

Extração e caracterização de gênero *opuntia* para aplicação como biocoagulante e biofloculante no processo de tratamento de águas e efluentes

Opuntia genus extraction and characterization's for application as biocoagulant and biofloculant agent in water and sewage treatment process

Letícia Dantas Muniz Alves^{1*}, Edvaldo Amaro Santos Correia¹, Márcia Viana da Silva¹, Denise Dantas Muniz², Normando Perazzo Barbosa², Eduardo Braga Costa Santos³

RESUMO

O uso de coagulantes inorgânicos no tratamento de efluentes tem gerado discussões sobre os limites de eficiência e os efeitos colaterais no corpo humano, buscando-se alternativas que desempenhem o tratamento com o impacto ambiental minimizado. O estudo objetiva avaliar a efetividade da palma orelha de elefante mexicana (*Opuntia stricta haw*) cultivada no estado da Paraíba no tratamento de águas e efluentes e seu potencial técnico como biocoagulante e biofloculante. Caracterizações de espectrofotometria no infravermelho – FTIR, análise termogravimétrica – TGA, difratometria de raios-x – DRX, teste de sólidos suspensos, níveis de turbidez e pH foram realizados. Os resultados obtidos indicaram que a espécie estudada reduziu a turbidez das amostras de efluentes em um percentual superior a 75% e a quantidade removida de sólidos suspensos é equivalente, além da detecção de componentes minerais nas amostras da palma estudada, que levanta a hipótese de atuar no equilíbrio dos níveis de pH, porém de forma limitada.

Palavras-chave: Caracterização; Tratamento de efluente; Palma orelha de elefante mexicana; Componentes minerais.

ABSTRACT

The use of inorganic coagulants in the treatment of effluents has generated discussions about the limitations of their efficiency and side effects on the human body, searching for alternatives that perform a treatment with a minimum of environmental impact. This study aims to evaluate the effectiveness of *Opuntia stricta haw* (Mexican elephant ear palm) samples cultivated in the State of Paraíba, Brazil, in the treatment of water and effluents and its technical feasibility as a biocoagulant and biofloculant. Characterizations of Infrared Spectrometry – FTIR, Thermogravimetric Analysis – TGA, X-Ray Diffraction – XRD, solid suspension test, turbidity and pH level analysis were performed. The results obtained indicated that the studied specie reduced the turbidity of the effluent samples by a percentage greater than 75%, the amount of suspended solids removed is greater than 75% and a significant amount of mineral compounds were detected in the studied nopal, which brings the hypothesis of pH level equilibrium application, but in limited effectiveness.

Keywords: Characterization; Effluent treatment; Mexican elephant ear palm; Mineral compounds.

¹ Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia da Paraíba.

*E-mail: muniz.leticia@academico.ifpb.edu.br

² Universidade Federal da Paraíba

³ Universidade Federal do Pará

³ Universidade Federal da Paraíba

³ Universidade Federal do Pará

INTRODUÇÃO

Conforme avançam as demandas de consumo dos recursos hídricos pelas sociedades existentes e aumenta-se a quantidade de habitantes, há um aumento da velocidade de exaustão do ecossistema, o que corrobora para a necessidade da produção de soluções que mitiguem os impactos ambientais e promovam a construção de uma conscientização coletiva em relação à preservação do meio ambiente. Desta maneira, o uso racional da água se faz uma constante em toda atividade socioeconômica, no qual o lançamento de efluentes é apontado como um problema crônico que exige solução direta e com alto nível de efetividade (BERTONCINI, 2008).

Soma-se que o poder público enfrenta grandes desafios em executar políticas públicas nas áreas de saneamento básico, educação ambiental e saúde coletiva, tornando o diálogo destes temas junto à população uma demanda urgente e que requer a colaboração de setores da sociedade de tal forma que sejam consideradas não apenas a dimensão econômica, mas as dimensões socioambientais, compatibilizando com o Objetivo nº 6 das ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – da ONU no tocante ao acesso a água tratada e saneamento básico, cujas estimativas do International Food Policy Research Institute – IFPRI – é de que 4,8 bilhões de pessoas estarão afetadas pela escassez de água em 2050 (BRASIL, 2017).

Neste contexto, para o semiárido paraibano, que compreende as regiões do Cariri/Curimataú, Sertão e Alto Sertão, cujos volumes pluviométricos anuais não ultrapassaram os intervalos de 300 a 500 mm e 700 a 900 mm (FRANCISCO, SANTOS, 2017), o consumo do recurso hídrico influencia de forma significativa o ritmo agroindustrial da região e o respectivo lançamento de efluentes sem tratamento em leitos superficiais, que podem se infiltrar em lençóis freáticos, se torna um desafio em gerar modelos eficientes de tratamento do efluente em uma região de clima não propenso a reposição hídrica volumosa, já que o percentual máximo de tratamento de esgoto realizado pela iniciativa pública e privada observado pela literatura no Brasil é aproximadamente de 20% (JOMERTZ, LANZER, 2011).

Destaca-se que a região compreendida pelo semiárido paraibano requer soluções para o período de estiagem, no qual os reservatórios, sujeitos à contaminação por dejetos animais, matéria orgânica diversa e ainda sujeito ao processo de evaporação, que favorece a perda de até 60% do volume bombeado e o alto número de interações

devidas as Doenças Relacionadas ao Saneamento Básico Inadequado – DRSAL, com média de 166,8 por mil internações pelo SUS (IBGE, 2017).

