

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUALIDADE AMBIENTAL

SUELI SAYURI YOKOYAMA NAGATOMO

**HEMICELULOSES CATIÔNICAS PRODUZIDAS A PARTIR DA PALHA DE
MILHO E UTILIZADAS COMO COAGULANTE PRIMÁRIO NO
TRATAMENTO DE ÁGUA BRUTA DE ABASTECIMENTO**

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL

2024

SUELI SAYURI YOKOYAMA NAGATOMO

**HEMICELULOSES CATIÔNICAS PRODUZIDAS A PARTIR DA PALHA DE
MILHO E UTILIZADAS COMO COAGULANTE PRIMÁRIO NO
TRATAMENTO DE ÁGUA BRUTA DE ABASTECIMENTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental – Mestrado, área de concentração em Meio Ambiente, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientadora

Prof. Dr. Fábio Augusto do Amaral

Coorientador

Prof. Dra. Sheila Cristina Canobre

UBERLÂNDIA

MINAS GERAIS – BRASIL

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

N147 Nagatomo, Sueli Sayuri Yokoyama, 1965-
2024 Hemiceluloses catiônicas produzidas a partir da palha
de milho e utilizadas como coagulante primário no
tratamento de água bruta de abastecimento [recurso
eletrônico] / Sueli Sayuri Yokoyama Nagatomo. - 2024.

Orientadora: Fábio Augusto do Amaral.

Coorientadora: Sheila Cristina Canobre.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Qualidade Ambiental.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2024.446>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Desenvolvimento sustentável. I. Amaral, Fábio
Augusto do, 1974-, (Orient.). II. Canobre, Sheila
Cristina, 1975-, (Coorient.). III. Universidade Federal
de Uberlândia. Pós-graduação em Qualidade Ambiental. IV.
Título.

CDU: 502.33

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental
 BR 050, Km 78, Bloco 1CCG, Sala 206 - Bairro Glória, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 2512-6717 - www.ppgmq.iclag.ufu.br - ppgmq@iclag.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Qualidade Ambiental (PPGMQ)				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 08/2024, PPGMQ				
Data:	28 de maio de 2024	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula da Discente:	12212MQA018				
Nome da Discente:	Sueli Sayuri Yokoyama Nagatomo				
Título do Trabalho:	Hemiceluloses catiônicas produzidas a partir da palha de milho e utilizadas como coagulante primário no tratamento de água bruta de abastecimento				
Área de concentração:	Meio Ambiente e Qualidade Ambiental				
Linha de pesquisa:	Processos Ambientais				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estratégias de reaproveitamento de biomassas agroindustriais para produção de coagulantes e etanol celulósico, visando a otimização da rota de extração, síntese e aplicação				

Reuniu-se por meio de web conferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental (PPGMQ), assim composta: Prof. Dr. Fábio Augusto do Amaral (Orientador); Prof.ª Dr.ª Sueli Moura Bertolino (UFU); e Prof.ª Dr.ª Carla da Silva Meireles (UFES).

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa Prof. Dr. Fábio Augusto do Amaral apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, às examinadoras, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Fábio Augusto do Amaral, Professor(a) do Magistério Superior**, em 18/07/2024, às 16:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carla da Silva Meireles, Usuário Externo**, em 25/07/2024, às 08:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sueli Moura Bertolino, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/07/2024, às 17:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5538675** e o código CRC **8349A339**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha vida – abençoada – e pelas oportunidades de aprendizado a mim concedidas.

Aos meus pais, Armando e Helia, *in memoriam*, que sempre me mostraram a importância do estudo. Minha gratidão a eles por terem me recebido como filha.

Ao meu marido Edson, que sempre apoiou minhas decisões e esteve comigo em mais esta etapa de minha vida. Ao meu filho Eduardo, por ter dado um outro sentido para a minha vida

Aos amigos de trabalho e mestrado, Elaine, Fernando e Siomar pelo apoio, incentivo, conversas, compartilhamento de conhecimentos e amizade.

Ao meu orientador, professor Dr. Fábio Augusto do Amaral, pela oportunidade, orientação, disposição e paciência durante este estudo.

Ao professor Dr. Ednaldo Carvalho Guimarães que, com muita disposição e presteza, orientou-me e auxiliou nas análises estatísticas realizadas neste estudo.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental (PPGMQ), que contribuíram para ampliar meus conhecimentos.

Ao Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) por permitir que eu realizasse a coleta da água bruta para os ensaios deste estudo.

Ao grupo de pesquisa do Laboratório de Armazenamento de Energia e Tratamento de Efluentes (LAETE/UFU) – em especial, Ana Gabriela, Amanda, Fernanda, Lara e Régis – pelo compartilhamento de seus conhecimentos e auxílio nesta pesquisa.

