biomoléculas orgânicas e afetar a qualidade do filme produzido^{37,44}.

Dessa forma, o desempenho tecnológico da mucilagem não deve ser dissociado do sistema produtivo, reforçando a importância de integrar variáveis agronômicas no desenvolvimento de biomateriais.

A análise integrada das propriedades estruturais, mecânicas e de barreira indica que a mucilagem de pitaiá apresenta viabilidade técnica como material filmogênico biodegradável. Embora não substitua polímeros sintéticos de alto desempenho, pode atender nichos específicos que priorizem biodegradabilidade e origem renovável^{3,4}.

Investigações recentes ampliam o potencial de aplicação da mucilagem de cactáceas em sistemas de encapsulação⁴⁰, nanocompósitos⁴⁵ e matrizes de liberação controlada⁴⁶, evidenciando versatilidade tecnológica. Os resultados aqui obtidos contribuem para consolidar a mucilagem de pitaiá como alternativa promissora na área de embalagens sustentáveis.

A produção dos filmes foi realizada por técnica de casting, apropriada para escala laboratorial, mas que demanda avaliação quanto à viabilidade em processos industriais²⁴. Além disso, a sensibilidade à umidade permanece como limitação inerente a matrizes polissacarídicas.

Estudos futuros devem investigar estratégias de modificação estrutural, incorporação de reforços ou combinações com polímeros complementares para aprimorar desempenho

mecânico e de barreira. Avaliações de ciclo de vida e escalonamento produtivo também são necessárias para consolidar a aplicabilidade industrial do material.

5. CONCLUSÕES

As maiores dose de adubação de esterco bovino mostrou aspectos mais favoráveis para caracterização dos filmes biopoliméricos. A mucilagem da dose 49,33 kg planta⁻¹ apresentou maior rendimento, assim como maior teor de K⁺, proteínas, carboidratos, compostos fenólicos e vitamina C. Além disso, os filmes derivados dessa mesma dose de adubação mostrou-se mais homogêneo, apresentando ser mais transparente e de tonalidade mais amarelada, com picos mais intensos para o espectro do infravermelho, o maior teor de umidade, e menores perda de massa na estabilidade térmica. A partir desses achados, sugere-se que a mucilagem do cladódio de pitaia adubada com dose de esterco bovino (49,33 kg planta⁻¹) possui potencial promissor para a elaboração de filmes biodegradáveis. Portanto, os filmes de cladódio de pitaia contribuem para o desenvolvimento sustentável oriundos de subprodutos da pitaia, e com importante avanço para pesquisas futuras de filmes biopoliméricos para indústria alimentícia.

6. REFERÊNCIAS

- (1) Geyer, R.; Jambeck, J. R.; Law, K. L. Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made. *Sci. Adv.* **2017**, 3 (7). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- (2) *PlasticsEurope (2019) Plásticos: Os Fatos 2019. Uma Análise dos Dados Europeus sobre Produção, Demanda e Resíduos de Plásticos. PlasticsEurope - Referências - Publicações de Pesquisa Científica.*
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=3767605> (accessed 2026-02-15).
- (3) Hassan, B.; Chatha, S. A. S.; Hussain, A. I.; Zia, K. M.; Akhtar, N. Recent Advances on Polysaccharides, Lipids and Protein Based Edible Films and Coatings: A Review. *Int. J. Biol. Macromol.* **2018**, 109, 1095–1107. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.097>.
- (4) Rhim, J. W.; Park, H. M.; Ha, C. S. Bio-Nanocomposites for Food Packaging Applications. *Prog. Polym. Sci.* **2013**, 38 (10–11), 1629–1652. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.008>.
- (5) Vieira, M. G. A.; Da Silva, M. A.; Dos Santos, L. O.; Beppu, M. M. Natural-Based Plasticizers and Biopolymer Films: A Review. *Eur. Polym. J.* **2011**, 47 (3), 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2010.12.011>.
- (6) Medina-Torres, L.; Brito-De La Fuente, E.; Torrestiana-Sanchez, B.; Katthain, R. Rheological Properties of the Mucilage Gum (*Opuntia Ficus Indica*). *Food Hydrocoll.* **2000**, 14 (5), 417–424. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(00\)00015-1](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(00)00015-1).
- (7) Ortiz-Hernández, Y. D.; Carrillo-Salazar, J. A. Pitahaya (*Hylocereus* Spp.): A Short Review. *Comunicata Scientiae* **2012**, 3 (4), 220–237. <https://doi.org/10.14295/CS.V3I4.334>.
- (8) Wu, L. C.; Hsu, H. W.; Chen, Y. C.; Chiu, C. C.; Lin, Y. I.; Ho, J. A. A. Antioxidant and Antiproliferative Activities of Red Pitaya. *Food Chem.* **2006**, 95 (2), 319–327. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.01.002>.
- (9) Tenore, G. C.; Novellino, E.; Basile, A. Nutraceutical Potential and Antioxidant Benefits of Red Pitaya (*Hylocereus Polyrrhizus*) Extracts. *J. Funct. Foods* **2012**, 4 (1), 129–136. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2011.09.003>.
- (10) Silva, T. G. F. da; Primo, J. T. A.; de Mura, M. S. B.; Silva, S. M. S. e.; de Moraes, J. E. F.; de Caldas Pereira, P.; de Souza, C. A. A. Soil Water Dynamics and Evapotranspiration of Forage Cactus Clones under

