



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FITOTECNIA  
MESTRADO EM FITOTECNIA

LÚCIO JOSÉ VIEIRA SILVA

**A INFLUÊNCIA DO MANEJO DE IRRIGAÇÃO EM CLONES DE PALMA  
FORRAGEIRA NA QUALIDADE DA MUCILAGEM E DE FILMES  
BIOPOLIMÉRICOS**

MOSSORÓ – RN

2023

LÚCIO JOSÉ VIEIRA SILVA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal Rural do Semiárido, como requisito para obtenção do título de Mestre em Fitotecnia.

Linha de Pesquisa: Pós-colheita

Orientador: Prof. Dr. Adriano do Nascimento Simões

Coorientador: Prof. Dr. Fred Augusto Lourêdo de Brito

Coorientador: Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva

MOSSORÓ – RN

2023

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semiárido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

J586i JOSÉ VIEIRA SIVA, LUCIO.  
A INFLUÊNCIA DO MANEJO DE IRRIGAÇÃO EM CLONES  
DE PALMA FORRAGEIRA NA QUALIDADE DA MUCILAGEM E  
DE FILMES BIOPOLIMÉRICOS. / LUCIO JOSÉ VIEIRA SIVA.  
- 2023.  
51 f. : il.

Orientador: ADRIANO NASCIMENTO SIMÕES.  
Coorientador: FRED LOUREDO DE BRITO.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em  
Fitotecnia, 2023.

1. Filmes biopoliméricos. 2. Lâmina de  
Irrigação. 3. Nopalea. 4. OPUNTIA. 5. MUCILAGEM.  
I. NASCIMENTO SIMÕES, ADRIANO, orient. II. LOUREDO  
DE BRITO, FRED, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistemagerador automático em conformidade  
com AACR2 e os dados fornecidos pelo autor(a).  
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência  
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva  
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

LÚCIO JOSÉ VIEIRA SILVA

A INFLUÊNCIA DO MANEJO DE IRRIGAÇÃO EM CLONES DE PALMA  
FORRAGEIRA NA QUALIDADE DA MUCILAGEM E DE FILMES BIOPOLIMÉRICOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Fitotecnia.

Linha de Pesquisa: Pós-colheita

Defendida em: 31/08 /2023

**BANCA EXAMINADORA**

Documento assinado digitalmente  
 **ADRIANO DO NASCIMENTO SIMOES**  
Data: 08/11/2023 09:04:41-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adriano do Nascimento Simões (UFRPE/UAST)

Presidente

Documento assinado digitalmente  
 **GLAUBER HENRIQUE DE SOUSA NUNES**  
Data: 22/11/2023 11:00:23-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Glauber Henrique de Sousa Nunes (UFERSA)

Membro Examinador

Documento assinado digitalmente  
 **IVO DIEGO DE LIMA SILVA**  
Data: 20/11/2023 05:44:02-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ivo Diego de Lima Silva (UFPE)

Membro Examinador



Prof.<sup>a</sup> Dra. Luana Gomes Cordeiro de Araújo (UFRPE)

Membro Examinador

## AGRADECIMENTOS

A Deus, a minha família, ao Luciano José, ao Santana Lucena, à Luciana Josefa, ao Lucivan José, ao Lucas José, à Luana Vieira, a minha namorada Gleyciane Rodrigues. Aos meus amigos, em especial, Jucivânia Cordeiro, Brenna Karelly, pelo apoio que me deram, tornando essa realização possível.

Aos demais amigos e colegas: Aline, Jheizon Feitosa, Geovane, Fred, e Nathan, Lady, Lucas, José Edson, que também contribuíram nesta fase;

Ao Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal Rural do Pernambuco (UFRPE), pela estrutura oferecida durante a condução da pesquisa.

Ao Núcleo de Estudos em Fisiologia Pós-colheita, pelo auxílio na condução dos experimentos.

Ao Grupo de Agrometeorologia no Semiárido, na pessoa do professor Thieres George Freire da Silva, pelo fornecimento de material vegetal.

Ao Grupo de Instrumentação e Análises Químicas, na pessoa da professora Andréa Monteiro Santana Silva Brito, pela realização das análises de FTIR.

Ao Instituto de Pesquisa em Petróleo e Energia (LITPEG), pelo apoio na realização das análises termogravimétricas nas amostras.

Ao Centro de Apoio à Pesquisa da UFRPE, na pessoa de José Júlio Ferreira Junior, pela realização das análises de MEV.

Ao professor Dr. Adriano do Nascimento Simões, ao Dr. Fred Augusto Lourêdo de Brito e ao Prof. Dr. Thieres George Freire da Silva, pelas orientações.

Aos demais membros da Banca Examinadora: Prof. Dr. Glauber Henrique de Sousa Nunes, Dra. Luana Gomes Cordeiro de Araújo, Dr. Ivo Diego de Lima Silva, pelas contribuições.

## RESUMO

Cactáceas dos gêneros (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.) produzem mucilagem, um complexo fitoquímico formado principalmente por carboidratos e outras macromoléculas e substâncias inorgânicas, com várias utilizações na indústria. No entanto, vários artigos publicados, recentemente, mostraram que as propriedades físico-químicas e tecnológicas dos biofilmes são moduladas pelo manejo ambiental e agrônômico. Assim, o referido estudo foi realizado para investigar o efeito de diferentes lâminas de irrigação nas propriedades físico-químicas da mucilagem e de seus filmes biopoliméricos. Para isso, cladódios de dois clones: Ipa (*Nopalea cochenillifera* (L.) e orelha de elefante mexicana (OEM) (*Opuntia stricta* (Haw.)Haw.) foram colhidos na área experimental da Universidade Federal Rural de Pernambuco sob quatro lâminas de irrigação 0% da evapotranspiração (controle), 40% da evapotranspiração, 80% da evapotranspiração e 120% da evapotranspiração. A mucilagem foi extraída e suas características físico-químicas foram avaliadas. Posteriormente, a mucilagem foi hidratada e seca em estufa para obtenção dos filmes biopoliméricos. Foram estudadas as propriedades físico-químicas, ópticas e mecânicas e macro e micro-estruturais. O genótipo OEM apresentou maiores valores de rendimento, acidez titulável, carboidratos solúveis totais, composto

fenólicos totais e potássio, menores valores de pH, condutividade elétrica, fósforo e sódio. Os filmes biopoliméricos de OEM exibiu melhores propriedades mecânicas, de barreira à água, de microestrutura e estabilidade térmica em relação ao genótipo IPA. O genótipo OEM, quando submetido, as menores lâminas de irrigação apresentaram uma microestrutura mais homogênea e compacta, tornando-o mais resistente à ruptura. Foi possível observar que filmes biopoliméricos com maior resistência à tração estão relacionados com a mucilagem de menor acidez titulável total e maiores valores de pH e condutividade elétrica. Observou-se que os genótipos cultivados com a lâmina máxima de água (120% da ETc) a mucilagem de ambos genótipos apresentou: menores valores de acidez titulável total, condutividade elétrica, potássio, fósforo, pH, carboidratos totais; o filme biopolimérico exibiu maiores propriedade: de barreira à água, microestrutural e estabilidade térmica e menor resistência à tração. Isso são características indesejáveis para a indústria de filmes biopoliméricos. Assim, o intervalo de 0% a 80% da evapotranspiração torna-se mais indicado no cultivo de palma forrageira, OEM, para fins de aplicação de filmes biopoliméricos para indústria de embalagens biodegradáveis.

**Palavras-chave:** Filmes biopoliméricos. Lâmina de Irrigação. *Nopalea*. *Opuntia*. Mucilagem. FTIR. MEV.

### ABSTRACT

Cactaceae of the genera (*Opuntia* spp. and *Nopalea* spp.) produce mucilage, a phytochemical complex formed mainly by carbohydrates and other macromolecules and inorganic substances, with several uses in industry. However, several recently published articles have shown that the physical-chemical and technological properties of biofilms are modulated by environmental and agronomic management. Thus, this study was carried out to investigate the effect of different irrigation depths on the physicochemical properties of the mucilage and its biopolymeric films. For this, cladodes from two clones: Ipa (*Nopalea cochenillifera* (L.) and Mexican elephant ear (MEE) (*Opuntia stricta* (Haw.)Haw.) were harvested in the experimental area of the Rural Federal University of Pernambuco under four irrigation depths 0% of evapotranspiration (control), 40% of evapotranspiration, 80% of evapotranspiration and 120% of evapotranspiration The mucilage was extracted and its physical-chemical characteristics were evaluated. Subsequently, the mucilage was hydrated and dried in an oven to obtain biopolymeric films. The physical-chemical, optical and mechanical, and macro and micro-structural properties were studied. MEE showed higher values of yield, titratable acidity, total soluble carbohydrates, total phenolic compounds and potassium, lower values of pH,

phosphorus and sodium electrical conductivity. MEE biopolymer films exhibited better mechanical, water barrier, microstructure and thermal stability properties compared to the IPA genotype. The MEE genotype, when subjected to lower irrigation depths, presented a more homogeneous and compact microstructure, making it more resistant to rupture. It was possible to observe that biopolymeric films with greater tensile strength are related to mucilage with lower total titratable acidity and higher pH and electrical conductivity values. It was also verified that the genotypes cultivated with the maximum water depth (120% of ETc) the mucilage of both genotypes, presented lower values of total titratable acidity, electrical conductivity, potassium, phosphorus, pH, total carbohydrates, the biopolymer film exhibits higher property, water barrier, microstructural and thermal stability and lower tensile strength. These are undesirable characteristics for the biopolymer film industry. Thus, the range of 0% to 80% of evapotranspiration becomes more indicated in the cultivation of cactus pear, MEE, for the purpose of applying biopolymeric films for the biodegradable packaging industry.

**Keywords:** Biopolymeric films. Irrigation Blade. *Nopal*. *Opuntia*. Mucilage. FTIR. MEV.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização das áreas experimentais do Centro de Referência Internacional de Estudos de Agrometeorologia de Palma e outras Plantas Forrageiras - CentroRef .....	14
Figura 2 – Condições meteorológicas e disponibilidade hídrica via irrigação e precipitação durante o período experimental .....	15
Figura 3 – Fluxograma de extração de mucilagem em cladódios de palma forrageira Ipa ( <i>Nopalea cochenillifera</i> (L.) Salm-Dyck) e Orelha de Elefante Mexicana ( <i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw.) .....	18
Figura 4 – Fluxograma da elaboração de filmes poliméricos em cladódios de palma forrageira Ipa ( <i>Nopalea cochenillifera</i> (L.) Salm-Dyck) e Orelha de Elefante Mexicana ( <i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw.) .....	21
Figura 5 – Arranjo experimental, com diferentes clones de palma forrageira cultivados no Centro de Referência Internacional de Estudos Agrometeorológicos de Palma e Outras Plantas Forrageiras – Centro REF (UFRPE/UAST), Serra Talhada-PE.....	25

Figura 6 – Acidez titulável total (A), pH (B), Condutividade elétrica (C) em genótipos de palma forrageira sob diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino. Letras diferentes indicam diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), maiúsculas entre os clones, minúsculas entre as lâminas de irrigação.....	29
Figura 7 – Carboidratos solúveis totais (A), composto fenólicos totais (B), teor de potássio (C), teor de fósforo (D), em genótipos de palma sob diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino. Letras diferentes indicam diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), maiúsculas entre os clones, minúsculas entre as lâminas de irrigação.....	31
Figura 8 – Permeabilidade ao vapor de água (A), Solubilidade em água (B), Resistência à tração (C) e Teor de umidade (D) em genótipos de palma forrageira sob diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino. Letras diferentes indicam diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), maiúsculas entre os clones, minúsculas entre as lâminas de irrigação .....	34
Figura 9 – Massa residual e curvas DTG de filmes à base de mucilagem de palma forrageira <i>Nopalea cochenillifera</i> (L.) Salm-Dyck – IPA (A, C) e <i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw – OEM (B, D), cultivadas sob diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino. ....	37
Figura 10 – Cor e luminosidade padrão (A), Chroma (B) em genótipos de palma forrageira sob diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino .....	40
Figura 11 – Aspecto visual em filmes biopoliméricos em mucilagem de palma forrageira dos clones Ipa ( <i>nopalea cochenellifera</i> (L.) Salm-Dyck) (A, B, C, D) e Orelha de Elefante Mexicana ( <i>Opuntia stricta</i> (Haw.).....	41
Figura 12 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície em filmes biopoliméricos em dois clones de palma forrageira IPA colhidos sobre quatro lâminas de irrigação no semiárido brasileiro .....	42
Figura 13 – Espectro de infravermelho na mucilagem (A,B) e filmes biopoliméricos (C,D) obtidos à base de mucilagem dos clones IPA ( <i>Nopalea cocenillifera</i> (L.) Salm-Dyck) e Orelha de Elefante Mexicana ( <i>Opuntia stricta</i> (Haw)Haw.), cultivadas sob diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino .....	44
Figura 14 – Biplots da análise de componentes principais com base em médias padronizadas de variáveis da mucilagem e dos filmes poliméricos, imediatamente após a colheita do cladódio e após os tratamentos 0% da ETc, 40% da ETc, 80% da ETc, 120% da ETc para as espécies estudadas, a saber, <i>Nopalea cochenillifera</i> (L.) Salm-Dyck - IPA e <i>Opuntia stricta</i> (Haw.) Haw - OEM. Nota: CE: Condutividade Elétrica; CFT: compostos fenólicos; FTIR MU: espectroscopia de infravermelho; ATT: Acidez Titulável Total; P: Potássio; K+: Fósforo; Na+:	

Sódio; CST: Carboidratos Solúveis Totais; RT: resistência à tração; TU: teor de umidade; SA: solubilidade em água; PVA: permeabilidade a vapor d'água; Esp: espessura .....46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físico-químicas do solo da área experimental .....	16
Tabela 2 – Resumo da análise de variância dos efeitos das lâminas de irrigação e genótipos de palma forrageira sobre as propriedades físico-químicas da mucilagem.....	27
Tabela 3 – Rendimento de mucilagem de cladódios de palma forrageira colhidos em diferentes lâminas de irrigação (efeito simples).....	28
Tabela 4 – Teor de sódio (g.100g-1 MS). Em função das lâminas de irrigação e genótipos de palma forrageira (efeitos de interação lâmina de irrigação versus genótipo).....	32
Tabela 5 – Resumo da análise de variância dos efeitos de dois clones de palma forrageira e da lâmina de irrigação sobre as propriedades dos filmes biopoliméricos da mucilagem de palma forrageira .....	33
Tabela 6 – Espessura em função das lâminas de irrigação e genótipos de palma forrageira (efeitos de interação lâmina de irrigação versus genótipo) .....	36