Neste interim, um ponto fulcral a ser tratado está na disponibilização e consumo de água potável para a população, assim como no tratamento dos efluentes e conservação dos recursos hídricos. Esta questão é de elevada importância pelo fato de que grande parte das doenças e enfermidades é provocada pela dificuldade de acesso aos serviços de saneamento básico e respectiva poluição das águas (BEYENE, HAILEGEBRIAL, DIRERSA, 2016; LIMA, ALMEIDA, VICENTINI, 2020), o que se torna um problema crítico de saúde pública e, por consequência, gera impactos negativos ao erário público e ao desenvolvimento socioeconômico em todo o território nacional.

Neste contexto, o tratamento adequado das águas para consumo se apresenta como essencial para as políticas sanitárias, que incluem a Lei nº 14026/2020 – Marco Legal do Saneamento Básico – e a Resolução nº64/2021 da Agência Nacional de Águas – ANA, que trata das normas de referência para o Saneamento. O tratamento da água, tanto para distribuição quanto tratamento de efluentes, inclui o uso de equipamentos e insumos de elevado valor, como o caso do sulfato de alumínio $[Al_2(SO_4)_3]$, sulfato de ferro $[Fe_2(SO_4)_3]$ e hidróxido de cálcio $[Ca(OH)_2]$ para coagulação, que consiste na desestabilização das partículas coloidais e suspensas presentes na água captada para abastecimento; na floculação, processo subsequente à coagulação, que realiza o processo de colisão de partículas para agregarem e aumentarem de tamanho, facilitando a remoção dos resíduos por filtração ou decantação, cuja ação é facilitada pela coagulação dos resíduos em partículas maiores e vencem o empuxo da água, sendo direcionados ao fundo pela força gravitacional (GUARDÍAN, COTO, 2011; ZARA, THOMAZINI, LENZ, 2012; OSTROWSKI, 2014; POZZOBON, KEMPKA, 2015; FRANCO *et al*, 2017; ANG, MOHAMMAD, 2020).

Neste sentido, o uso de coagulantes provenientes de fontes renováveis se mostra como uma alternativa cada vez mais viável (ZARA, THOMAZINI, LENZ, 2012; OSTROWSKI, 2014; CHOY, PRASAD, WU, RAMANAN, 2015; POZZOBON, KEMPKA, 2015;) e permite com que novas fontes de insumos provedoras dos componentes necessários para o tratamento da água e do efluente sejam estudadas, desenvolvidas e aplicadas como alternativas sustentáveis e economicamente viáveis aos componentes químicos usuais.

As palmas forrageiras pertencem a família *Cactaceae*, que englobam uma série de características, como a formação de tronco lenhoso bem definido, ramificações esparsas ou em formato de copa, com galhos e ramos articulados (ORTIZ, ASTUDILLO, GARCÍA, 2013). Possuem também uma cutícula impermeável, menor número de estômatos e ao aparelho fotossintético, de maneira que se classificam como planta detentora do processo fotossintético de metabolismo ácido das crassuláceas – CAM, com a capacidade de absorver energia solar durante o dia e fixar o CO₂ durante a noite, o que reduz significativamente a perda de água por evapotranspiração (RAMOS *et al.*, 2011). Gonzalez (1995) aponta que o cultivo da palma é feita preferencialmente em solos calcários e com altos teores de sais minerais, cujo nível de pH seja alcalino, o que pode indicar a presença de compostos minerais em sua composição e estrutura.

As palmas do gênero *Opuntia*, segundo Leite (2014), apresentam características anatômicas e morfofisiológicas que conferem boa adaptabilidade e condições favoráveis de cultivo no Nordeste do Brasil, sendo o Estado da Paraíba um dos maiores produtores, com potencial de cultura em todo o estado, “excetuando a zona costeira da mesorregião do Litoral Paraibano e no brejo de altitude em torno do município de Areia, no Agreste Paraibano” (TAVARES, 2016). Destaca-se o fato de que as palmas não requerem solos com alto nível de qualidade nutricional e podem se desenvolver em ambientes com baixo índice pluviométrico.

A região nordeste do Brasil é a principal produtora de palma forrageira, com uma área ocupada de 500 mil hectares e produção média de 220 a 300 toneladas por hectare a cada ciclo de 2 anos, ocupando a posição de maior produtor mundial (IPA, 2008; ROCHA, 2012; BRASIL, 2014).

A composição química pode variar segundo a espécie estudada, a idade de colheita, época do ano e tratos culturais que irão influenciar as características morfofisiológicas. A palma é rica em carboidratos não fibrosos, como a glucose e frutose, além de saponinas como triterpenos e flavonoides, apresentando também baixos teores de proteína bruta, cinzas e fibra, além de grande percentual de água, que atinge uma média de 90% da massa da palma (LIMA, 2013; ORTIZ, ASTUDILLO, GARCÍA, 2013; TAVARES, 2016). Outros elementos que podem ser encontrados nas cinzas das palmas incluem magnésio, cálcio, potássio, sódio e quantidades menores de ferro e manganês (CONTRERAS-PADILLA *et al.*, 2015).

Ao considerar que as fontes de água disponíveis requerem tratamento para removerem compostos orgânicos, substâncias químicas e microrganismos com potencial nível de ameaça a saúde humana, o uso de compostos que atuem sobre os particulados suspensos auxilia na redução destas substâncias na água que será ofertada ao público, assim como no efluente que será devolvido ao corpo hídrico para manter o equilíbrio de vazão dos rios e reservatórios.

Para tanto, este artigo buscou analisar espécies de cactáceas do gênero *Opuntia* para averiguar a viabilidade de ser aplicado como um coagulante/floculante biodegradável a partir caracterizações físico-químicas e térmica para aplicação no tratamento de águas e efluentes, reduzindo a turbidez da água bruta testada, além de averiguar eventual potencial no equilíbrio de pH, de maneira que sua aplicabilidade possa ser estendida para outras áreas além da alimentação de ruminantes durante o período de seca no semiárido brasileiro.