- Rainfed Conditions. *Pesqui. Agropecu. Bras.* **2015**, 50 (7), 515–525. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000700001>.
- (11) Pereira, P. D. C.; Da Silva, T. G. F.; Zolnier, S.; De Moraes, J. E. F.; Dos Santos, D. C. MORFOGÊNESE DA PALMA FORRAGEIRA IRRIGADA POR GOTEJAMENTO. *Revista Caatinga* **2015**, 28 (3), 184–195. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015V28N321RC>.
- (12) Jardim, A. M. da R. F.; Santos, H. R. B.; Alves, H. K. M. N.; Ferreira-Silva, S. L.; Souza, L. S. B. de; Araújo Júnior, G. do N.; Souza, M. de S.; Araújo, G. G. L. de; Souza, C. A. A. de; Silva, T. G. F. da. Genotypic Differences Relative Photochemical Activity, Inorganic and Organic Solutes and Yield Performance in Clones of the Forage Cactus under Semi-Arid Environment. *Plant Physiology and Biochemistry* **2021**, 162, 421–430. <https://doi.org/10.1016/J.PLAPHY.2021.03.011>.
- (13) Allen, R. G.; Pereira, L. S. *Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Requirements. FAO Irrig. Drain. Report Modeling and Application*; 1998. <https://www.researchgate.net/publication/290988983>.
- (14) Andrada, L. V. P.; do Nascimento Souza, J. F.; de Sousa, L. D. C.; Brito, A. M. S. S.; de Lima Silva, I. D.; Vinhas, G. M.; da Silva, T. G. F.; Ferreira, N. L.; de Brito, F. A. L.; do Nascimento Simões, A. A New Protocol for Obtaining Mucilage and Biopolymeric Ecofilms From Cacti. *Packaging Technology and Science* **2024**, 37 (5), 365–377. <https://doi.org/10.1002/pts.2799>.
- (15) Instituto Adolfo Lutz. 1ª Edição Digital. *Métodos físicos-químicos para análise de Alimentos* **2008**.
- (16) Astello-García, M. G.; Cervantes, I.; Nair, V.; Santos-Díaz, M. del S.; Reyes-Agüero, A.; Guéraud, F.; Negre-Salvayre, A.; Rossignol, M.; Cisneros-Zevallos, L.; Barba de la Rosa, A. P. Chemical Composition and Phenolic Compounds Profile of Cladodes from *Opuntia* Spp. Cultivars with Different Domestication Gradient. *Journal of Food Composition and Analysis* **2015**, 43, 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.04.016>.
- (17) Souza, J. F. do N.; Andrada, L. V. P. de; Martins, L. D. C. de S.; Brito, A. M. S. S.; Silva, L. J. V.; Silva, I. D. de L.; Vinhas, G. M.; Silva, T. G. F. da; Simões, A. do N. Storage Potential of Cactus Mucilage Powder for Incorporation into Foods and Production of Biopolymeric Films. *ACS Omega* **2024**, 9 (43), 43624–43634. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05691>.
- (18) Bradford, M. M. Determinación de Proteínas: Método de Bradford. *Anal. Biochem.* **1976**.