Tabela 7 – Parâmetros térmicos dos filmes poliméricos de mucilagem de palma forrageira clones Ipa ( <i>Nopalea cochenillifera</i> (L) Salmy-Dyck) (IPA) e Orelha de elefante Mexicana ( <i>Opuntia stricta</i> (Haw). Haw.) (OEM).....	38
--	----

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
2.1 Localização da área de estudo e condições meteorológicas .....	13
2.2 Cultivo de clones de palma forrageira sob diferentes regimes hídricos .....	16
2.3 Manejo no campo das plantas .....	16
2.4 Obtenção da mucilagem.....	17
2.5 Caracterização físico-química da mucilagem .....	19
2.5.1 Rendimento de mucilagem.....	19
2.5.2 Acidez titulável total, potencial hidrogênico e condutividade elétrica .....	19
2.5.3 Teor de sódio, teor de potássio e teor de fósforo .....	19
2.5.4 Carboidratos solúveis totais e compostos fenólicos totais .....	20

2.6	Formulação dos filmes biopoliméricos.....	20
2.7	Caracterização físico-química dos filmes biopoliméricos .....	21
2.7.1	Espectroscopia no Infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) .....	21
2.7.2	Permeabilidade a vapor de água.....	22
2.7.3	Solubilidade em água e Teor de umidade .....	22
2.8	Caracterização óptica e microestrutural dos filmes poliméricos .....	23
2.8.1	Cor.....	23
2.8.2	Microscopia eletrônica de varredura .....	23
2.9	Propriedades mecânicas e espessura dos filmes .....	24
2.9.1	Resistência à tensão.....	24
2.9.2	Espessura.....	24
2.10	Propriedades térmicas .....	24
2.11	Delineamento experimental .....	24
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	26
4	CONCLUSÕES .....	47
	REFERÊNCIAS .....	48

## 1 INTRODUÇÃO

A maioria dos plásticos sintéticos de origem petroquímica apresentam resistência à degradação após seu descarte. Dessa forma, estão em conflito direto com as práticas sustentáveis. Com o aumento das preocupações ambientais, torna-se importante buscar soluções de embalagens sustentáveis. O desenvolvimento de materiais ecológicos com polímeros biodegradáveis está logrando um interesse crescente, especialmente para utilização em embalagens (GHERIBI *et al.*, 2019). Além disso, o desenvolvimento de biopolímeros a partir de subprodutos e resíduos agrícolas é uma tendência global e um dos principais desafios do novo milênio (GHERIBI *et al.*, 2018).

Um biopolímero que tem sido amplamente estudado é a mucilagem de palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea* spp.), planta da família das *cactáceas*, devido suas propriedades funcionais e seu potencial no prolongamento da vida útil e na preservação da qualidade dos alimentos (GHERIBI; KHWALDIA, 2019). As mucilagens, ou hidrocolóides naturais, são polissacarídeos complexos de fluxo elástico, com capacidade de formar rede molecular, propriedade de barreira ao oxigênio e óleo, solubilidade em água, comportamento de geleificação e propriedade emulsificante que permite sua aplicação industrial (DE ANDRADE VIEIRA *et al.*, 2021; GHERIBI *et al.*, 2018). Portanto, constituem-se materiais interessantes para o desenvolvimento de filmes para embalagens biodegradáveis (GHERIBI *et al.*, 2019).

A palma forrageira possui grande importância nas regiões semiáridas do Nordeste brasileiro, pela sua ampla disponibilidade e por apresentar excelente resistência climática, suportando alta insolação, solos pobres e baixa pluviosidade (ANDRADE VIEIRA *et al.*, 2021), apresentando grande extensibilidade de uso, por exemplo, na alimentação animal. Apesar disso, as concentrações e características da mucilagem de palma forrageira dependem do genótipo (DU TOIT *et al.*, 2019), de variações ambientais e do horário de colheita (ARAÚJO *et al.*, 2021; SOUZA *et al.*, 2022). Essas variações causam diferenças no rendimento, viscosidade e na estabilidade físico-química da mucilagem de diferentes clones de palma forrageira. Além disso, essa instabilidade dificulta a padronização de formulações de uma cadeia polimérica mais estável, bem como o seu uso como material de embalagem mais autônoma, ou com adição de coadjuvantes que fortaleçam a cadeia polimérica (ANDRADA, 2022).

A produção de mucilagem pode ser afetada por variações sazonais (MESSINA *et al.*, 2021). Com base na classificação do regime hídrico do semiárido brasileiro realizada por Queiroz *et al.* (2020), a época chuvosa tem precipitação pluvial média de 323 mm e a época

seca tem precipitação de 1 mm, o que influencia em alterações nas propriedades físico-químicas da mucilagem. Isso foi observado no trabalho de Pinheiro (2023), no qual a estação chuvosa ou a transição chuvosa-seca, produzem filmes biopoliméricos de melhor qualidade. A partir dessas evidências, acredita-se que a hidratação dos cladódios como consequência da irrigação é um fator ambiental fortemente ligado à qualidade de filmes biopoliméricos. Assim, a disponibilidade de água para a planta de palma forrageira altera as propriedades físico-químicas da mucilagem e, conseqüentemente, afetam as propriedades tecnológicas do filme biopolimérico, podendo haver uma lâmina de irrigação no semiárido brasileiro no qual proporcionará melhores propriedades tecnológicas ao filme biopolimérico. Além disso, essa anuência na disponibilidade de água pode ser específica para cada genótipo de palma forrageira.

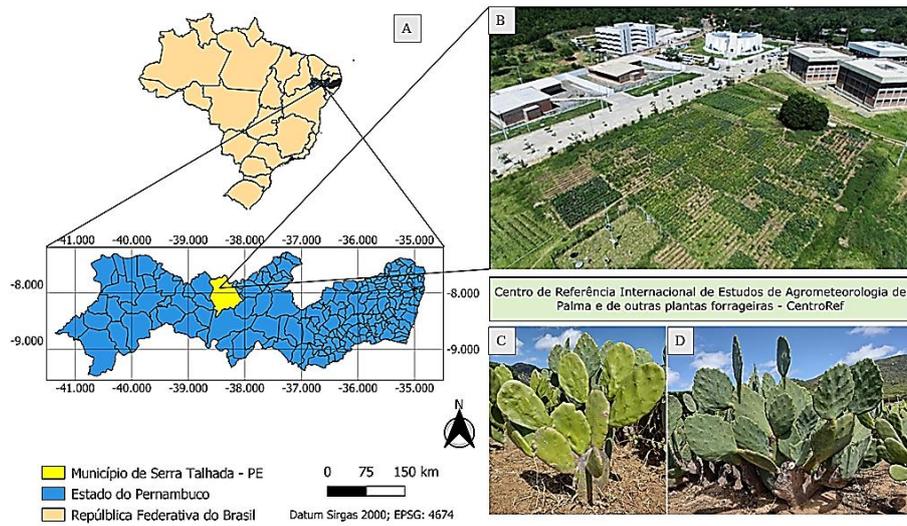
Portanto, o presente estudo teve como objetivo identificar lâminas de irrigação adequadas para a produção de cladódios de palma forrageira dos gêneros *Nopalea* e *Opuntia*, destinados à obtenção de mucilagem para fins industriais, como uso em filmes biopoliméricos.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Localização da área de estudo e condições meteorológicas**

O estudo foi desenvolvido na Universidade Federal Rural de Pernambuco/ Unidade Acadêmica de Serra Talhada – UFRPE/UAST, no “Centro de Referência Internacional de Estudos de Agrometeorologia de Palma e outras Plantas Forrageiras”, município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil (Latitude 7°56’20” Sul; Longitude 142 38°17’31” Oeste e Altitude 499 m) (Figura 1).

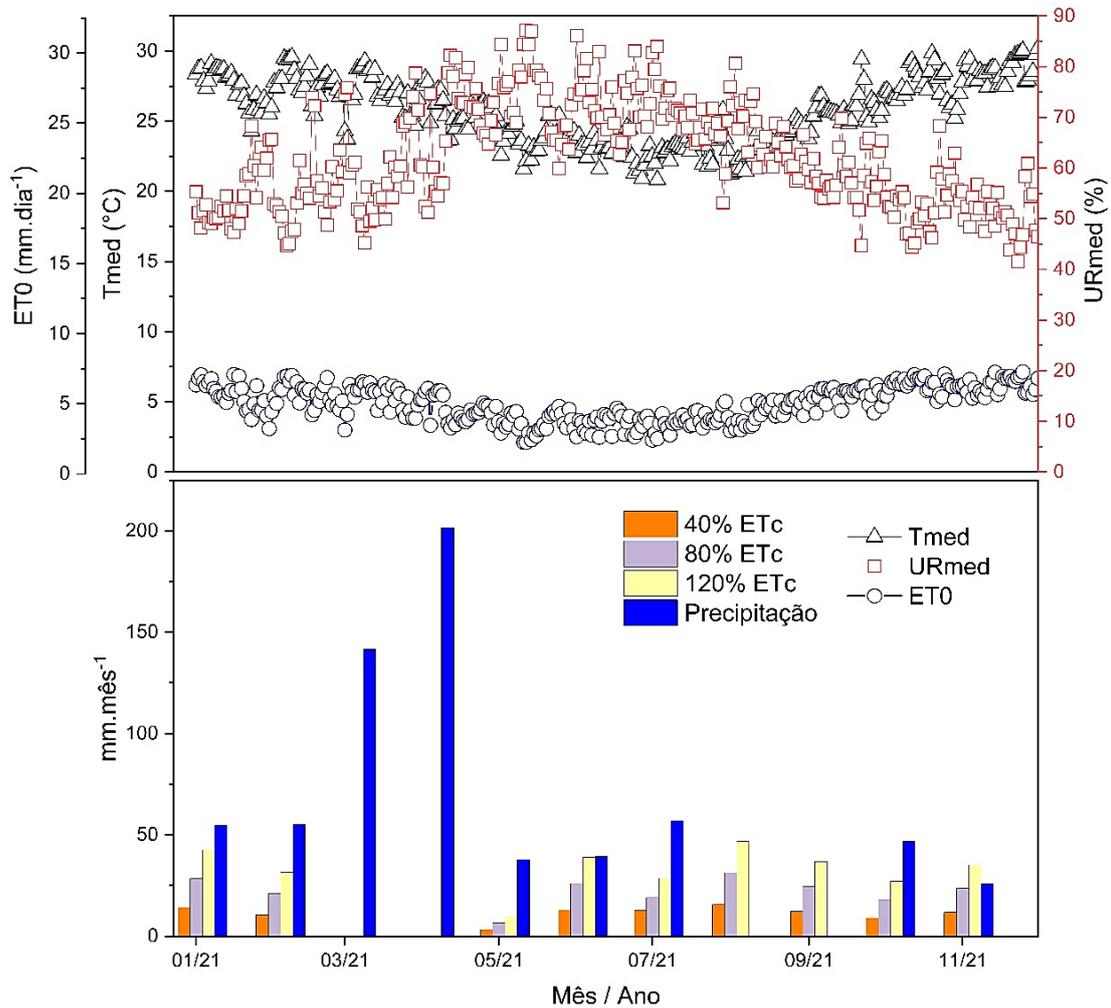
Figura 1 – Localização das áreas experimentais do Centro de Referência Internacional de Estudos de Agrometeorologia de Palma e outras Plantas Forrageiras - CentroRef



Fonte: Imagem do próprio autor.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é classificado como BSw<sup>h</sup> (ALVARES *et al.*, 2013), apresenta precipitação pluvial média de 642 mm ano<sup>-1</sup> e demanda atmosférica acima de 1.800 mm ano<sup>-1</sup>, com valores médios anuais de temperatura e umidade relativa do ar de 24,8 °C e 63%, respectivamente (SILVA *et al.*, 2015). (Figura 2)

Figura 2 – Condições meteorológicas e disponibilidade hídrica via irrigação e precipitação durante o período experimental



Fonte: Imagem do próprio autor.

O solo local é classificado como Cambissolo Háplico esta Eutrófico Típico, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS *et al.*, 2018), sendo suas características físico-químicas descritas na (Tabela 1).

Tabela 1 – Características físico-químicas do solo da área experimental

<b>Características químicas</b>											
Prof. (cm)	CEes mS cm <sup>-1</sup>	pH	C	MO	P	K	Na	Ca	Mg	CTC	V
			g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	mg dm <sup>-3</sup>	---- cmolc dm <sup>-3</sup> ----			%		
0-10	0,87	6,9	5,8	10,02	78,11	1,28	0,04	4,0	1,60	7,4	93,5
10-20	0,52	6,7	4,8	8,28	66,51	0,74	0,03	4,5	2,20	8,2	91,2

<b>Características físicas</b>						
Prof. (cm)	Densidade ----- g cm <sup>3</sup> -----		Porosidade (%)	Partícula ----- g -----		
	Solo	Partícula	Total	Areia total	Silte	Argila
0-10	1,58	2,43	34,80	833,3	128,4	38,3
10-20	1,60	2,53	36,71	830,4	118,8	50,8

CEes – Condutividade elétrica do estrato de saturação do solo; MO – Matéria orgânica; CTC – Capacidade de troca de cátions; V – saturação por bases.

Fonte: Elaborada pelo autor.

## 2.2 Cultivo de clones de palma forrageira sob diferentes regimes hídricos

Neste experimento foi analisado um ciclo de palma forrageira compostos por dois clones (OEM e IPA) submetidos a quatro regimes hídricos baseados na evapotranspiração da cultura – ETc (0% - sequeiro; 40% - déficit hídrico moderado; 80% - déficit hídrico leve; 120% - regime hídrico superior ao requerimento hídrico da cultura).

## 2.3 Manejo no campo das plantas

Na implantação da área experimental foram realizadas práticas de aração, gradagem e sulcagem, além dos manejos de adubação, irrigação e controle de plantas daninhas ao longo do período experimental.