METODOLOGIA

Foi realizada uma pesquisa do tipo experimental, onde foram selecionadas para o estudo a espécie *Opuntia stricta haw* – palma orelha de elefante mexicana, conforme Figura 1, coletadas da Estação Experimental de Cactáceas, localizada no Centro de Tecnologia da UFPB.

Figura 1 – Palma forrageira da espécie orelha de elefante mexicana.



Fonte: Autores, 2022.

Foi preparada uma solução de água bruta atendendo os padrões estabelecidos pela norma ASTM D2035-19, com metodologia proposta por Mattos (2019). Foram preparados 5 recipientes contendo 400 mL de água potável obtida pela distribuição da Companhia de Águas e Esgoto da Paraíba – CAGEPA – e então adicionado partículas

de material arenoargiloso obtidos em área de preservação permanente localizada no campus I da Universidade Federal da Paraíba – UFPB – no equivalente a 2% em massa. As soluções foram misturadas e a turbidez foi medida com um turbidímetro TU430, da Akso, para definir a turbidez da água bruta. Adicionou-se 100 mL de solução de ácido cítrico 0,5M para que a água atingisse pH equivalente a 5,0 medido por um medidor de pH de bancada Simpla PH140, da Akso, atendendo a norma ASTM E70-19. Estes recipientes com as soluções de teste foram posicionados em agitador magnético sem aquecimento com 6 baias FISATOM e agitados com velocidade inicial de 500 rpm até homogeneizar.

As raquetes foram devidamente lavadas com escova, detergente e água corrente para remoção de eventuais impurezas e sinais de cochonilhas, sendo então imersas em solução de água destilada com 1% de água sanitária comercial e colocadas em imersão durante 15 minutos para abertura dos cladódios. Em seguida, foram enxaguadas em um recipiente com água destilada para remover o excedente de água sanitária.

As raquetes então foram cortadas com faca amolada em tamanho aproximado de 3x3 cm² e colocadas em um recipiente com uma peneira suspensa e guardadas em refrigerador, sendo mantidas durante 24 horas a uma temperatura aproximada de 6 °C para conservação. Após a refrigeração, a palma é retirada e uma parte é processada para obtenção da polpa que será destinada a produção de amostra em pó. As concentrações testadas das amostras estão definidas na Tabela 1 seguinte.

Tabela 1 – Concentrações para teste de turbidez, pH e sólidos suspensos.

Espécie	Forma da amostra	Quantidade da amostra por litro de solução			
		Orelha de Elefante Mexicana	<i>In natura</i>	2 g	5 g
Em pó					

Fonte: Autores, 2022.

Foram testadas as versões *in natura* como referência para averiguação de eficiência e identificar se a versão em pó tem efeito próximo ao não processado. Os ensaios foram realizados em duplicata para melhor confiabilidade do processo. Após o tempo de agitação de 10 minutos, as amostras *in natura* foram retiradas para não influenciar na filtração dos efluentes testados e amostras foram coletadas para medição da turbidez após inserção do congelado e do *in natura*. Pesou-se a massa de resíduo retida em papel filtro com balança semi-analítica modelo UW 420H, da Shimadzu, e

determinou-se a massa que ficou no fundo do béquer para calcular a eficiência aparente na remoção de partículas suspensas, de forma a estabelecer um nível de correlação entre turbidez e concentração de sólidos suspensos.

Para as análises de FTIR, TGA e DRX, as palmas foram processadas em centrífuga despolpadeira modelo Vitalio e a polpa extraída foi misturada em agitador magnético com etanol 70% e etanol 98% na proporção 1:1 durante 30 minutos com velocidade de 800 rpm, sendo então filtradas a vácuo utilizando sistema de trompa d'água a 600 mmHg, coletando o extrato líquido e a massa pastosa foi seca em temperatura ambiente, exposta ao sol durante 4 horas, protegidas por um recipiente de vidro. A massa seca foi moída, peneirada em malha 200 MESH e armazenada em tubos falcon.