- (19) Zimmermann, P.; Heinlein, C.; Orendi, G.; Zentgraf, U. Senescence-Specific Regulation of Catalases in *Arabidopsis Thaliana* (L.) Heynh. *Plant Cell Environ.* **2006**, *29* (6), 1049–1060. <https://doi.org/10.1111/J.1365-3040.2005.01459.X>.
- (20) Jaramillo-Flores, M. E.; González-Cruz, L.; Cornejo-Mazón, M.; Dorantes-álvarez, L.; Gutiérrez-López, G. F.; Hernández-Sánchez, H. Effect of Thermal Treatment on the Antioxidant Activity and Content of Carotenoids and Phenolic Compounds of Cactus Pear *Cladodes* (*Opuntia Ficus-Indica*). *Food Chem.* **2003**. <https://doi.org/10.1177/108201303036093>.
- (21) Souza, J. F. do N.; Andrada, L. V. P. de; Martins, L. D. C. de S.; Brito, A. M. S. S.; Silva, L. J. V.; Silva, I. D. de L.; Vinhas, G. M.; Silva, T. G. F. da; Simões, A. do N. Storage Potential of Cactus Mucilage Powder for Incorporation into Foods and Production of Biopolymeric Films. *ACS Omega* **2024**. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c05691>.
- (22) Sánchez-Rangel, J. C.; Benavides, J.; Heredia, J. B.; Cisneros-Zevallos, L.; Jacobo-Velázquez, D. A. The Folin–Ciocalteu Assay Revisited: Improvement of Its Specificity for Total Phenolic Content Determination. *Analytical Methods* **2013**, *5* (21), 5990–5999. <https://doi.org/10.1039/C3AY41125G>.
- (23) Gheribi, R.; Puchot, L.; Verge, P.; Jaoued-Grayaa, N.; Mezni, M.; Habibi, Y.; Khwaldia, K. Development of Plasticized Edible Films from *Opuntia Ficus-Indica* Mucilage: A Comparative Study of Various Polyol Plasticizers. *Carbohydr. Polym.* **2018**, *190*, 204–211. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2018.02.085>.
- (24) Han, J. H.; Floros, J. D. Casting Antimicrobial Packaging Films and Measuring Their Physical Properties and Antimicrobial Activity. *Journal of Plastic Film & Sheeting* **1997**, *13* (4), 287–298. <https://doi.org/10.1177/875608799701300405>.
- (25) de Alvarenga Pinto Cotrim, M.; Mottin, A. C.; Ayres, E. Preparation and Characterization of Okra Mucilage (*Abelmoschus Esculentus*) Edible Films. *Macromol. Symp.* **2016**, *367* (1), 90–100. <https://doi.org/10.1002/masy.201600019>.
- (26) Jouki, M.; Tabatabaei Yazdi, F.; Mortazavi, S. A.; Koocheki, A. Physical, Barrier and Antioxidant Properties of a Novel Plasticized Edible Film from Quince Seed Mucilage. *Int. J. Biol. Macromol.* **2013**, *62*, 500–507. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2013.09.031>.
- (27) Tosif, M. M.; Najda, A.; Bains, A.; Kaushik, R.; Dhull, S. B.; Chawla, P.; Walasek-Janusz, M. A Comprehensive Review on Plant-Derived Mucilage: Characterization, Functional Properties, Applications, and Its Utilization for Nanocarrier Fabrication. *Polymers (Basel)*. **2021**, *13* (7), 1066. <https://doi.org/10.3390/polym13071066>.