O plantio da palma forrageira foi realizado obedecendo a um alinhamento, paralelo entre os cladódios e perpendicular entre as fileiras, sendo enterrados 50% do comprimento total dos

mesmos. Para as adubações manteve-se o padrão com a realização do manejo no início de cada ciclo experimental. A lâmina de irrigação a ser aplicada será com base na evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) principal (i.e., a palma forrageira), cujo K<sub>c</sub> é de 0,52, conforme Queiroz *et al.* (2016). A água utilizada para a irrigação das culturas é advinda de um poço artesiano, com condutividade elétrica de 1,62 dS m<sup>-1</sup>. Para a determinação da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), utilizou-se o método de Penman-Monteith, parametrizada conforme o Boletim 56 da FAO (ALLEN *et al.*, 1998). Os dados meteorológicos (temperatura máxima, mínima e média do ar (°C dia<sup>-1</sup>); umidade relativa média, máxima e mínima do ar (% dia<sup>-1</sup>); radiação solar global (MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>); velocidade do vento (m s<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup>) e precipitação pluviométrica (mm dia<sup>-1</sup>) foram obtidos a partir de uma estação meteorológica automatizada, localizada a ~20 m da área experimental, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

A água utilizada foi proveniente de um poço artesiano localizado a aproximadamente 50 metros das áreas experimentais e possui classificação do tipo C3S1, sendo considerada água de alta salinidade (RICHARDS, 1954), com condutividade elétrica média de 1,62 dS m<sup>-1</sup> e pH 6,84, concentração de sódio e potássio média de 168,66 mg L<sup>-1</sup> e 28,17 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente. O controle de pragas e plantas daninhas foram e serão efetuados sempre que necessário. A irrigação foi realizada por meio de sistema de gotejamento, com emissores espaçados a 0,20 m e vazão de 2,25 L h<sup>-1</sup>, a uma pressão de 1 atm. O manejo de irrigação foi realizado em três dias da semana, nas segundas, quartas e sextas-feiras no período da manhã.

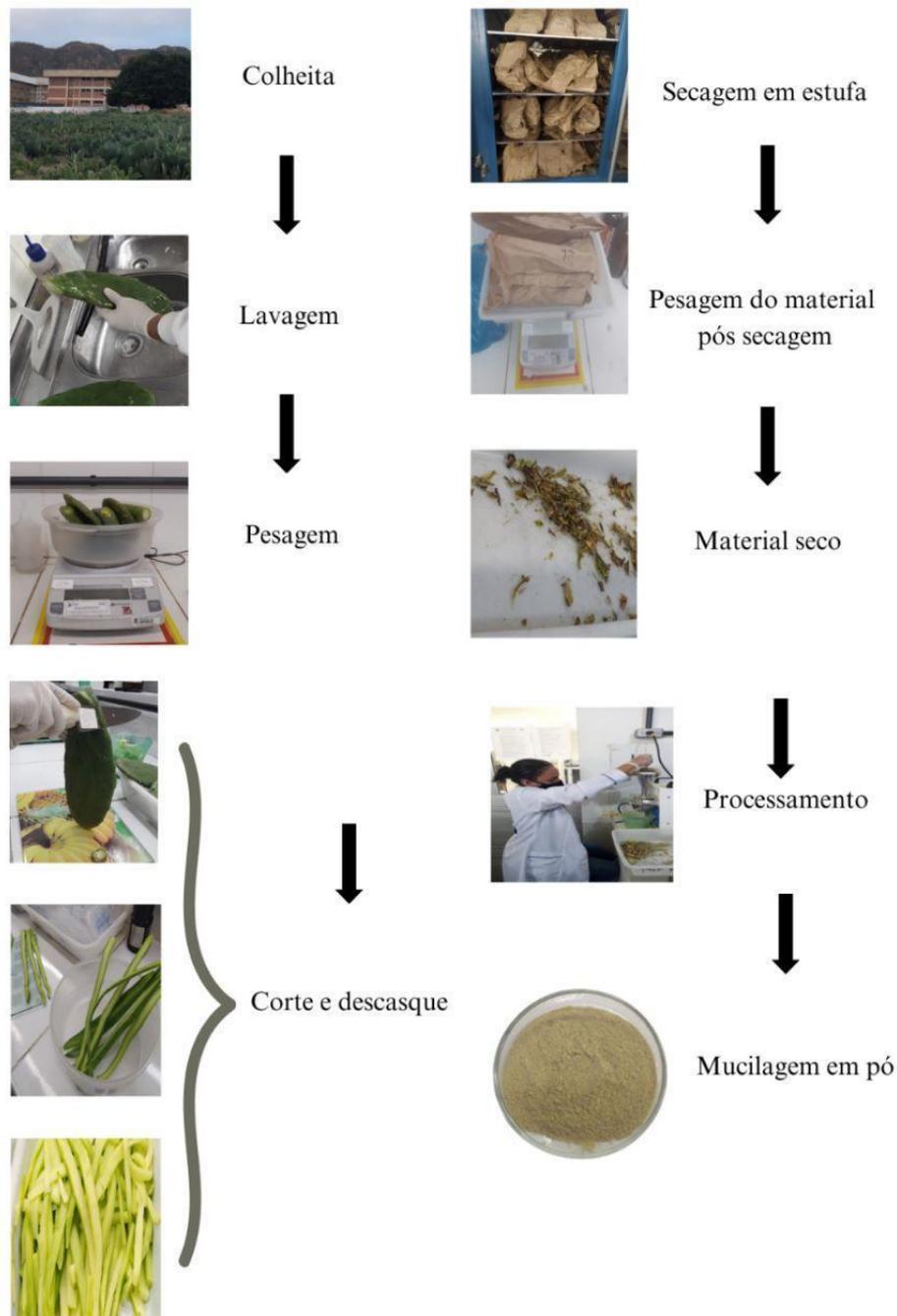
## 2.4 Obtenção da mucilagem

A mucilagem foi obtida através de dois genótipos de palma forrageira, IPA (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck) e Orelha de elefante mexicana (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw) (OEM) (Figura 1C, D). Ambos foram colhidos de uma área de cultivo experimental da UFRPE/UAST (Figura 1B), com tamanho médio para o genótipo OEM 18,4 cm de largura x 1,2 cm de espessura x 31,6 de comprimento, IPA 11,4 cm largura x 1,49 cm espessura x 26 cm de comprimento.

Foram pré-selecionados em campo, todos colhidos de terceira ordem e transportados para os laboratórios do Núcleo de Pós-Graduação em Produção Vegetal. Em seguida, os cladódios foram lavados em água corrente, pesados, depois foram retiradas as bordas laterais. Após isso, foi realizado o corte na vertical com 2 cm de espessura, para a remoção da epiderme e, em seguida, a casca removida. O material foi mantido em saco papel Kraft nas dimensões 26cm largura x 33cm comprimento x 17,5cm altura, levado à estufa numa temperatura de 55°C

durante 15 dias. (Figura 4). Posteriormente foram retirados da estufa e, em seguida, as amostras foram trituradas em micromoinho tipo while modelo R-TE-648, para a obtenção de um pó de coloração amarronzado. Para a realização das análises na mucilagem, o pó obtido foi hidratado na concentração de 8% p/v (8g de pó para 100 mL de água destilada).

Figura 3 – Fluxograma de extração de mucilagem em cladódios de palma forrageira Ipa (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck) e Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.)



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 2.5 Caracterização físico-química da mucilagem

### 2.5.1 Rendimento de mucilagem

O rendimento de mucilagem foi quantificado com base no cladódio inteiro para a mucilagem em pó obtida a partir dos cladódios frescos, usando a equação (1):

$$RM = \frac{Mf (g)}{Mi (g)} * 100 \quad (1)$$

Em que: RM = rendimento de mucilagem (%); Mi = massa inicial dos cladódios (g) e Mf= massa de mucilagem em pó (g).

### 2.5.2 Acidez titulável total, potencial hidrogênico e condutividade elétrica

A acidez titulável total (ATT) foi realizada segundo Astello-García *et al.*, (2015), com algumas modificações. A amostra de mucilagem (0,8g) foi hidratada em 50ml de água e titulada com uma solução aquosa de hidróxido 0,1 N (NaOH). Os resultados foram calculados com a equação (2):

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

Em que, N é a concentração normal de NaOH; V, o volume de NaOH usado para titulação (ml); Eq, o equivalente em miligramas de ácido málico (0,067); e M, o peso da amostra (g). Os resultados foram expressos em % de ácido málico.

O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado utilizando-se um pHmetro (TECNAL, TEC-5, Piracicaba, Brasil), via imersão direta do eletrodo na mucilagem.

A Condutividade elétrica (CE) foi realizada através do uso de um condutivímetro (TECNAL, Tec-4MP, Piracicaba, Brasil). O sensor foi inserido diretamente nas amostras de mucilagem hidratada e realizada a leitura. Os resultados foram expressos em mS cm<sup>-1</sup>.

### 2.5.3 Teor de sódio, teor de potássio e teor de fósforo

O material dos genótipos *Nopalea* e *Opuntia*, após secagem, foi triturado em moinho de aço do tipo Willey. Em seguida, armazenado em sacos plásticos identificados, seguindo para análises nutricionais de potássio (K<sup>+</sup>), sódio (Na<sup>+</sup>) e fósforo (P). Para a determinação dos teores de K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> e P, utilizou-se o produto da digestão sulfúrica, conforme a metodologia proposta pela Embrapa (2009).

#### 2.5.4 Carboidratos solúveis totais e compostos fenólicos totais

O conteúdo de carboidratos solúveis (CST) foi obtido conforme metodologia descrita pelo Analytical Biochemistry (DUBOIS *et al.*, 1956). A mucilagem hidratada (2 mL) foi centrifugada (Hettich, MIKRO 220, Berlim, Alemanha) a 10000 rpm, a 4 °C, por 21 min. Uma alíquota de 10 µL do extrato bruto da amostra foi adicionada a 490 µL de água deionizada, 500 µL de fenol 5% e 2,5 mL de ácido sulfúrico concentrado a 98,08% que foi colocada em tubos de ensaio e agitados. Posteriormente, os tubos ficaram em repouso por 10 minutos numa bandeja contendo água em temperatura ambiente. Após decorrido esse tempo, as leituras foram realizadas em espectrofotômetro (Modelo libra S8, Biochrom, fabricado em Cambridge, Inglaterra) a 490 nm. O branco foi constituído por 500 µL de água deionizada, 500 µL de fenol 5% e 2,5 mL de ácido sulfúrico concentrado a 98,08%. Os resultados foram expressos em g de carboidratos solúveis 100 g<sup>-1</sup> de matéria seca e quantificados com base na equação obtida para a curva padrão, cujo carboidrato de referência foi a glicose.

A determinação do teor de compostos fenólicos totais (CFT) foi realizada de acordo com Chandra e Mejía (2004), com algumas modificações. Um volume de 2 mL da mucilagem hidratada foi centrifugado em uma centrífuga (Hettich, MIKRO 220, Berlim, Alemanha) a 10000 rpm, a 4 °C, por 21 min. Uma alíquota de 150 µL do sobrenadante foi combinada com 100 µL de água deionizada e 250 µL de reagente de Folin Ciocalteu (1N). A mistura foi homogeneizada em vórtex (TECNAL, AP56, Araraquara, Brasil) e permaneceu em repouso por 2 minutos. Em seguida, foi adicionado 500 µL de carbonato de sódio a 20% (p/v), e a mistura permaneceu em repouso por mais 10 minutos. Por fim, as leituras foram realizadas em espectrofotômetro (Biochrom, Libra S8, Cambridge, Inglaterra) a 757 nm. Para a construção da curva analítica foi utilizada uma solução padrão de ácido gálico, nas concentrações de 10, 20, 30, 40 e 50 µg. mL<sup>-1</sup>. A quantidade de polifenóis totais foi expressa em microgramas de ácido gálico por miligramas de mucilagem.

#### 2.6 Formulação dos filmes biopoliméricos

No processo de desenvolvimento dos filmes poliméricos foi seguida a metodologia proposta por Gheribi *et al.* (2018), com modificações para as condições locais. O procedimento de formulação deu-se com a mucilagem que foi hidratada na proporção de 8% p/v (8g de pó para 50 mL de água destilada e 50 mL de álcool etílico 70 °INPM) para formação de uma emulsão. Em seguida, o material foi aquecido a 41 °C em agitador magnético, por 5 min, depois

adicionou-se 40% de glicerol, 5% de lactato de cálcio e agitado por mais 5min para ocorrer a homogeneização. Foi transferida com auxílio de uma seringa descartável de 20 ml, uma alíquota de 35 mL do homogeneizado para uma placa de petri plástica. Em seguida, a placa foi levada à estufa por 27 horas a 55 °C (Figura 5). Os filmes obtidos foram retirados da placa de petri com auxílio de espátulas e padronizados para análise.

Figura 4 – Fluxograma da elaboração de filmes poliméricos em cladódios de palma forrageira Ipa (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck) e Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.)



Fonte: Imagem do próprio autor.

## 2.7 Caracterização físico-química dos filmes biopoliméricos

### 2.7.1 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 (FTIR), (modelo Frontier da Perkin Elmer®), utilizando o acessório universal de reflexão total atenuada (UATR). Os espectros foram adquiridos na região de  $4000\text{-}400\text{cm}^{-1}$ , resolução  $4\text{cm}^{-1}$  e 8 varreduras. O branco foi o ar e as medidas realizadas diretamente no biofilme, sob o cristal de diamante.

### 2.7.2 Permeabilidade a vapor de água

A permeabilidade a vapor de água foi medida de acordo com o método ASTM E96/E96M (2015), com algumas modificações. Amostras dos filmes foram posicionadas de forma a cobrir os béqueres contendo cerca de 70 g de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), para obter aproximadamente 10mm de distância entre o carbonato e a amostra. Os béqueres foram então colocados em dessecador, com temperatura e umidade relativas monitoradas a 25 °C e 75% UR. O transporte de vapor d'água foi determinado pelo peso ganho nos béqueres e as inclinações (mudanças de peso em função do tempo) foram calculadas por regressão linear ( $R^2 > 0,99$ ). A permeabilidade ao vapor d'água ( $\text{g mm/m}^2 \text{ d kPa}$ ) foi calculada usando a equação (3):

$$WVP = \frac{WVTR * X}{\Delta p} \quad (3)$$

Em que: *WVTR*: é a taxa de transmissão de vapor d'água ( $\text{g/m}^2\text{d}$ ) definida como a inclinação ( $\text{g/d}$ ) dividida pela área de transferência ( $\text{m}^2$ ); *X*: espessura do filme ( $\text{mm}$ );  $\Delta p$  ( $\text{kPa}$ ) é a diferença de pressão de vapor d'água parcial através do filme ( $\Delta p = p (RH_2 - RH_1) = 2.22 \text{ kPa}$ , em que *p* é a pressão de vapor de saturação da água a 25 °C,  $RH_2 = 75\%$  e  $RH_1 = 0\%$ ).