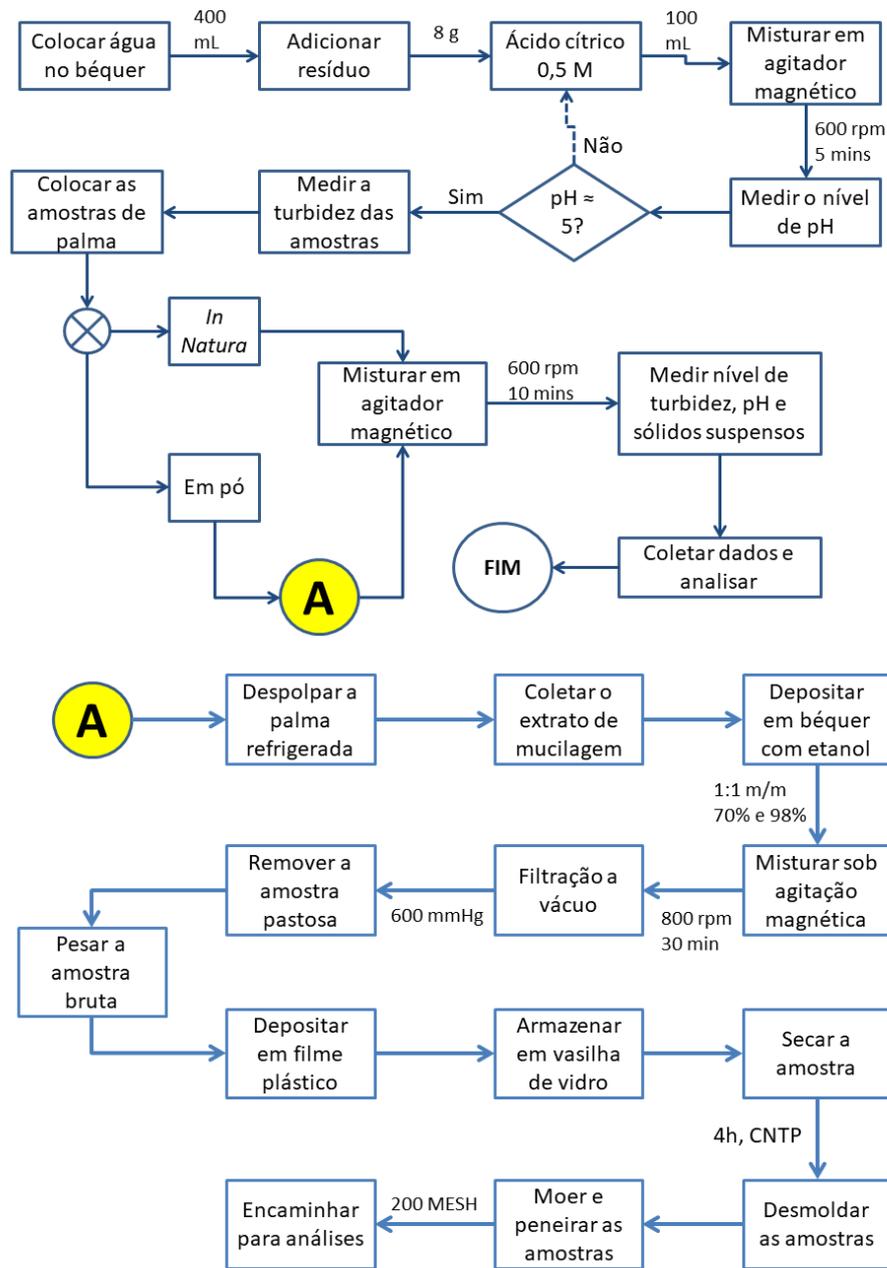
Para o FTIR, as amostras foram analisadas na forma de pastilhas diluídas em KBr (1% p.p.). O equipamento utilizado foi um espectrômetro de infravermelho modelo IRAffinity-1 da Shimadzu, localizado no Laboratório de Materiais e Biosistemas – LAMAB/CT/UFPB, em número de onda de 4000 a 400 cm^{-1} , com resolução de 4 cm^{-1} .

Para o TGA, as amostras foram analisadas em um analisador térmico DTG-60 da Shimadzu, localizado no Laboratório de Filmes Finos – LFF – da UFPB, usando uma panela de alumina com amostra de $5,00 \pm 1,00$ mg, em intervalo de 30 a 780 $^{\circ}\text{C}$, com taxa de aquecimento em 10 $^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$ e em fluxo de 50 mL/minuto de ar sintético.

Para o DRX, as amostras foram analisadas em um difratômetro XRD-6100 da Shimadzu com radiação de $\text{CuK}\alpha$, potência de 40 kV a 20 mA, com intervalo de banda 2θ entre 5 e 90 $^{\circ}$, com velocidade de 0,6 $^{\circ}/\text{minuto}$ e passo de 0,06 $^{\circ}$ no Laboratório de Solidificação Rápida – LSR/CT/UFPB.

A análise granulométrica foi realizada em equipamentos CILAS modelo 1090, localizado no Laboratório de Materiais Metálicos – LMM/CT/UFPB, em intervalo de tamanho de grão entre 0,10 e 500 μm , pressão de distribuição de amostra em 2500 mbar e obscurância de 7%.

Figura 2 – Fluxograma do processo executado.



Fonte: Autores, 2022.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme pode ser observado nas figuras 3 e 4, tomando por base os dados obtidos por Contreras-Padilla *et al* (2015), observa-se que as amostras em pó, após o processo de extração por filtração a vácuo em meio alcoólico, apresentam picos localizados em $2\theta \approx 15^\circ$, $24,4^\circ$, 30° e $38,2^\circ$, indicando a presença de whewellita $[\text{Ca}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot (\text{H}_2\text{O})]$ ou oxalato de cálcio monoidratado, cuja estrutura cristalina é acicular

– em forma de agulhas – e é uma substância frequentemente encontrada na composição química de diversas espécies de vegetais, incluindo o gênero *Opuntia* (SOUZA, 2021).

Uma observação que pode ser feita é que o etanol atuou de modo efetivo para remoção dos componentes não fibrosos, como os polissacarídeos, os compostos pectínicos e ácidos graxos, mas também acabou atuando na remoção de parte dos componentes fibrosos, como a celulose e a hemicelulose, de forma que suas presenças nas amostras não são percebidas pela análise, indicando que o processo de extração com etanol se mostra efetivo, permitindo identificar os componentes minerais que atuam na morfologia da palma forrageira e que auxiliam no processo de coagulação e floculação de sólidos. Também foi percebido que a qualidade dos picos cristalinos observados na amostra tratada com etanol 98% foi melhor visível do que na amostra com etanol 70%, indicando que na amostra da figura 3 ainda existam concentrações residuais de celulose do tipo I, formando um halo antes do pico de whewellita a 24,4°.

Figura 3 – DRX do pó de palma orelha de elefante mexicana extraída com etanol 70%.