- (28) Martín, C. del M. G.; Ramírez, O.; Bonardd, S.; López-Darias, M.; Franco, L.; M'Rabet, Y.; Khwaldia, K.; Díaz Díaz, D. Unlocking the Potential of Opuntia Species Mucilage in Chemistry. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, 268. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131647>.
- (29) Monrroy, M.; García, E.; Ríos, K.; García, J. R. Extraction and Physicochemical Characterization of Mucilage from Opuntia Cochenillifera (L.) Miller. *J. Chem.* **2017**, 2017 (1), 4301901. <https://doi.org/10.1155/2017/4301901>.
- (30) Gheribi, R.; Puchot, L.; Verge, P.; Jaoued-Grayaa, N.; Mezni, M.; Habibi, Y.; Khwaldia, K. Development of Plasticized Edible Films from Opuntia Ficus-Indica Mucilage: A Comparative Study of Various Polyol Plasticizers. *Carbohydr. Polym.* **2018**, 190, 204–211. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2018.02.085>.
- (31) Oliveira, N. L.; Rodrigues, A. A.; Oliveira Neves, I. C.; Teixeira Lago, A. M.; Borges, S. V.; de Resende, J. V. Development and Characterization of Biodegradable Films Based on Pereskia Aculeata Miller Mucilage. *Ind. Crops Prod.* **2019**, 130, 499–510. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2019.01.014>.
- (32) Van Rooyen, B.; De Wit, M.; Osthoff, G.; Van Niekerk, J.; Hugo, A. Effect of PH on the Mechanical Properties of Single-Biopolymer Mucilage (Opuntia Ficus-Indica), Pectin and Alginate Films: Development and Mechanical Characterisation. *Polymers (Basel)*. **2023**, 15 (24), 4640. <https://doi.org/10.3390/POLYM15244640>.
- (33) Saberi, B.; Thakur, R.; Vuong, Q. V.; Chockchaisawasdee, S.; Golding, J. B.; Scarlett, C. J.; Stathopoulos, C. E. Optimization of Physical and Optical Properties of Biodegradable Edible Films Based on Pea Starch and Guar Gum. *Ind. Crops Prod.* **2016**, 86, 342–352. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2016.04.015>.
- (34) Mannai, F.; Mechi, L.; Alimi, F.; Alsukaibi, A. K. D.; Belgacem, M. N.; Moussaoui, Y. Biodegradable Composite Films Based on Mucilage from Opuntia Ficus-Indica (Cactaceae): Microstructural, Functional and Thermal Properties. *Int. J. Biol. Macromol.* **2023**, 252 (August), 126456. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.126456>.
- (35) Araújo, Y. P. de; Brito, A. M. S. S.; Fonseca, K. S.; Souza, J. F. do N.; Sousa, L. D. C. de; Silva, T. G. F. da; Eugênio, D. da S.; Simões, A. do N. Characterization of Mucilage from Clones of Opuntia and Nopalea Prickly Pear Cactus Harvested in Different Seasons in Brazilian Semiarid. *Journal of the Professional Association for Cactus Development* **2021**, 23, 180–198. <https://doi.org/10.56890/JPACD.V23I.457>.
- (36) Pinheiro, J. C.; Silva, L. J. V.; Lopes, B. K. A.; Ferreira, N. L.; Fonseca, K. S.; de Brito, F. A. L.; da Silva, T. G. F.; Brito, A. M. S. S.; de Lima Silva, I. D.; Vinhas, G. M.; do