### 2.7.3 Solubilidade em água e Teor de umidade

A solubilidade em água foi realizada com fragmentos de 2,0 x 2,0 cm dos biofilmes, secos em estufa a 55 °C por 24h, resfriados à temperatura ambiente em dessecador, pesados e imersos em 50 mL de água destilada a 25 °C durante 30 min. Após isso, os fragmentos não dissolvidos foram armazenados na estufa por 24h a 55 °C, colocados no dessecador para esfriar e pesados ao final do processo. A solubilidade em água foi determinada pela equação (4):

$$SA = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (4)$$

Em que: SA = Solubilidade em Água (%);  $M_i$ : Massa inicial dos fragmentos (g);  $M_f$ : Massa final dos fragmentos (g).

O teor de umidade foi aferido com corte dos filmes em áreas de 2,0 x 2,0 cm e pesados. Após isso, foram levados à estufa por 24h a 55 °C até peso constante (peso da amostra seca). A pesagem final dos fragmentos determinou o teor de umidade dos biofilmes, calculado pela fórmula (5):

$$TU = \frac{Mi - Mf}{Mi} \times 100 \quad (5)$$

Em que: TU: Teor de Umidade (%); Mi: Massa inicial dos fragmentos (g); Mf: Massa final dos fragmentos (g).

## 2.8 Caracterização óptica e microestrutural dos filmes poliméricos

### 2.8.1 Cor

A cor foi obtida através de um calorímetro (RS - 232 com saída serial RGB - 1002) com valores obtidos no sistema RGB. Os dados obtidos pelo calorímetro foram divididos por 4 para adequação a escala RGB (0 - 255) e então, convertidos na escala de cores CIE L\*, a\*, b\* (ALVARENGA PINTO COTRIM; MOTTIN; AYRES, 2016a). Em que L\* corresponde a variações na luminosidade da amostra (0 a 100, mais escura a mais clara), a\* corresponde a variações de verde (- a) a vermelho (+ a), e b\* e atribuída a variações entre azul (- b) a amarelo (+ b). A conversão de valores foi realizada usando software on-line disponível em um site público: <http://www.easyrgb.com/en/convert.php#Result>. Posteriormente, o conjunto de dados de a\* e b\* foi convertido e expresso em valores de saturação de Chroma (C\*) de acordo com a metodologia de ESPINO-DIAZ et al., (2010), em que:

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (6)$$

### 2.8.2 Microscopia eletrônica de varredura

A morfologia da superfície dos filmes foi observada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), usando um microscópio eletrônico de varredura (3400N SEM, S) sob as condições padrão de alto vácuo, a uma tensão de 5 kV. As amostras de filmes foram pulverizadas com partículas de ouro para contraste da imagem.

## **2.9 Propriedades mecânicas e espessura dos filmes**

### **2.9.1 Resistência à tensão**

A resistência à tração (RT) foi realizada usando uma máquina de tração (IMPAC, IP–AEL–A–50, São Paulo, Brasil) de acordo com o método proposto por GHERIBI *et al.*, (2018), com modificações. Para cada formulação de filme, 3 tiras de filme retangulares (20 mm x 70 mm) foram testadas a uma velocidade de cabeça de 100 mm/min, usando um grampo duplo com uma separação de 50 mm.

### **2.9.2 Espessura**

A espessura (em mm) foi medida em 10 pontos aleatórios dos filmes com um micrômetro digital, com resolução de 1  $\mu\text{m}$ , sendo realizada uma média (GHERIBI *et al.*, 2018).

## **2.10 Propriedades térmicas**

A estabilidade térmica dos filmes foi avaliada por TGA, usando o equipamento TGA2 (Mettler Toledo). O experimento foi realizado sob atmosfera de nitrogênio, com varredura de aquecimento de 35 a 600 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C por minuto para cada amostra.

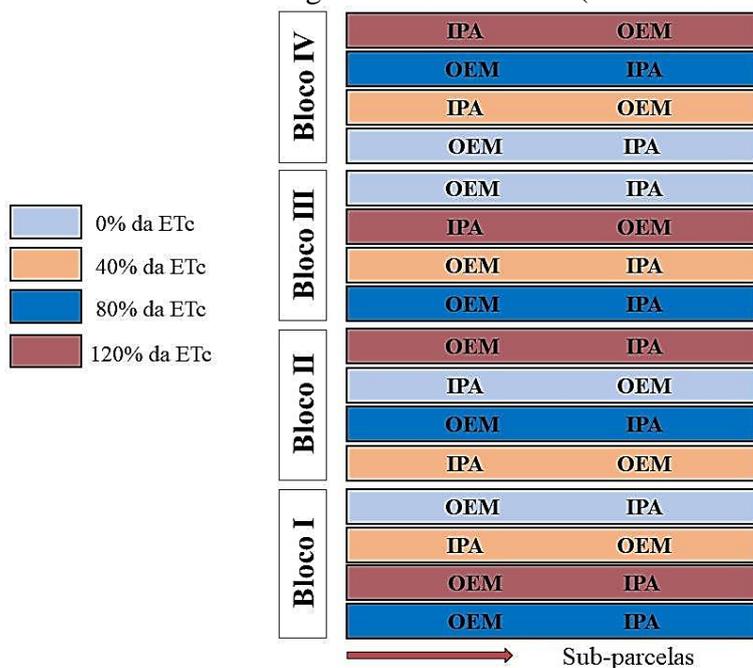
## **2.11 Delineamento experimental**

O plantio da palma obedeceu ao espaçamento de 1,00 m entre fileiras e 0,20 m entre plantas, representando uma densidade de 50.000 plantas  $\text{ha}^{-1}$ . O delineamento experimental utilizado foi em blocos ao acaso (DBC), em esquema fatorial 4x2 (em parcelas subdivididas), e quatro repetições (Figura 3). Cada parcela foi caracterizada por um regime hídrico, enquanto as subparcelas foram constituídas pelos clones de palma forrageira. Cada subparcela foi composta por quatro fileiras com 25 plantas cada, arranjadas em uma área de 20  $\text{m}^2$ . Já as parcelas eram compostas por 2 subparcelas, totalizando uma área de 40  $\text{m}^2$ .

O primeiro ciclo experimental foi iniciado em janeiro de 2017, estendendo-se até meados de junho de 2018, enquanto o segundo ciclo iniciou-se em fevereiro de 2019 com

término em agosto de 2020. Ambos tiveram duração de aproximadamente 18 meses. Mais dois ciclos experimentais foram conduzidos, sendo o corte de uniformização feito em novembro de 2020 e a colheita em janeiro de 2022.

Figura 5 – Arranjo experimental, com diferentes clones de palma forrageira cultivados no Centro de Referência Internacional de Estudos Agrometeorológicos de Palma e Outras Plantas Forrageiras – Centro REF (UFRPE/UAST), Serra Talhada-PE



Fonte: Imagem do próprio autor.

As análises foram conduzidas em quadruplicata e os dados foram submetidos aos testes de normalidade e teste de Tukey a 5% de probabilidade, com o auxílio do *software* R versão 4.2.1. Para as análises de regressões, utilizou-se o *software* Sigma Plot versão 14 e os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, adotando-se o nível de 1% de probabilidade e os coeficientes de determinação ( $R^2$ ). Os gráficos foram elaborados utilizando-se o *software* Sigma Plot versão 14 e OriginLab versão 8.5. Para a análise de componentes principais (PCA), foi usada a ferramenta de *software* R (R CORE TEAM, 2022), na qual os meios dos dados das propriedades estudadas foram decompostos em conjuntos de vetores ortogonais. Os resultados da matriz de correlação foram exibidos em biplots, com sua distribuição no espaço de ordenações, variâncias e correlação de Pearson.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Influência da lâmina de irrigação na qualidade da mucilagem

As propriedades físico-químicas e tecnológicas da mucilagem de palma forrageira foram influenciadas por fatores separados: ou por genótipo e lâmina de irrigação ou por sua interação ( $p < 0,05$ ) (Tabela 2). Exceto o rendimento de mucilagem (RM), teor de sódio ( $\text{Na}^+$ ) (Tabela 2). O componente genótipo afetou todas as variáveis físico-químicas, com exceção do sódio ( $\text{Na}^+$ ), ou seja, os genótipos estudados apresentam propriedades físico-químicas específicas, diferentes entre si, estatisticamente, com exceção para o  $\text{Na}^+$  (Tabela 2). A maioria das propriedades também foi alterada pelo fator lâmina de irrigação, exceto para o rendimento de mucilagem (RM), sólidos solúveis totais (SST) e teor de sódio ( $\text{Na}^+$ ). A interação entre o genótipo e a lâmina de irrigação foi decisiva na alteração dos valores de carboidratos solúveis totais (CST), compostos fenólicos totais (CFT), acidez total titulável (ATT), pH, teor de potássio ( $\text{K}^+$ ), teor de fósforo (P), condutividade elétrica (CE) (Tabela 2).

Tabela 2 – Resumo da análise de variância dos efeitos das lâminas de irrigação e genótipos de palma forrageira sobre as propriedades físico-químicas da mucilagem

F.V	G.L	Quadrado médio				
		RM	CST	CFT	ATT	
Lâmina (L)	3	0,52ns	53,5**	16,521**	0,070**	
Genótipo(G)	1	3,54**	714,89**	77,95**	0,557**	
L x G	3	1,15ns	7,61**	2,926**	0,052ns	
Erro 1		0.332	0.630	0.237	0.0087	
Erro 2		0.563	0.510	0.389	0.0502	
CV1 (%)		36,14	5,96	2,03	5,41	
CV2 (%)		47,09	4,61	2,61	12,96	

F.V	G.L	Quadrado médio				
		pH	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	P	CE
Lâmina (L)	1	4,26**	0.00090ns	8,976**	0,043**	0,4227**
Genótipo (C)	3	0,23**	0,00041 ns	5,0836**	0,087**	8,5284**
L x G	3	0,29**	0.00183**	0,879**	0,0207**	1,9165**
Erro 1		0,0115	0,00024	0,032	0,0039	0,0040
Erro 2		0,0115	0,00012	0,052	0,0056	0,0119
CV1 (%)		2.13	14,28	5,85	15,27	2,97
CV2 (%)		2.17	10,15	7,42	18,21	5,12

F.V: fonte de variação; G.L: grau de liberdade; RM: rendimento de mucilagem; CST: carboidratos solúveis totais; (°Bx); CFT: compostos fenólicos totais; ATT: Acidez titulável total; pH: potencial hidrogeniônico; Na<sup>+</sup>: Sódio; K<sup>+</sup>: potássio; P: fósforo; CE: condutividade elétrica. \*\*  $p < 0,05$ ; \*  $p < 0,01$ ; ns: não significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao analisar os efeitos isolados dos clones na variável RM, observou-se que o genótipo OEM apresentou maior rendimento em relação ao IPA (Tabela 3).

Tabela 3 – Rendimento de mucilagem de cladódios de palma forrageira colhidos em diferentes lâminas de irrigação (efeito simples)

Clone	RM (%)
IPA	1,26 ± 0,37 b
OEM	1,92 ± 0,24 a

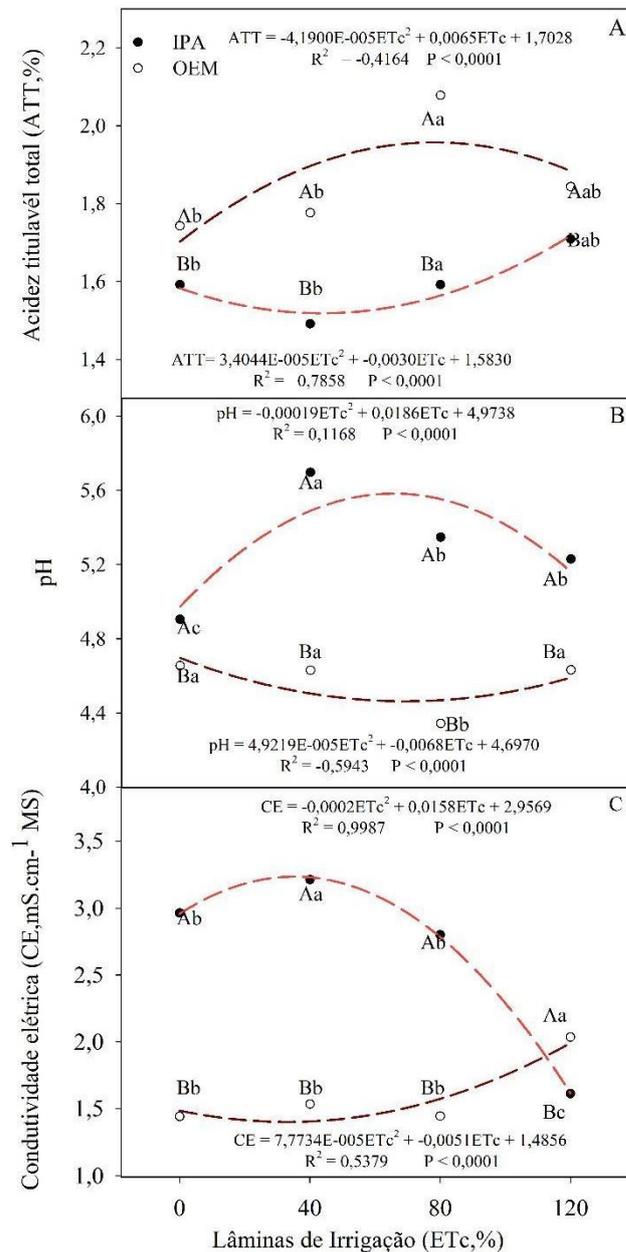
Nos efeitos isolados dos Clones: os valores médios seguidos pelas mesmas letras na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

Fonte: Elaborada pelo autor.