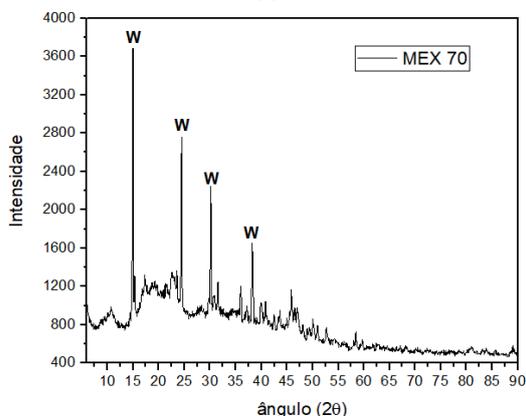
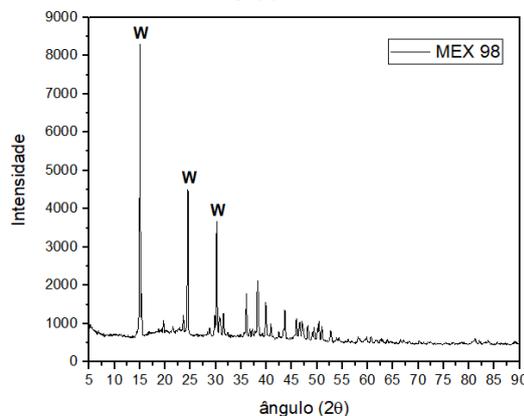


Figura 4 – DRX do pó de palma orelha de elefante mexicana extraída com etanol 98%.



O FTIR das amostras demonstrou que há ligações, conforme descritas na tabela 2 abaixo, que variam desde a formação de ligações químicas, como identificado nas figuras 5 e 6. É possível observar a formação de ligações do tipo O–H na região entre 3750 e 2800 cm^{-1} com um grafo aberto, o que indica a formação de álcoois e/ou hidroxilas referentes a vibrações de estiramento, o que levanta a hipótese de que a palma forrageira tem potencial em atuar no controle e equilíbrio do pH de águas brutas ácidas.

Figura 5 – Pó de palma orelha de elefante Mexicana diluída em etanol 70%, 1:1 m/m

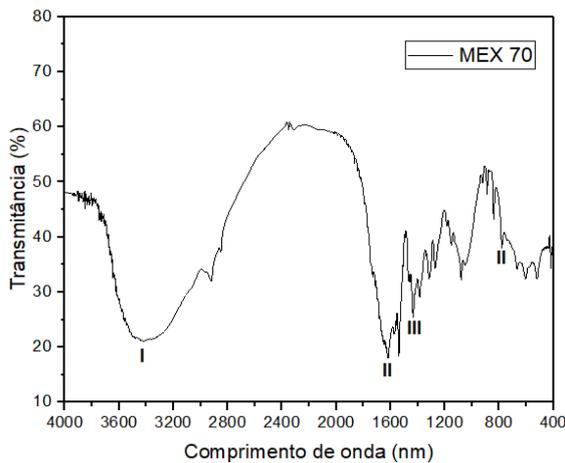
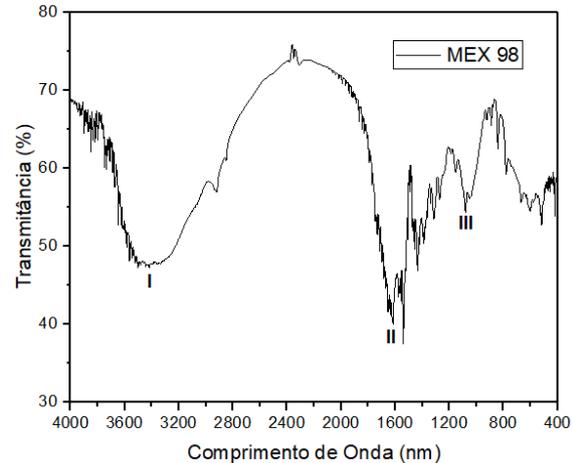


Figura 6 – Pó de palma orelha de elefante Mexicana diluída em etanol 98%, 1:1 m/m



Destaca-se que ambas as amostras apresentaram resultados muito próximos, com a presença de ligações na região entre 1650 e 1600 cm^{-1} se referem a ligações $\text{C}=\text{C}$ de compostos alifáticos, indicando a presença de whewellita, observada em 1613 e 780 cm^{-1} . Aponta-se também a presença de grupos CO_3^{2-} é identificado em 1433 e 1070 cm^{-1} em função da existência de percentuais de carbonato de cálcio na composição da palma forrageira.

Tabela 2 – Ligações químicas identificadas nas amostras analisadas por FTIR.

Amostra analisada	Absorção (cm^{-1})	Grupo	Componente
Palma tratada com etanol 70%	3550-3200 (3430)	Ligação O-H	Álcool
	1650-1600 (1613)	Estiramento $\text{C}=\text{C}$	Oxalato
	1440-1395 (1425)	Ligação C-O	Carbonato
	780 ± 20 (780)	Ligação O-C-O	Oxalato
Palma tratada com etanol 98%	3550-3200 (3446)	Ligação O-H	Álcool
	1650-1600 (1613)	Estiramento $\text{C}=\text{C}$	Whewellita
	1550-1500 (1540)	Ligação N-O	Composto nítrico
	1440-1395 (1425)	Ligação C-O	Carbonato
	1085-1050 (1070)	Ligação C-O	Bicarbonato

Fonte: Autores, 2022.

Na figura 7, referente ao TGA na amostra tratada com etanol 70%, observa-se que, com o aumento da temperatura, há uma degradação progressiva das amostras estudadas em razão da degradação térmica que os compostos orgânicos, onde o ponto 1 a 100 °C indica a transição da umidade residual para o estado gasoso, com destaque para

uma queda ligeiramente linear até o ponto da primeira transição na zona A, que vai de 240 a 380 °C, em que ocorre a degradação de componentes não fibrosos e da hemicelulose, enquanto na zona B, que vai de 448 a 529 °C, que indica a degradação da celulose e da lignina existente na amostra. Destaca-se que a lignina tem um intervalo de temperatura de degradação amplo, que pode ir de 450 a 650 °C e, após este ponto, há uma indicação na existência de cinzas, formadas pela whewellita e na formação de alguns outros compostos minerais derivados da degradação térmica, que incluem a calcita [CaCO₃], silvita [KCl], dolomita [CaMg(CO₃)₂] e a whewellita.