- Nascimento Simões, A. Effects of Cactus Pear Clone Harvest Seasons and Times on the Physicochemical and Technological Properties of Resulting Mucilage and Biopolymeric Films. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, 257, 128374. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2023.128374>.
- (37) Silva, L. J. V.; Soares, A. L.; Pinheiro, J. C.; Lopes, B. K. A.; Ferreira, N. L.; de Andrada, L. V. P.; do Nascimento Souza, J. F.; de Brito, F. A. L.; de Araújo, L. G. C.; Pereira, J. F. Q.; Brito, A. M. S. S.; da Silva, T. G. F.; de Lima Silva, I. D.; Vinhas, G. M.; do Nascimento Simões, A. Excessive Availability of Water for Irrigation Results in Cactus Cladode Powder with Fewer Organic Biomolecules and Reduces the Quality of the Biopolymeric Film. *ACS Omega* **2025**, 10 (31), 34176–34189. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c10894>.
- (38) Koc-Bilican, B. Linden-Based Mucilage Biodegradable Films: A Green Perspective on Functional and Sustainable Food Packaging. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, 261 (P1), 129805. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.129805>.
- (39) Gheribia, R.; Puchotb, L.; Vergeb, P.; Jaoued-grayaac, N.; Meznic, M.; Habibib, Y.; Khwaldiaa, K. Machine Translated by Google Polímeros de Carboidratos Um Estudo Comparativo de Vários Plastificantes Poliol Machine Translated by Google. **2020**, 190 (2018), 204–211.
- (40) Mbonambi, N. P.; Seke, F.; Fawole, O. A. Comparative Analysis of Opuntia Ficus-Indica Mucilage and Gum Arabic as Wall Materials in Anthocyanin-Rich Raspberry Pomace Microencapsulation for Potential Food Packaging Applications. *Applied Food Research* **2025**, 5 (1), 101029. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.101029>.
- (41) Sutton1, B. G.; Ting, I. P.; Sutron, R. *Carbohydrate Metabolism of Cactus in a Desert Environment*; 1981; Vol. 68.
- (42) Dubeux, J. C. B.; dos Santos, M. V. F.; de Andrade Lira, M.; dos Santos, D. C.; Farias, I.; Lima, L. E.; Ferreira, R. L. C. Productivity of Opuntia Ficus-Indica (L.) Miller under Different N and P Fertilization and Plant Population in North-East Brazil. *J. Arid Environ.* **2006**, 67 (3), 357–372. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2006.02.015>.
- (43) Silva, T. G. F. da; de Medeiros, R. S.; Arraes, F. D. D.; Ramos, C. M. C.; Araújo Júnior, G. do N.; Jardim, A. M. da R. F.; Alves, C. P.; Campos, F. S.; da Silva, M. V.; de Moraes, J. E. F.; de Souza, C. A. A.; Siqueira e Silva, S. M.; dos Santos, D. C.; de Carvalho, A. A.; de Souza, L. S. B. Cactus–Sorghum Intercropping Combined with Management Interventions of Planting Density, Row Orientation and Nitrogen Fertilisation Can Optimise Water Use in Dry Regions. *Science of The Total Environment* **2023**, 895, 165102. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.165102>.

- (44) Oliveira, L. M.; Mendonça, V.; Moura, E. A.; Irineu, T. H. S.; Figueiredo, F. R. A.; Melo, M. F.; Celedonio, W. F.; Rêgo, A. L. B.; Mendonça, L. F. M.; Andrade, A. D. M. Salt Stress and Organic Fertilization on the Growth and Biochemical Metabolism of *Hylocereus Costaricensis* (Red Pitaya) Seedlings | Estresse Salino e Fertilização Orgânica Sobre o Crescimento e Metabolismo Bioquímico de Mudanças de *Hylocereus Costaricensis* (. *Brazilian Journal of Biology* **2024**, 84.
- (45) Rahman, M. M.; Maniruzzaman, M.; Zaman, M. N. Fabrication and Characterization of Environmentally Friendly Biopolymeric Nanocomposite Films from Cellulose Nanocrystal of Banana *M. Oranta* (Sagar Kala) Tree Rachis Fibers and Poly Lactic Acid: A New Route. *S. Afr. J. Chem. Eng.* **2024**, 50 (8), 451–465. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.10.002>.
- (46) Das, I. J.; Kashyap, S.; Jena, K.; Sinha, A.; Chinnappan, B. A.; Rangappa, S. M.; Siengchin, S.; Chakroborty, S.; Bal, T. Evaluation of Microwave Irradiated Polyacrylamide Grafted *Opuntia* Leaf Mucilage Graft Copolymer (OPM-g-PAM) as Effective Controlled Release Polymer for Release of Rosuvastatin as Model Drug. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, 275, 133200. <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.133200>.