Um dos maiores obstáculos na utilização da mucilagem no setor agroindustrial é o rendimento, pois a baixa produção de mucilagem pode dificultar seu uso. O presente trabalho em estudo apresentou resultado semelhante ao encontrado na literatura para o cacto do gênero *nopalea*, contudo, o do gênero *Opuntia* proporcionou maiores rendimentos de mucilagem. Essas mudanças no desempenho da mucilagem observadas podem ser devido a vários fatores. O método de extração, a idade do cladódio, o tamanho dos cladódios, as condições climáticas e o manejo aplicado podem alterar a quantidade e qualidade da mucilagem extraída (Gheribi e Khwaldia, 2019; Du Toit *et al.*, 2019 6). Por meio da PCA, essa característica foi associada a menor lâmina de irrigação usada (Figura 14A).

O genótipo IPA apresentou menor valor de ATT, por outro lado, maiores de pH e CE (Figura 6 A, B e C). Além disso, houve uma tendência de que, com o aumento na lâmina de irrigação de pelo menos até 80%, a acidez e a CE aumentaram nos dois clones (Figura 6A e C). A tendência dos valores de pH não foi relatada (Figura 6B).

Figura 6 – Acidez titulável total (A), pH (B), Condutividade elétrica (C) em genótipos de palma forrageira sob diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino. Letras diferentes indicam diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), maiúsculas entre os clones, minúsculas entre as lâminas de irrigação.



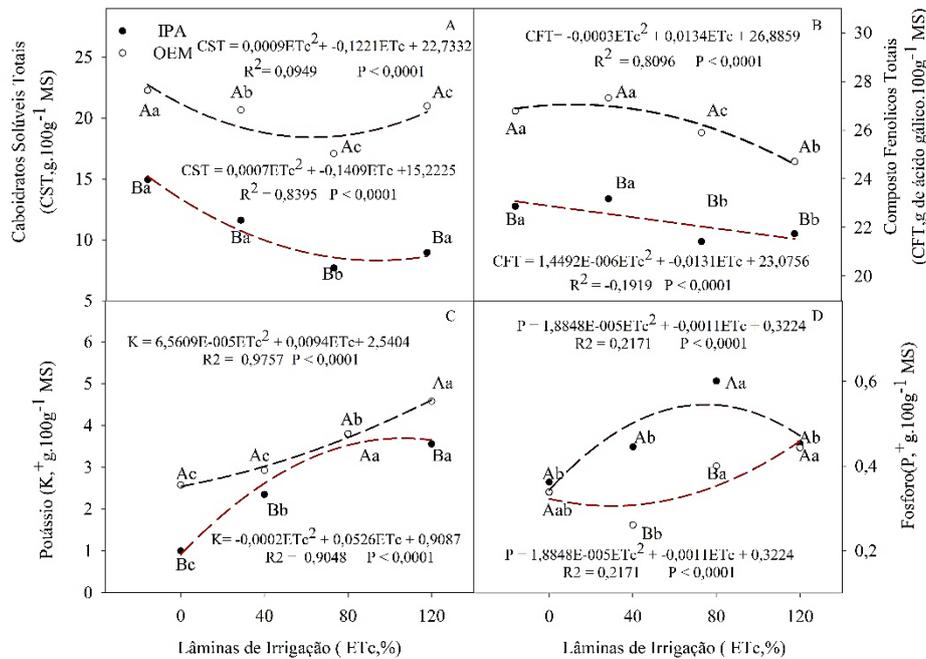
Fonte: Imagem do próprio autor.

Analisando os resultados de ATT, pH e CE para determinar as correlações entre esses parâmetros estudados, nota-se um comportamento de crescimento relativamente igual para pH e CE. À medida que a aplicação dessas lâminas de irrigação aumenta, as variáveis analisadas diminuem proporcionalmente, contribuindo para o aumento proporcional da ATT. A faixa de

pH observada no estudo atual foi de 4,47 a 5,7 levemente ácido. Esse é um aspecto interessante da produção de filmes, pois Espino-Diaz *et al.* (2010) estudaram a variação do pH na mucilagem a base de cactos e observaram que filmes confeccionados com pH na faixa entre 5,0 e 7,0 apresentam melhores propriedades mecânicas e melhor espessura. A condutividade estima a concentração de íons e é um fator que afeta diretamente a viscosidade da mucilagem, interferindo em seu processamento e em sua capacidade de produzir filmes biopoliméricos. Sabe-se que a adição de íons positivos tende a diminuir a repulsão e, conseqüente, expansão molecular, o que significa que a viscosidade diminui (KREVELEN, 1990). A concentração de íons, como  $K^+$ ,  $P$ ,  $Na^+$ , também foram quantificados no trabalho atual (Figura 7C e D, Tabela 4). No entanto, esses íons apresentam um sutil aumento na presença das lâminas de irrigação. Entende-se que além de  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $P$ , a mucilagem também contém íons de cálcio e magnésio em sua composição (MONRROY *et al.*, 2017), o que poderia explicar a leve queda na condutividade elétrica.

Observou-se que o genótipo IPA apresentou, de forma geral, menores teores de CST, CFT e  $K^+$ , em relação ao genótipo OEM (Figura 7 A, B e C). No caso do fósforo, o IPA destacou-se com maiores teores nas lâminas de 40 e 80% da ETc (Figura 7D). Para o  $Na^+$ , apenas o OEM na lâmina controle destacou-se significativamente em relação ao IPA (Tabela 4). É evidente também que o incremento gradativo nas lâminas de irrigação, evidenciados pelo aumento da ETc, proporcionou uma queda gradativa nos teores de CST e CFT, em ambos os clones (Figura 7A e B). Por outro lado, para potássio e fósforo aconteceu o inverso, ou seja, um incremento gradativo desses elementos inorgânicos (Figura 7C e D). Esse comportamento foi observado para o  $Na^+$  apenas entre a lâmina controle e as demais no genótipo OEM (Tabela 4).

Figura 7 – Carboidratos solúveis totais (A), composto fenólicos totais (B), teor de potássio (C), teor de fósforo (D), em genótipos de palma sob diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino. Letras diferentes indicam diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), maiúsculas entre os clones, minúsculas entre as lâminas de irrigação.



Fonte: Imagem do próprio autor.

O maior teor de compostos fenólicos da mucilagem de OEM em relação à IPA foi um comportamento relatado anteriormente (ARAÚJO *et al.*, 2021; SOUZA *et al.*, 2022). A redução de CFT, com o aumento das lâminas de irrigação, pode estar associada à redução de estresses, pois acúmulo de metabólitos secundários depende de fatores bióticos e abióticos (ASTELLO-GARCÍA *et al.*, 2015). Os maiores valores de CST foram encontrados no genótipo OEM. Com o crescimento das lâminas de irrigação houve redução do CST (Figura 7A). Esse é um comportamento que pode estar associado ao aumento da disponibilidade de água, pois a produção de mucilagem muda de acordo com a pluviosidade da área (SÁENZ; SEPÚLVEDA; MATSUHIRO, 2004).

Os minerais desempenham papel crucial na formação das plantas. O  $K^+$ ,  $P_2O_5$ - e  $Na^+$  são imprescindíveis para os processos fisiológicos das plantas, incluindo metabolismo e fotossíntese. Por exemplo, a palma forrageira apresenta uma maior absorção de potássio do solo, o que significa que a planta precisa desse nutriente para realizar algumas atividades, como ativação do sistema enzimático e participação nos processos de fotossíntese (DUBEUX

JÚNIOR & SANTOS, 2005). A faixa de potássio em palma forrageira encontrada na literatura fica entre 19,4 e 65,8 g por Kg de MS. Moritani *et al.*, (2017), mostram que o teor de potássio é indispensável para os processos metabólicos e para o crescimento das plantas em condições não salinas. No presente estudo, percebe-se que houve um efeito significativo, com aumento da lâmina de irrigação com o teor de  $K^+$  e P na mucilagem de palma forrageira, o que pode se justificar pelo acúmulo de potássio na água usada para irrigação, visto que essa água é proveniente de um poço artesiano onde tem concentração de potássio de  $28,17 \text{ mg L}^{-1}$ . No caso do sódio, pôde-se observar que houve uma queda na concentração, na medida em que aumentou a lâmina de irrigação (Tabela 4). Isso se justifica pelo desbalanço de minerais na composição da palma forrageira, em que os teores de  $Na^+$  são menores (mesmo que na água usada na irrigação tenha uma alta concentração de sódio de  $168,66 \text{ mg L}^{-1}$ ).

Tabela 4 – Teor de sódio (g.100g-1 MS). Em função das lâminas de irrigação e genótipos de palma forrageira (efeitos de interação lâmina de irrigação versus genótipo)

Efeito de interação		
Lâmina (% da ETc)	$Na^+$	
	IPA	OEM
0	0,098 ± 0,00 Ba	0,150 ± 0,01Aa
40	0,101 ± 0,01 Aa	0,101 ± 0,00 Ab
80	0,116 ± 0,01 Aa	0,107 ± 0,02Ab
120	0,109 ± 0,00Aa	0,096 ± 0,00Ab

Letras diferentes indicam diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), maiúsculas entre os clones, minúsculas entre as lâminas de irrigação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2 O aumento na lâmina de irrigação modula significativamente a qualidade de filmes biopoliméricos, especificamente para cada clone estudado

As propriedades dos filmes biopoliméricos de palma forrageira foram influenciadas por fatores individuais, genótipo e lâmina de irrigação e por sua interação ( $p < 0,05$ ) (Tabela 5). O componente genótipo afetou todas as variáveis dos filmes biopoliméricos, ou seja, os genótipos estudados apresentam filmes com propriedades específicas, diferentes entre si, estatisticamente.

A maioria das qualidades L, C, TU, SA, PVA e RT foram modificadas pelo fator lâmina de irrigação. Com exceção da Esp, a interação entre o genótipo e a lâmina de irrigação foi determinante para a alteração dos valores de luminosidade (L), chroma (C) espessura (Esp), teor de umidade (TU), solubilidade em água (SA) e resistência à tração (RT) (Tabela 5).

Tabela 5 – Resumo da análise de variância dos efeitos de dois clones de palma forrageira e da lâmina de irrigação sobre as propriedades dos filmes biopoliméricos da mucilagem de palma forrageira

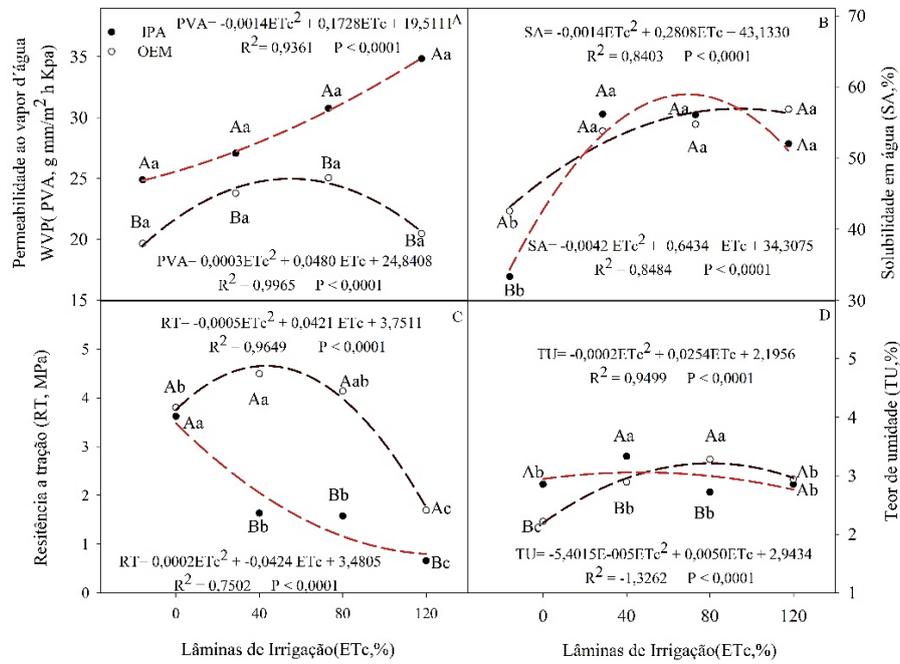
F.V	G.L	Quadrado médio						
		L	C	Esp	TU	SA	PVA	RT
Lâmina (L)	3	42,49**	155,11**	0,009n s	0,496* *	52,71**	54,61**	9,34**
Genótipo (G)	1	193,14**	30,48ns	0,079* *	0,092* *	53,72ns	408,68**	22,06**
L x G	3	98,54**	370,56**	0,03**	0,58**	59,09**	48,62ns	3,21**
Erro 1		4,8	20,56	0,004	0,01	10,96	13,46	0,11
Erro 2		2,67	17,64	0,005	0,01	11,32	34,57	0,11
CV1 (%)		14,36	21,04	9,97	2,85	6,53	14,20	12,51
CV2 (%)		10,71	19,49	10,83	4,70	6,63	22,76	12,27

F.V: fonte de variação; G.L: grau de liberdade; L: luminosidade; C: chroma; Esp: espessura; TU: teor de umidade; SA: solubilidade em água; PVA: permeabilidade ao vapor de água; RT: resistência à tração. \*\*  $p < 0,05$ ; \*  $p < 0,01$ ; ns: não significativo ao nível de 5% pelo teste de Tukey.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A permeabilidade a vapor de água e a espessura foram claramente maiores no genótipo IPA em relação ao OEM (Figura 8A e Tab. 6). Por outro lado, o genótipo OEM apresentou filmes mais resistentes em relação ao IPA, independente da lâmina (Figura 8 C). Além disso, é surpreendente que um aumento na lâmina de irrigação, pelo menos até 80%, aumentou a permeabilidade a vapor de água, a solubilidade em água, o teor de umidade e reduziu a resistência à tração, em ambos os clones (Figura 8 A, B, D e D).

Figura 8 – Permeabilidade ao vapor de água (A), Solubilidade em água (B), Resistência à tração (C) e Teor de umidade (D) em genótipos de palma forrageira sob diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino. Letras diferentes indicam diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), maiúsculas entre os clones, minúsculas entre as lâminas de irrigação



Fonte: Imagem do próprio autor.