Figura 7 – Pó de palma orelha de elefante Mexicana diluída em etanol 70%, 1:1 m/m

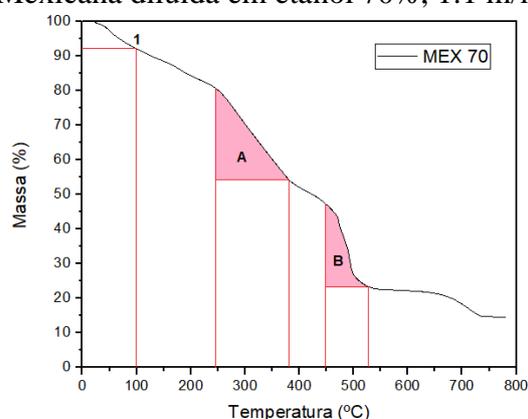
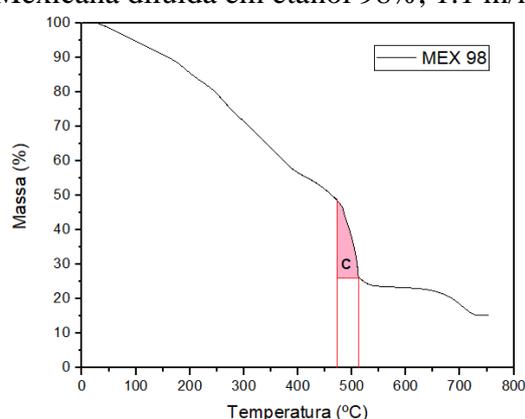


Figura 8 – Pó de palma orelha de elefante Mexicana diluída em etanol 98%, 1:1 m/m



Quanto a amostra tratada em etanol 98%, observada na figura 8, é observada apenas uma zona de transição, denominada por C, que vai de 477 a 514 °C, indicando que o etanol 98% misturado à mucilagem, quando filtrado, gerou uma remoção mais eficiente dos componentes não fibrosos, de maneira que a perda de massa teve um intervalo mais longo de linearidade e que os componentes fibrosos, incluindo a celulose e hemicelulose possuem baixa participação na composição da palma forrageira, corroborando com as informações obtidas na literatura e com o DRX realizado em ambas as amostras.

Foi feita a inserção da palma orelha de elefante mexicana nas concentrações indicadas na tabela 3 e aguardou-se o tempo predeterminado de 10 minutos para averiguar o processo de coagulação e floculação e calcular a quantidade de sólidos suspensos nas soluções de água bruta. Os resultados quanto ao tempo de coagulação das partículas apontaram que as amostras em pó não conseguiram realizar o processo de coagulação no tempo estipulado; já as amostras *in natura*, os resultados se mostraram satisfatórios no tempo de reação, apresentando os sinais de coagulação e aglutinação

com menos de 5 minutos a partir de 5 gramas por litro de solução bruta, conforme a tabela 3 aponta.

Observa-se também que o ganho de velocidade de coagulação e floculação é aproximadamente de 85% para as amostras de orelha de elefante mexicana *in natura* entre as concentrações de 2g e 15g por litro, indicando que a quantidade de pectina influencia diretamente na velocidade de coagulação das partículas em suspensão.

Tabela 3 – tempo de reação inicial de coagulação por concentração de amostra (mm:ss)

Amostra	Formato	2g	5g	10g	15g
Orelha de Elefante Mexicana	<i>In natura</i>	06:31	04:58	04:07	03:31
	Em pó	n/a	n/a	n/a	n/a

Fonte: Autores, 2022.

Na tabela 4, estão computados os resultados obtidos de partículas de sólidos suspensos retidos no papel filtro para calcular o percentual de partículas suspensas nas águas brutas após tratamento com a palma *in natura* e em pó, conforme demonstrado na equação 1.

$$SS_E = \left[1 - \left(\frac{\overline{m_{SS}}}{m} \right) \right] \times 100 \quad (1)$$

Onde SS_E é a eficiência na coagulação e floculação das partículas sólidas suspensas, $\overline{m_{SS}}$ é a média das massas retidas nos papéis-filtro e m é a massa total que havia na água bruta preparada, que é igual a $8,00 \pm 0,01$ gramas. Observa-se que a quantidade em massa retida de partículas suspensas nas águas tratadas com amostras congeladas foram superiores aos coletados nas águas tratadas com as amostras *in natura*, indicando a possibilidade de uma parte da pectina possa estar sendo removida quando o sumo é escorrido em função do processo de degelo.

Tabela 4 – Quantidade de sólidos suspensos, em gramas, nas amostras de palma orelha de elefante mexicana com 15 gramas após tratamento com palma e respectiva filtração.

Condição da amostra	Medição	S. 1	S. 2	S. 3	Média	Eficiência
In Natura	M1	1,812	1,843	1,787	1,814	77,33%
	M2	1,701	1,777	1,784	1,754	78,08%
Em pó	M1	4,481	4,812	4,713	4,669	41,64%
	M2	4,689	4,657	4,814	4,720	41,00%

Fonte: Autores, 2022.

Neste quesito, é possível apontar, em primeira instância, que a eficiência na remoção dos sólidos em suspensão das amostras tem um ganho relativamente superior quando está na forma *in natura*, cuja média está no intervalo entre 77 e 78%. Já as amostras em pó não obtiveram a mesma eficiência, obtendo eficiência entre 41 e 42%, confirmando a questão a degradação pelo calor de componentes pectínicos que atuam na coagulação e floculação de partículas. Para fins de comparação e averiguar se as informações obtidas do ensaio de sólidos suspensos são coerentes, as medições com o turbidímetro estão na tabela 5 e atestam que a redução da turbidez é superior a 80% quando em amostras de 15g. Destaque para outro ponto, não medido, sobre o efeito da densidade das amostras.

Tabela 5 – turbidez da água bruta submetida a tratamento com amostras de palma 15 gramas.

Condição da amostra	Medição	AB1	AT1	AB2	AT2	AB3	AT3	Eficiência Média
<i>In Natura</i>	M1	812	189,3	823	186,2	874	186,1	77,62%
	M2	826	191,4	697	188,7	788	195,4	75,10%
Em pó	M1	798	398	687	402	802	441	45,74%
	M2	846	418	874	439	707	437	46,68%

Fonte: Autores, 2022.

Observa-se que a redução de turbidez das amostras de águas brutas – AB, após o tratamento com as soluções *in natura* e em pó, designada por AT, atingiu uma eficiência entre 75 e 78% com a versão *in natura* e de 46% com a versão em pó, indicando que a pectina existente em sua composição é o elemento principal no tratamento de águas e efluentes quanto à remoção de partículas suspensas.

Em relação ao pH, foram realizadas 4 medições para averiguar se as amostras de palma forrageira atuam no equilíbrio de pH em água bruta acidificada com pH padronizado em $5,00 \pm 0,05$. Os resultados obtidos indicam que as amostras de palma atuaram na melhoria do pH e apresentando potencial para atuar como elemento complementar ao do hidróxido de cálcio como corretor de pH, tornando menos oneroso o processo de equilíbrio do pH para o consumo humano, conforme tabela 6 descreve.

Tabela 6 – medição do pH em amostras de água bruta acidificada antes e após o tratamento com 15 gramas das amostras de palma.

Condição da amostra	Medição	AB1	AT1	AB2	AT2	AB3	AT3	AB4	AT4	Média	Var. (%)
<i>In Natura</i>	M1	5,01	5,12	5,02	5,19	4,99	5,14	4,99	5,11	5,140	2,75
	M2	5,03	5,16	5,00	5,11	4,99	5,09	5,02	5,13	5,123	2,25
Em pó	M1	5,01	5,13	5,01	5,18	5,00	5,14	5,04	5,17	5,155	2,79
	M2	4,98	5,19	4,97	5,15	5,01	5,21	5,00	5,17	5,180	3,81

Fonte: Autores, 2022.

Conforme observado, as amostras utilizadas geraram um deslocamento do pH da água bruta para o equilíbrio, elevando, em média, cerca de 2,50% o pH das amostras *in natura* e 3,30% das amostras em pó, indicando a potencial influência dos componentes minerais da palma, com destaque para os carbonatos e oxalatos de cálcio, reforçando as informações das análises de DRX e FTIR, promovendo um impacto positivo quanto a redução da quantidade necessária de hidróxidos para equilibrar o pH em tratamentos de efluentes, comparando com as metodologias convencionais.

CONCLUSÕES

A palma forrageira estudada apresentou boas propriedades referentes à redução da turbidez e aumento do nível do pH, proporcionando a possibilidade de seu uso como um potencial coagulante e floculante biodegradável, substituindo o sulfato de alumínio como principal recurso para o tratamento de águas e efluentes. Os níveis de sólidos suspensos e de turbidez diminuíram mais de 75%, reforçando a aplicação proposta ao gênero *Opuntia*.

Em relação ao nível do pH, o aumento do valor médio implica na possibilidade da palma forrageira reduzir a quantidade necessária de hidróxido de cálcio para equilibrar os níveis de pH das águas para o consumo humano e dos efluentes tratados e lançados no meio ambiente, o que gera uma economia sobre os impactos ambientais, assim como aponta a viabilidade econômica da palma forrageira como matéria-prima, de maneira que seja uma potencial fonte de riqueza para a região do semiárido do nordeste brasileiro.

Como observado, a *Opuntia stricta haw* mostrou bons resultados nas propriedades testadas e foi identificada a presença de componentes químicos que auxiliam na coagulação e floculação, somando-se a um processo de biodegradação ecologicamente correto, o que permitiu à pesquisa indicar que não há liberação de

componentes tóxicos ou metálicos da palma forrageira durante o processo de tratamento da água e/ou do efluente.

No entanto, pesquisas mais detalhadas devem ser realizadas para prover uma viabilidade técnica e econômica para extrair os principais componentes da palma para que seja potencializada a eficiência na remoção de componentes tóxicos e partículas suspensas em águas e efluentes, além de prover à palma uma aplicação que agregue mais valor ao produtor, de forma que sua aplicação esteja além da alimentação de ruminantes nas regiões semiáridas e garantam a eficiência necessária no uso racional e gerenciável dos corpos hídricos.

AGRADECIMENTOS

A Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba – FAPESQ – e ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI/Finep – pelo suporte financeiro através do Programa Centelha. À Universidade Federal da Paraíba – UFPB, na realização das caracterizações no Laboratório de Combustíveis e Materiais do Departamento de Química – LaCoM – e ao Laboratório de Materiais e Química Ambiental do Centro de Energias Alternativas e Renováveis – LabMaQ. À OMNI Soluções em Pesquisas e Desenvolvimento de Projetos pelo preparo e tratamento das amostras no Laboratório de Pesquisa com Cactáceas – LAPEC.