Para aplicação de filmes e revestimentos, é necessário que a PVA da película seja a mais baixa possível, oferecendo proteção e diminuindo a transmissão de umidade entre a atmosfera e o alimento (DAVOODI *et al.*, 2020). Portanto, no presente estudo as menores lâminas mostraram-se mais adequadas para essa finalidade. A menor PVA observada no clone OEM, em comparação à IPA, é um comportamento que pode ser associado à microestrutura mais homogênea obtida nos filmes poliméricos de OEM (Figura 12). Além disso, o teor de umidade dos filmes poliméricos apresentou valores menores na lâmina de irrigação controle da evapotranspiração, em ambos os genótipos estudados.

Os materiais que são empregados em revestimentos e biofilmes são classificados em duas categorias: hidrofóbicos e hidrofílicos (ASSIS *et al.*, 2011; ZARITZKY, 2011). No caso do presente estudo, a mucilagem de palma forrageira, por ser rica em polissacarídeos, classifica-se como material hidrofílico. Esse material, normalmente, apresenta-se por uma boa solubilidade em água, sendo favorável na dispersão de solutos e por formar filmes mais homogêneos. A solubilidade em água é uma propriedade importante dos filmes poliméricos, pois algumas aplicações, como embalagens por exemplo, podem exigir uma menor dissolução

em água para melhorar a integridade do produto e a resistência à água (TONGDEESOONTORN *et al.*, 2011). Essa solubilidade mostra o comportamento que o filme apresenta quando colocado em água ou com ambientes úmidos. As medidas do presente estudo mostraram que os dois genótipos expressam baixa solubilidade em água quando os filmes foram confeccionados com as lâminas de irrigação de 0% e 40% da evapotranspiração.

Para medir as propriedades mecânicas dos filmes, a análise de resistência à tração (RT) é usada, pois representa uma tensão máxima que o material pode suportar até seu rompimento, isso porque ele é esticado ou puxado (SAURABH *et al.*, 2015). De acordo com (Gheribe *et al.*, 2019), os materiais de que são feitas as embalagens precisam ser capazes de apresentar capacidades mecânicas resistentes para manter a integridade do produto que elas irão armazenar. Os resultados obtidos mostram claramente a importância de uma irrigação mais limitada para as propriedades dos filmes. De forma geral, os filmes de cactos possuem pouca resistência (Gheribi *et al.*, 2018). Nesse caso, a maior lâmina 120% da ET<sub>c</sub> reduziu em mais de 50% a resistência dos filmes biopoliméricos (Figura. 7C), além de ter aumentado a permeabilidade, que também é um desafio para filmes de cactos por serem muito solúveis em água. As menores permeabilidades observadas nas menores lâminas podem estar relacionadas a maiores quantidades de carboidratos devido às suas estruturas de rede fortemente compactadas e ordenadas por ligações de hidrogênio (Kanatt *et al.*, 2012). Ao comparar a taxa de RT encontrada nos filmes poliméricos de ambos os genótipos estudados, foi observado que OEM destacou-se, exibindo uma RT superior. Essa particularidade pode ser atribuída à superfície mais uniforme desse filme, com menos poros e fissuras (Figura 12). Clones do gênero *Nopalea* foram capazes de formar filmes biopoliméricos mais espessos do que os do gênero *Opuntia* (Tabela 6). Essa propriedade indica a durabilidade satisfatória do polímero e sua adequação para embalagem Gheribi *et al.* (2018). No entanto, a utilidade dos filmes poliméricos depende de suas propriedades gerais (Brito *et al.* 2022).

Tabela 6 – Espessura em função das lâminas de irrigação e genótipos de palma forrageira (efeitos de interação lâmina de irrigação versus genótipo)

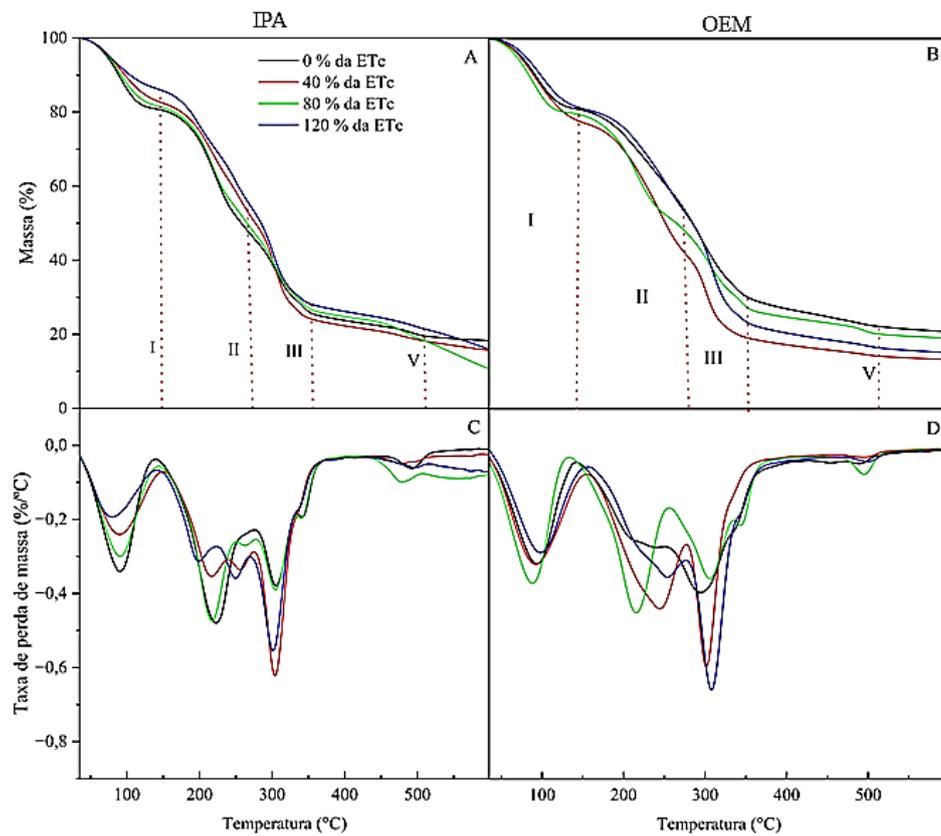
Efeito de interação		
Lâmina (% da ETc)	Esp	
	IPA	OEM
0	0,611 ± 0,06 Ab	0,663 ± 0,01Aa
40	0,646 ± 0,01 Ab	0,582 ± 0,01 Ba
80	0,742 ± 0,03 Aab	0,589 ± 0,04Ba
120	0,809 ± 0,02Aa	0,577 ± 0,16Ba

Letras diferentes indicam diferença estatística entre as médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ), maiúsculas entre os clones, minúsculas entre as lâminas de irrigação.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observou-se a degradação térmica e constataram-se os estágios de deterioração dos filmes biopoliméricos de palma forrageira (colhida sob quatro lâminas de irrigação na faixa de 35 a 600 °C) (Figura 9). As temperaturas iniciais (T onset), máximas (T<sub>máx</sub>), finais (T endset) e a perda de massa (PM) são apresentadas na (Tabela 7). Na análise de TGA (Tabela 7), observou-se que o clone IPA 40% registrou a maior temperatura final de degradação no estágio I, sinalizando que as moléculas de água estavam mais aderidas à matriz polimérica, pois esse estágio corresponde à volatilização da umidade (SILVA *et al.*, 2019). O genótipo IPA 120 % obteve menor perda de massa no primeiro e último estágio de degradação, chegando ao final da análise com menor perda de massa. A lâmina 0% no genótipo IPA destaca-se pelo registro da maior temperatura máxima de degradação ao final do quarto estágio. Na avaliação do efeito do genótipo OEM, destaca-se a menor perda de massa observada em todos os estágios de degradação para lâmina 0%. Por outro lado, a lâmina 120% suportou maior temperatura máxima de degradação. No entanto, registrou maior perda de massa ao final da análise.

Figura 9 – Massa residual e curvas DTG de filmes à base de mucilagem de palma forrageira *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck – IPA (A, C) e *Opuntia stricta* (Haw.) Haw – OEM (B, D), cultivadas sob diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino.



Fonte: Imagem do próprio autor.

Tabela 7 – Parâmetros térmicos dos filmes poliméricos de mucilagem de palma forrageira clones Ipa (*Nopalea cochenillifera* (L) Salmy-Dyck) (IPA) e Orelha de elefante Mexicana (*Opuntia stricta* (Haw). Haw.) (OEM)

		Amostras							
E.D		IPA	IPA	IPA	IPA	OEM	OEM	OEM	OEM
		0 % da ETC	40 % da ETC	80 % da ETC	120 % da ETC	0 % da ETc	40 % da ETc	80 % da ETc	120 % da ETc
I	T onset	35	35	35	35	35	35	35	35
	T Max	145	145	145	137	101	99	94	104
	T endset	185	193	190	187	147	160	137	161
	PM(%)	24	24	24	20	19	23	20	19
II	T onset	185	193	194	187	147	160	137	161
	T Max	250	247	247	253	216	250	220	259
	T endset	294	266	272	274	259	282	260	282
	PM(%)	59	47	52	52	42	60	49	48
III	T onset	294	266	272	253	259	282	260	259
	T Max	318	279	287	275	301	307	311	314
	T endset	342	295	298	290	365	346	338	329
	PM(%)	73	57	59	66	71	80	70	74
IV	T onset	342	295	298	290	365	355	370	369
	T Max	470	318	318	317	493	498	499	505
	T endset	478	366	341	341	511	521	518	522

PM(%)	80	77	72	70	78	86	80	84
-------	----	----	----	----	----	----	----	----

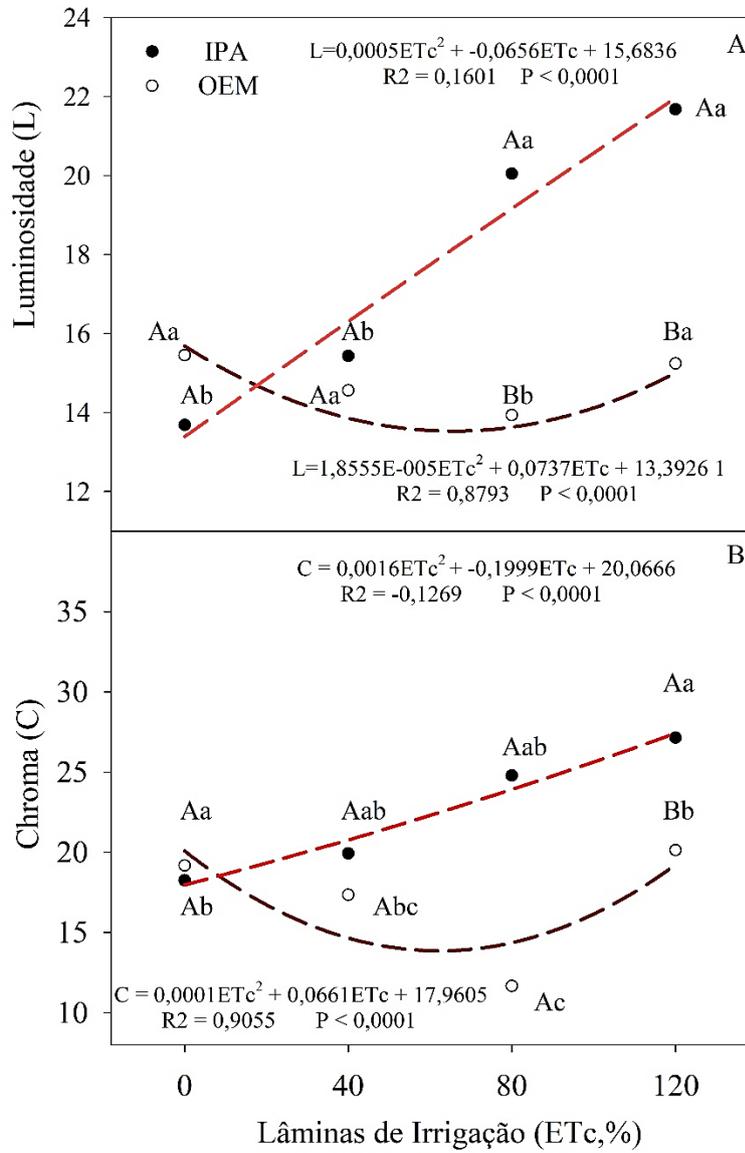
---

PM: perda de massa (%); T: temperatura (°C); E.D; Estagio de degradação. Fonte:

Fonte: Elaborada pelo autor.

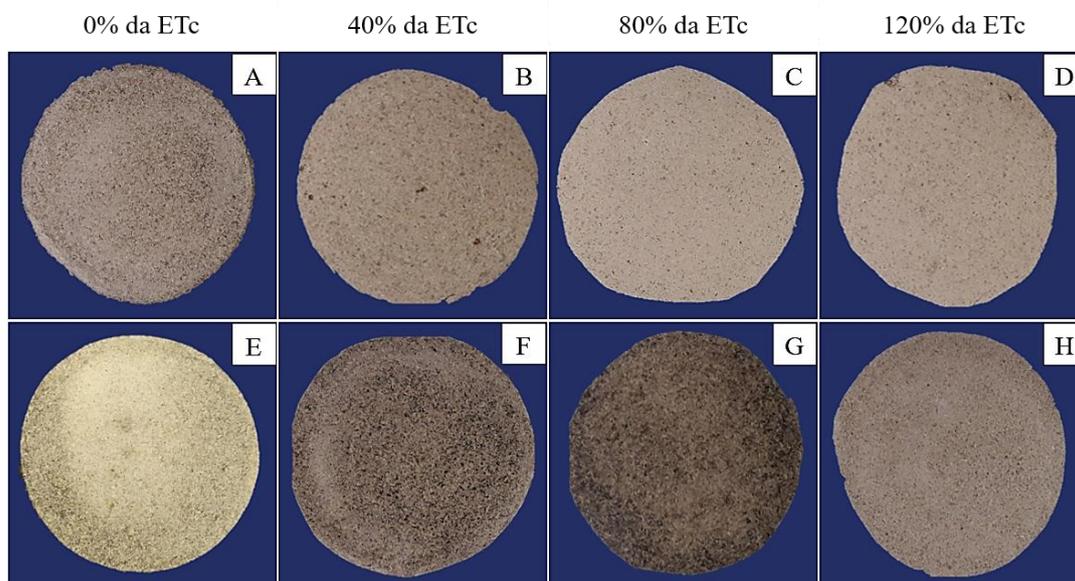
Macroestruturalmente, os filmes biopoliméricos mostram que o genótipo IPA tende a apresentar tons mais claros em comparação com o OEM. Um clareamento dos filmes foi observado quando aumentou a lâmina de irrigação, em ambos os genótipos estudados. Exceto para a lâmina de irrigação de 80% ETc no genótipo OEM (Figura 11). Isso se confirma ao analisar que os gráficos de luminosidade e chroma apresentam maiores valores para o genótipo IPA e aumentam na presença das lâminas (Figura 10).