REFERÊNCIAS

ANG, W. L.; MOHAMMAD, A. W. State of the art and sustainability of natural coagulants in water and wastewater treatment. **J. Cleaner Product.**, v. 262, p. 1-18, 2020.

BAYAR, N. et al. Ultrasonic extraction of pectin from opuntia ficus indica cladodes after mucilage removal: optimization of experimental conditions and evaluation of chemical and functional properties. **Food Chem.**, v. 235, p. 275-282, 2017.

BAYAR, N.; FRIJI, M.; KAMMOUN, R. Optimization of enzymatic extraction of pectin from opuntia ficus-indica cladodes after mucilage removal. **Food Chem.**, v. 241, p. 127-134, 2018.

BERTONCINI, E. I. Tratamento de efluentes e reuso da água no meio agrícola. **Rev. Tecnol. Inov. Agropec.**, v. 1, n. 1, p. 152-169, 2008.

BEYENE, H. D.; HAILEGEBRIAL, T. D.; DIRERSA, W. B. Investigation of coagulation activity of cactus powder in water treatment. **J. Appl. Chem.**, v. 1, p. 1-9, 2016. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/7815903>

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Comissão de agricultura aprova fundo de apoio à cultura da palma forrageira**. 2014. Disponível em <https://www.camara.leg.br/noticias/433997-comissao-de-agricultura-aprova-fundo-de-apoio-a-cultura-da-palma-forrageira/> Acesso em 13 março 2021.

CHOY, S. Y.; PRASAD, K. M. N.; WU, T. Y.; RAMANAN, R. N. A review on common vegetables and legumes as promising plant-based natural coagulants in water clarification. **Int. J. Environ. Sci. Technol.**, v. 12, p. 367-390, 2015.
<http://dx.doi.org/10.1007/s13762-013-0446-2>

CONTRERAS-PADILLA, M.; RIVERA-MUÑOZ, E. M.; GUTIÉRREZ-CÓRTEZ, E.; DEL LÓPEZ, A. R.; RODRÍGUEZ-GARCÍA, M. E. Characterization of crystalline structures in *Opuntia ficus-indica*. **J. Biol. Phys.**, v. 41, p. 99-112, 2015.

DELELEGN, A.; SAHILE, S.; HUSEN, A. Water purification and antibacterial efficacy of *Moringa oleifera lam*. **Agric. Food Secur.**, v. 7, n. 25, p. 1-10, 2018.

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D. **Climatologia do estado da Paraíba**. 1ª ed. Campina Grande – PB: EDUFPG, 2017.

FRANCO, C. S.; BATISTA, M. D. A.; OLIVEIRA, L. F. C.; KOHN, G. P.; FIA, R. Coagulation with *Moringa oleifera* seed prepared by different methods in water turbidity of 20 to 100 UNT. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 22, n. 4, p. 781-788, 2017.

GOYCOOLEA, F. M.; CÁRDENAS, A. Pectins from opuntia spp: a short review. **J. Prof. Assoc. Cactus**, v. 5, p. 17-29, 2003.

IPA – INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO. **Palma adensada**. Disponível em <http://www.ipa.br/resp6.php> Acesso em 17 março 2022.

JOMERTZ, J. C. S.; LANZER, L. M. Projeto do sistema individual de tratamento de esgoto doméstico (sited-08). **Anais do XIV World Water Congress**. 18 páginas. Porto de Galinhas – PE – Brazil, 2011.

MATTOS, J. S. Avaliação da eficiência de remoção de fósforo de esgoto sanitário utilizando *Cereus jamacaru*. Dissertação. 71 folhas. **Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

ORTIZ, Á. V.; ASTUDILLO, I. C. P.; GARCÍA, J. M. Caracterización de la *Opuntia ficus-indica* para su uso como coagulante natural. **Rev. Colomb. Biotecnol.**, v. 15, n.1, p. 137-144, 2013.

OSTROWSKI, J. Utilização de extrato de cacto *Cereus jamacaru* como coagulantes auxiliares para a diminuição de turbidez da água de turbidez sintética. Monografia. 46 folhas. **Graduação Tecnológica em Processos Químicos**. Universidade Federal Tecnológica do Paraná, 2014.

POZZOBON, L.; KEMPKA, A. P. Sementes de *Moringa oleifera* na clarificação de efluente de indústria de ingredientes para alimentação animal: comparação com o coagulante convencional e estudo das condições operacionais. **ENGEVISTA**, v. 17, n. 2, p. 196-206, 2015.

ROCHA, J. E. S. **Palma forrageira no Nordeste do Brasil: o estado da arte**. 40 p.: il. Sobral: Embrapa Caprinos e Ovinos, 2012.

SOUZA, L. A. **Oxalato de cálcio**. *Brasil Escola*. Disponível em <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/oxalato-de-calcio.htm> Acesso em 14 março 2022.

TONETTI, A. L. Método para tratamento de esgotos e produção de água de reuso: filtro anaeróbico combinado com filtro de areia e reator de desnitrificação. Tese. 167 folhas. **Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**. Universidade Estadual de Campinas, 2008.

WCED – The World Commission on Environment and Development. **Our common future**. Oxford: Oxford University Press, 1987.

ZARA, R. F.; THOMAZINI, M. H.; LENZ, G. F. Estudo da eficiência de polímero natural extraído do cacto mandacaru (*Cereus jamacaru*) como auxiliar nos processos de coagulação e floculação no tratamento de água. **Rev. Est. Amb.**, v. 14, n. 2, p. 75-83, 2012.

Recebido em: 10/06/2022

Aprovado em: 12/06/2022

Publicado em: 17/06/2022