Figura 10 – Cor e luminosidade padrão (A), Chroma (B) em genótipos de palma forrageira sob diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino



Fonte: Imagem do próprio autor.

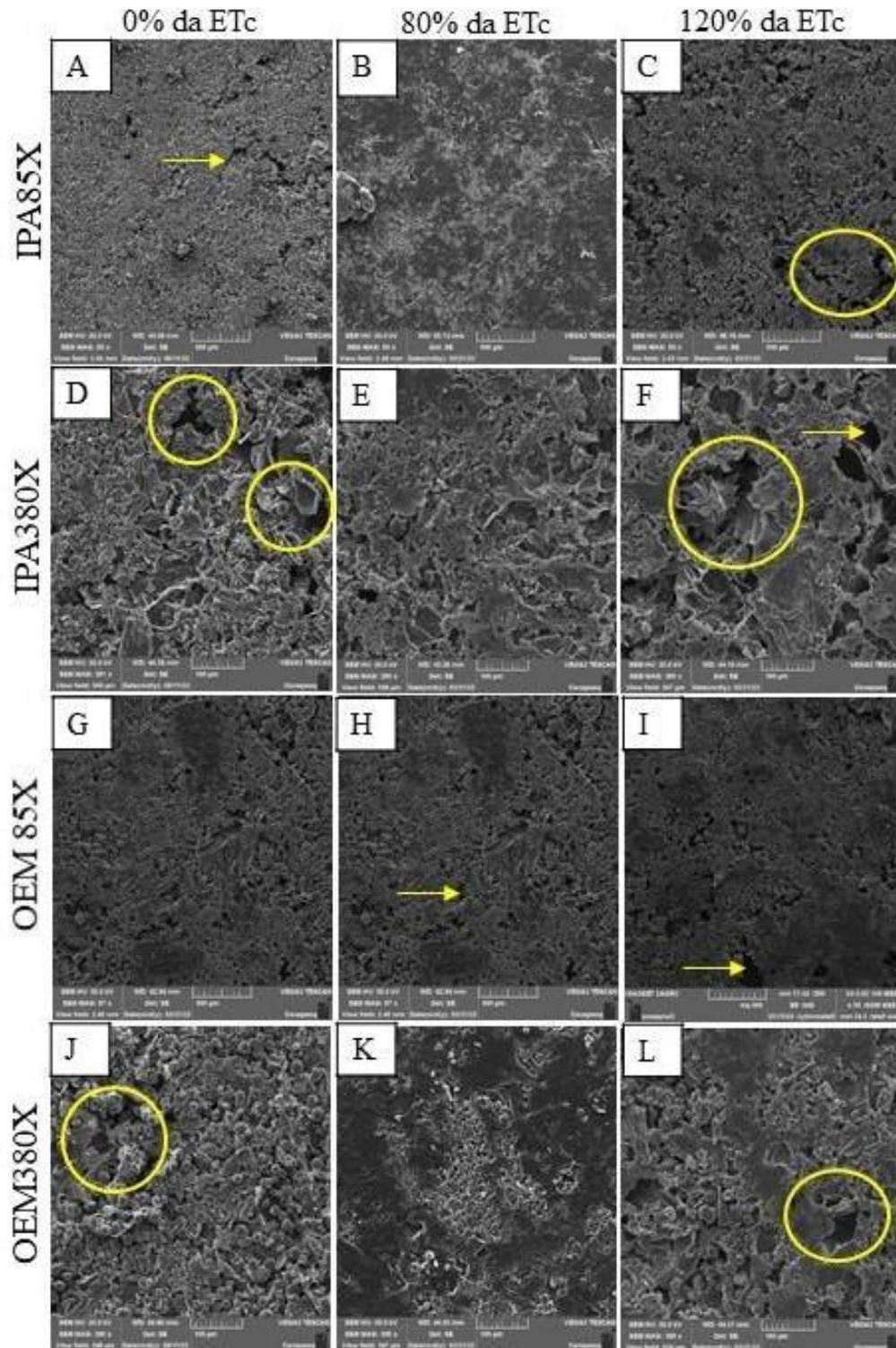
Figura 11 – Aspecto visual em filmes biopoliméricos em mucilagem de palma forrageira dos clones Ipa (*nopalea cochenellifera* (L.) Salm-Dyck) (A, B, C, D) e Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* (Haw.))



Fonte: Imagem do próprio autor.

Microestruturalmente, todos os filmes estudados apresentaram agregados esféricos, referindo-se à aglomeração de partículas de mucilagem (MADERA-SANTANA *et al.*, 2018). Porém, observa-se uma maior densidade de crateras nos filmes poliméricos oriundos de cladódios cultivados com 120 % da ETc (Figura 12). O que pode estar relacionado a uma significativa queda na resistência desses filmes (Figura 8C).

Figura 12 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície em filmes biopoliméricos em dois clones de palma forrageira IPA colhidos sobre quatro lâminas de irrigação no semiárido brasileiro



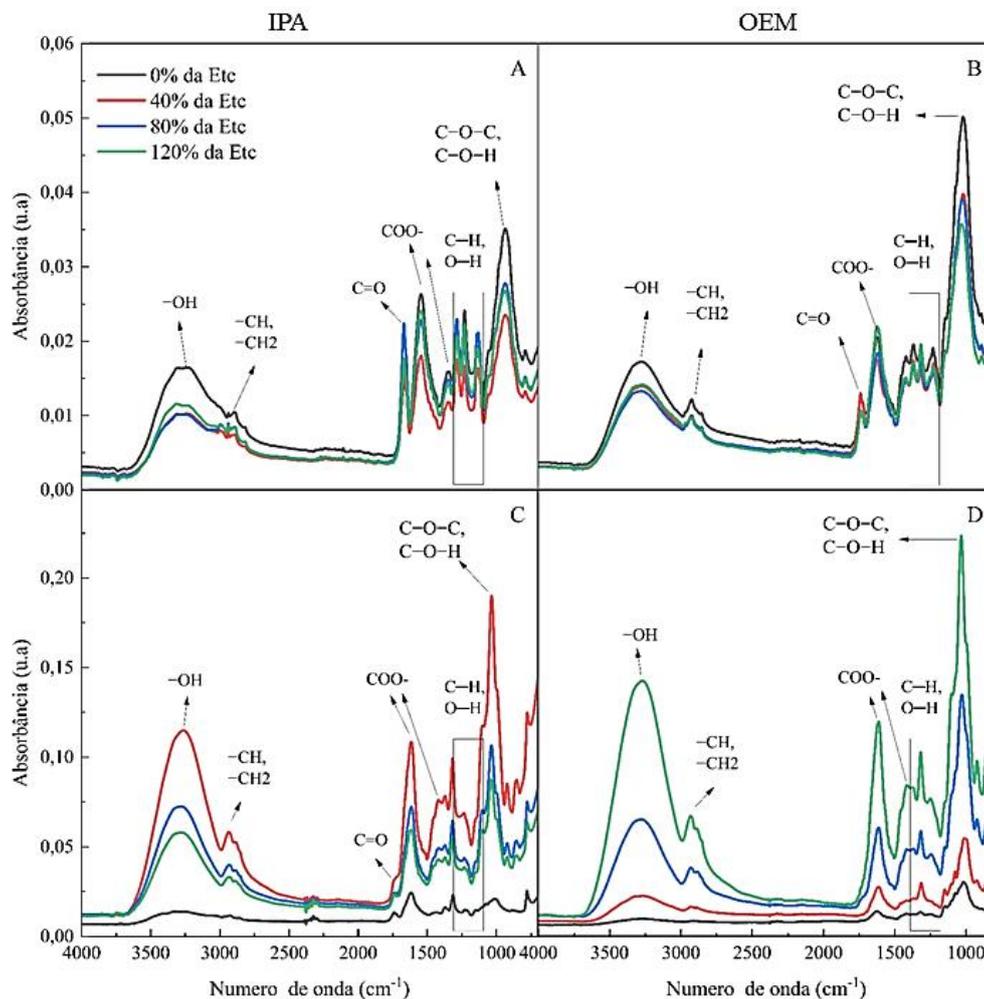
Fonte: Imagem do próprio autor.

Notou-se que a mucilagem do genótipo IPA mostrou tons mais claros que a de OEM (Figura 11), o que pode estar relacionado ao teor de pigmento no genótipo OEM em relação ao IPA (ARAÚJO *et al.*, 2021), confirmado por valores fotométricos superiores em relação ao OEM (Figura 10A, B), que são inferiores aos de *O. ficus-indica* (69 - 99 L\*) (LUNA-SOSA *et al.*, 2020). Esses valores abaixo do apresentado na literatura podem estar atrelados ao método de extração. Sabe-se que o que mais se aplica em trabalhos consultados na literatura é a extração de mucilagem utilizando solvente e depois, sem uso de solvente, a seco, ou seja, desidratando o material na estufa com circulação forçada de ar. Além disso, há diferenças na homogeneidade dos filmes biopoliméricos com o IPA apresentando maior homogeneidade em relação ao OEM, conforme evidenciado por MEV (microscopia eletrônica de varredura) (Figura 12) em micrografias em superfícies em que se observam partículas não homogêneas com resolução de 85x nos biofilmes genótipo IPA. Esses pontos, fissuras ou poros, podem facilitar trocas gasosas. Isso é importante, pois quando a mucilagem é incorporada a alimentos evita-se que eles entrem em rotas anaeróbicas e fermentativas (DHALL, 2013). Todavia, com o aumento da resolução para 380x (Figura 12) nota-se que a superfície de IPA encontra-se mais heterogêneas em relação ao OEM, o qual demonstra estruturas mais lisas e com menos aglomerados podendo interferir diretamente em outras propriedades dos biofilmes.

Os resultados das análises em infravermelho (FT-IR) das mucilagens de IPA e OEM demonstraram comportamento semelhante em ambas espécies estudadas, sendo esse comportamento também comum aos filmes biopoliméricos. A espectroscopia FTIR fornece uma impressão digital química de um material, correlacionando suas frequências de absorção com frequências de absorção de ligação conhecidas (FOX *et al.*, 2012). Os espectros de FTIR da mucilagem e do filme poliméricos (Figura 13) foram semelhantes aos registrados em estudos anteriores (GHERIBI *et al.*, 2018; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2014). A banda de absorção larga em torno de  $3342\text{ cm}^{-1}$  corresponde ao estiramento OH dos grupos álcool e ácido carboxílico -OH que participam da ligação de hidrogênio intermolecular (FOX *et al.*, 2012; GHERIBI *et al.*, 2018; GHERIBI; HABIBI; KHWALDIA, 2019), demonstrando a afinidade dos biofilmes pelas moléculas de água (SILVA *et al.*, 2019). Bandas de absorção em 2932 e 2885 correspondendo às vibrações assimétricas e simétricas das ligações CH ou CH<sub>1</sub>, respectivamente. De acordo com Thivya *et al.* (2021), o alongamento dessas bandas representa a presença de celulose na formulação do filme. A baixa intensidade do pico de absorção em 1730, atribuída à vibração de alongamento C=O do grupo carboxila não ionizado, correlaciona-se com o aparecimento dos picos 1625 e 1418, que são atribuídos às propriedades de alongamento COO- assimétrico e simétrico. Propriedades dos sais de ácidos carboxílicos

presente na mucilagem (FOX *et al.*, 2012; RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2014) mostraram que o grupo carboxila ionizou formando um sal (CÁRDENAS; GOYCOOLEA; RINAUDO, 2008). Gheribi *et al.* (2018) relataram que foram observados picos em 1370, 1321 e 1244 que correspondem à vibração de C—H ou O—H. O forte pico em 1030 é característico de polissacarídeos, representando vibrações C—O—C ou C—O—H (THIVYA *et al.*, 2021).

Figura 13 – Espectro de infravermelho na mucilagem (A,B) e filmes biopoliméricos (C,D) obtidos à base de mucilagem dos clones IPA (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck) e Orelha de Elefante Mexicana (*Opuntia stricta* (Haw.)Haw.), cultivadas sob diferentes lâminas de irrigação no semiárido nordestino

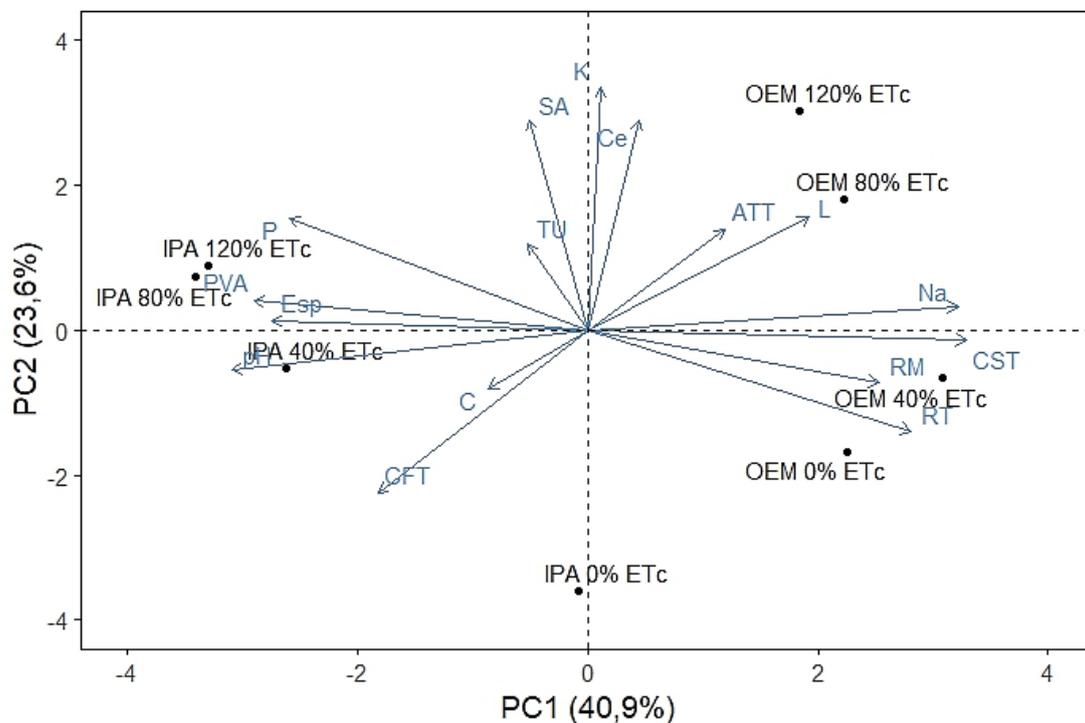


Fonte: Imagem do próprio autor.

Por fim, a partir de uma avaliação utilizando análises multivariadas, na forma de componentes principais (PCA), comparou-se os autovalores nos dois primeiros componentes (PC1 e PC2) para os tratamentos empregados, e as características avaliadas na mucilagem e no

filme biopolimérico (Figura 14). Para o PC1, a variação foi explicada com maior contribuição das variáveis CST (0,95)  $\text{Na}^+$  (0,93), RT (0,81), RM (0,73), P (-0,75), Esp (-0,79), PVA (-0,84) e pH (-0,89). Assim, os tratamentos IPA 80%, IPA 120%, OEM 40% e IPA 40%, que contribuíram em maior parte com a variação do PC1, podem ser relacionados a essas características. Com base na distribuição dos tratamentos no PC1, os tratamentos IPA 40%, IPA 80% e IPA 120% apresentaram mucilagem com maior pH, menores RM, CST e  $\text{Na}^+$ , enquanto seus biofilmes tiveram maior PVA e menor RT. O tratamento OEM 40% que obteve maior teor RM, CST e  $\text{Na}^+$ , correlacionou-se ao biofilme com maior RT e menor PVA. O PC2 foi caracterizado com maiores contribuições das variáveis:  $\text{K}^+$  (0,97) e CE (0,84) e SA (0,84). De acordo com a distribuição dessas variáveis no PC2, o tratamento OEM 120% foi associado à mucilagem com maiores  $\text{K}^+$ , CE e biofilme com maior SA.

Figura 14 – Biplots da análise de componentes principais com base em médias padronizadas de variáveis da mucilagem e dos filmes poliméricos, imediatamente após a colheita do cladódio e após os tratamentos 0% da ETc, 40% da ETc, 80% da ETc, 120% da ETc para as espécies estudadas, a saber, *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck - IPA e *Opuntia stricta* (Haw.) Haw - OEM. Nota: CE: Condutividade Elétrica; CFT: compostos fenólicos; FTIR MU: espectroscopia de infravermelho; ATT: Acidez Titulável Total; P: Potássio; K+: Fósforo; Na+: Sódio; CST: Carboidratos Solúveis Totais; RT: resistência à tração; TU: teor de umidade; SA: solubilidade em água; PVA: permeabilidade a vapor d'água; Esp: espessura



Fonte: Imagem do próprio autor.

#### **4 CONCLUSÕES**

O genótipo OEM manteve mais estáveis valores de pH, condutividade elétrica, acidez total, sódio, potássio e fósforo. Os filmes biopoliméricos de OEM exibiram melhores propriedades mecânicas, de barreira à água, de microestrutura e estabilidade térmica. Associado a isso, as lâminas de 0% a 80% da evapotranspiração proporcionaram maiores valores de Acidez titulável total, pH, condutividade elétrica, carboidratos solúveis totais. Compostos fenólicos para os filmes biopoliméricos apresentaram menor permeabilidade a vapor de água, solubilidade em água, teor de umidade e maiores valores de resistência à tração e melhores propriedades microestruturais em relação a maior lâmina. Assim, o intervalo de 0% a 80% da evapotranspiração torna-se mais indicado no cultivo de palma forrageira, OEM, para fins de aplicação de filmes biopoliméricos para a indústria de embalagens biodegradáveis.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. *et al.* Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper No. 56**, FAO, n. 56, p. 300, 1998.
- ALVARENGA, M. P. C.; MOTTIN, A. C.; AYRES, E. Preparation and Characterization of Okra Mucilage (*Abelmoschus esculentus*) Edible Films. **Macromolecular Symposia**, v.367,n.1,p.90100, 2016.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ANDRADE VIEIRA, É. de. *et al.* Mucilages of cacti from Brazilian biodiversity: Extraction, physicochemical and technological properties. **Food Chemistry**, v. 346, 2021.
- ARAÚJO, Y. P. de *et al.* 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**, v. 23, p. 180–198, 2021.
- ANDRADA, L. V. P. **Propriedades filmogênicas da mucilagem de *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-dyck obtida com a reutilização de solvente orgânico**. 2022. 62 f. Monografia (Graduação em Ciências Biológicas) - Bacharelado em Ciências Biológicas - Universidade Federal Rural de Pernambuco – Serra Talhada, 2022.
- ASSIS, O. B. G.; BRITTO, D. Evaluation of the antifungal properties of chitosan coating on cut apples using a non-invasive image analysis technique. **Polymer International, London**, v. 60, n. 6, p. 932-936, 2011.
- ASTELLO-GARCÍA, M. G. *et al.* Chemical composition and phenolic compounds profile of cladodes from *Opuntia* spp. cultivars with different domestication gradient. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 43, p. 119–130, 1 nov. 2015.
- BRITO, F. A. L. de *et al.* Preparation and characterization of a biodegradable film from cactus *Nopalea* sp. **Journal of the Professional Association for Cactus Development**, v. 24, p. 185– 202, 22 ago. 2022.
- CÁRDENAS, Adriana; GOYCOOLEA, Francisco M.; RINAUDO, Marguerite. On the gelling behaviour of ‘nopal’(*Opuntia ficus indica*) low methoxyl pectin. **Carbohydrate Polymers**, v. 73, n. 2, p. 212-222, 2008.
- CHANDRA, S.; MEJIA, E. G. de. Polyphenolic compounds, antioxidant capacity, and quinone reductase activity of an aqueous extract of *Ardisia compressa* in comparison to mate (*Ilex paraguariensis*) and green (*Camellia sinensis*) teas. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.52, n.11, p.35833589, 2 jun. 2004.
- DHALL, R. K. Advances in Edible Coatings for Fresh Fruits and Vegetables: A Review. <http://dx.doi.org/10.1080/10408398.2010.541568>, v. 53, n. 5, p. 435–450, jan. 2013.

DU TOIT, A. *et al.* Mucilage powder from cactus pears as functional ingredient: influence of cultivar and harvest month on the physicochemical and technological properties. **Journal of Food Science and Technology**, v. 56, n. 5, p. 2404–2416, 2019.

DAVOODI, S. *et al.* Development and Characterization of Salvia macrosiphon/Chitosan Edible Films. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 8, n. 3, p. 1487–1496, 2020. <https://doi-org.ez13.periodicos.capes.gov.br/10.1021/acssuschemeng.9b05894>.

DUBEUX JÚNIOR, J. C. B.; SANTOS, MVF dos. Exigências nutricionais da palma forrageira. **A palma no Nordeste do Brasil: Conhecimento atual e novas perspectivas de uso**, v. 2, p. 105-128, 2005.

DUBOIS, M. *et al.* Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, n. 3, p. 350–356, 1 mar. 1956.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2009.

ESPINO-DÍAZ, Miguel *et al.* Development and characterization of edible films based on mucilage of *Opuntia ficus-indica* (L.). **Journal Of Food Science, S.L.**, v. 75, n. 5, p. 347-352, jan. 2010.

FOX, D. I. *et al.* Removing heavy metals in water: The interaction of cactus mucilage and arsenate (As (V)). **Environmental Science and Technology**, v. 46, n. 8, p. 4553–4559, 2012.

GHERIBI, R. *et al.* Development of plasticized edible films from *Opuntia ficus-indica* mucilage: A comparative study of various polyol plasticizers. **Carbohydrate Polymers**, v. 190, p. 204–211, 2018.

GHERIBI, R. *et al.* Enhancement of the physical, mechanical and thermal properties of cactus mucilage films by blending with polyvinyl alcohol. **Food Packaging and Shelf Life**, v. 22, 2019.

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. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 126, p. 238–245, 2019.

GHERIBI, R.; KHWALDIA, K. Cactus mucilage for food packaging applications. **Coatings**, v. 9, n. 10, p. 1–19, 2019.

GOLDSTEIN, G. *et al.* Diel patterns of water potential components for the crassulacean acid metabolism plant *Opuntia ficus-indica* when well-watered or droughted. **Plant Physiology**, v. 95, n. 1, p. 274–280, 1991.

KANATT, Sweetie R. *et al.* Active chitosan–polyvinyl alcohol films with natural extracts. **Food hydrocolloids**, v. 29, n. 2, p. 290-297, 2012.

KREVELEN, D. W. V. Properties of polymers. 3 ed. São Paulo: **Elsevier**, 1990.

LUNA-SOSA, B. *et al.* Pectin-Based Films Loaded with Hydroponic Nopal Mucilages: Development and Physicochemical Characterization. **Coatings** **2020**, Vol. 10, Page 467, v. 10, n. 5, p. 467.

MADERA-SANTANA, Tomás Jesús *et al.* Mucilage from cladodes of *Opuntia spinulifera* Salm-Dyck: chemical, morphological, structural and thermal characterization. **Cyta - Journal Of Food**, [S.L.], v. 16, n. 1, p. 650-657, jan. 2018.

Moritani, C., Kawakami, K., Fujita, A., Kawakami, K., Hatanaka, T., & Tsuboi, S. (2017). Anti-oxidative activity of hydrolysate from rice bran protein in HepG2 cells. **Biological & Pharmaceutical Bulletin**, 40, 984–991.

MESSINA, C. M. *et al.* Seasonal characterization of nutritional and antioxidant properties of *Opuntia ficus-indica* [(L.) Mill.] mucilage. **Food Hydrocolloids**, v. 111, 2021.

MONRROY, Mariel *et al.* Extraction and Physicochemical Characterization of Mucilage from *Opuntia cochenillifera* (L.) Miller. **Journal Of Chemistry**, [S.L.], v. 2017, n. 1, p. 1-9, 10 maio 2017. Hindawi Limited.

PINHEIRO, J. C. **Efeitos de clones, época do ano e horário de colheita nas propriedades físico-químicas e tecnológicas da mucilagem e filmes biopoliméricos de palma forrageira**. 2023. 64 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2023.

QUEIROZ, M. G. *et al.* Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente semiárido. **Irriga**, v. Edição esp, p. 141–154, 2016.

QUEIROZ, M. G. *et al.* Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil. **Catena**, v. 188, n. August 2018, p. 104457, 2020.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: USDA, 1954.

RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, S. *et al.* Extraction and characterization of mucilage from wild species of *Opuntia*. **Journal of Food Process Engineering**, v. 37, n. 3, p. 285–292, 2014.

SÁENZ, Carmen; SEPÚLVEDA, Elena; MATSUHIRO, Betty. *Opuntia* spp mucilage's: a functional component with industrial perspectives. **Journal of arid environments**, v. 57, n. 3, p. 275-290, 2004.

SAURABH, Chaturbhuj K. *et al.* Mechanical and barrier properties of guar gum based nano-composite films. **Carbohydrate polymers**, v. 124, p. 77-84, 2015.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**, 5th ed, Embrapa. Revista e ampliada, Brasília, DF, 2018.

SILVA, S. H. *et al.* Extraction processes and characterization of the mucilage obtained from green fruits of *Pereskia aculeata* Miller. **Industrial Crops and Products**, v. 140, 2019.

SILVA, T. G. F. da *et al.* Crescimento e produtividade de clones de palma forrageira no semiárido e relações com variáveis meteorológicas. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 2, p. 10– 18, 2015.

SOUZA, L. D. C. *et al.* Size and harvest time of cladodes modulate the composition and physicochemical stability of prickly pear cactus mucilage. **Journal of the Professional Association for Cactus Development**, v. 24, p. 220–241, 30 ago. 2022.

THIVYA, P. *et al.* Development of active packaging film from sodium alginate/carboxymethyl cellulose containing shallot waste extracts for anti-browning of fresh-cut produce. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 188, p. 790–799, 2021.

TONGDEESOONTORN, W.; MAUER, L. J.; WONGRUONG, S.; SRIBURI, P.; RACHTANAPUN, P. "Effect of carboxymethyl cellulose concentration on physical properties of biodegradable cassava starch-based films". **Chem Cent J**, v. 5, n. 1, 2011, p.6.

ZARITZKY, N. Edible coating to improve food quality and safety. *In*: AGUILERA, J. M. et al. (Ed.). **Food engineering interfaces**. New York: Springer, 2011. p. 631-660.



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
SECRETARIA DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO**

Av. Francisco Mota, 572, Costa e Silva, Mossoró (RN) – Tel.: (0\*\*84)3315-8305 – e.mail: ppgca@ufersa.edu.br

---

---

**DECLARAÇÃO DE CONFIDENCIALIDADE DE INFORMAÇÕES DE  
DISSERTAÇÃO/TESE**

Declaro, para os devidos fins, que o aluno, LUCIO JOSÉ VIEIRA SILVA matrícula 2021120379, discente do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, desenvolveu conteúdo que passara por processo de patente fazendo ser necessário sigilo dos dados contido na sua dissertação de Mestrado, sob o título A INFLUÊNCIA DO MANEJO DE IRRIGAÇÃO EM CLONES DE PALMA FORRAGEIRA NA QUALIDADE DA MUCILAGEM E DE FILMES BIOPOLIMÉRICOS.

Por ser verdade, firmo o presente.

Mossoró, 19 de fevereiro de 2023

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ADRIANO DO NASCIMENTO SIMOES  
Data: 19/02/2024 21:03:23-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Orientador: Prof. Dr. Adriano do Nascimento Simões

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** LUCIO JOSE VIEIRA SILVA  
Data: 20/02/2024 10:58:30-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Discente: Lucio José Vieira Silva