Ao Grupo de Materiais Inorgânicos do Triângulo (GMIT), grupo de pesquisa apoiado pela FAPEMIG (APQ-00330-14), pelas análises de FTIR.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo fomento, apoio financeiro e consolidação do Programa de Pós-graduação *stricto sensu* em Qualidade Ambiental e demais programas no Brasil.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), ao Instituto de Química (IQ-UFU), à Pró-reitora de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPP-UFU), ao Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) e ao Programa de Pós-Graduação em Qualidade Ambiental (PPGMQ-UFU) pelo incentivo à pesquisa e ao desenvolvimento sustentável e ambiental.

Agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste estudo.

RESUMO

NAGATOMO, SUELI SAYURI YOKOYAMA. Hemiceluloses Catiônicas produzidas a partir da palha de milho e utilizadas como coagulante primário no tratamento de água bruta de abastecimento. 2024. 000p. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.¹

As hemiceluloses catiônicas (HC) obtidas a partir da extração das hemiceluloses provenientes da palha que reveste a espiga do milho (PM), apresentam-se como um coagulante alternativo aos coagulantes inorgânicos utilizados no tratamento de água bruta. Sendo a PM uma fonte renovável, a conversão da biomassa lignocelulósica em produto de valor agregado torna-se importante para uma gestão sustentável de resíduos agrícolas, que é o contexto da pesquisa realizada. Em etapa inicial, a extração das hemiceluloses da PM foi realizada pelo método *Oxiorganosolv*, utilizando-se peróxido de hidrogênio em meio alcoólico básico. Na cationização das HC, utilizou-se o cloreto de 2,3-epoxi-propil-trimetil-amônio (ETA) como agente cationizante, em meio básico. A caracterização das hemiceluloses e das HC foi efetuada por meio de espectroscopia de infravermelho com transformada de *Fourier* (FTIR), análise elementar (AE) e cálculo do grau de substituição (GS). Os espectros de FTIR mostraram um aumento na intensidade na banda dos grupos metil (-CH₃) em 1476 cm⁻¹, sendo esse um forte indício de cationização das hemiceluloses. A AE das HC mostrou 2,21 (±0,14) % de nitrogênio na estrutura das HC, resultando em GS de 0,413 (±0,001). As hemiceluloses apresentaram potenciais *zeta* negativos, enquanto as HC apresentaram potenciais *zeta* positivos, indicando que houve inserção do ETA na estrutura das hemiceluloses. As HC foram aplicadas como coagulante primário em água bruta proveniente do Rio Uberabinha, coletada na Estação de Tratamento de Água Renato de Freitas, no município de Uberlândia-MG. Ensaios de *jar test* foram realizados com variação de pH de coagulação de 5 a 11, dosagens de 0,5 a 4,0 ppm de HC, tempo de sedimentação de 20 e 30 minutos e os diagramas de coagulação foram elaborados utilizando interpolação de base radial. Nos ensaios de tratabilidade, os melhores resultados encontrados foram com dosagem de 3,0 ppm, tempo de sedimentação de 20 minutos e pH de coagulação de 9,16, com remoção de cor aparente e turbidez de 66,3% e 89,2%, respectivamente, resultando em cor aparente de 13,7 uH e turbidez 0,9 uT. Constatada essa eficiência, conclui-se que as HC extraídas e sintetizadas a partir do resíduo agroindustrial da PM constituem alternativa promissora como coagulante primário no tratamento de águas de abastecimento, pois proporcionaram remoção de cor aparente e turbidez dentro dos limites estabelecidos pelos padrões normativos – sugerindo a vantagem de resultar em um lodo com maior biodegradabilidade e de menor impacto ambiental, quando na comparação com o uso de coagulantes inorgânicos.

Palavras-chave: Biomassa lignocelulósica. Resíduo agroindustrial. *Oxiorganosolv*. Coagulante orgânico. Hemiceluloses catiônicas.

¹ Comitê Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto do Amaral – UFU e Prof. Dra. Sheila Cristina Canobre.

ABSTRACT

NAGATOMO, SUELI SAYURI YOKOYAMA. Hemiceluloses Catiônicas produzidas a partir da palha de milho e utilizadas como coagulante primário no tratamento de água bruta de abastecimento. 2024. 000p. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.²

The cationic hemicelluloses (HC), obtained from the extraction of hemicelluloses from the straw covering the corn cob (PM), is considered an alternative to inorganic coagulants in the treatment of raw water. Since the PM is a renewable source, the conversion of lignocellulosic biomass into added value products is important to a sustainable management of agricultural waste, which is the context of this research. In the initial stage, the hemicellulose extraction of the PM was carried out through the *Oxiorganosolv* method, using hydrogen peroxide in a basic alcoholic medium. In the cationization of HC, we've used 2,3-epoxy-propyl-trimethyl-ammonium chloride (ETA), as a medium basic cationizing agent. The characterization of the hemicellulose and the HC was accomplished through Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), elemental analysis (EA), and calculation of degree of substitution (GS). The FTIR spectrum showed an increase in the intensity of the methyl group band (-CH₃) at 1476 cm⁻¹, with a strong indication of cationization of the hemicelluloses. The AE of the HC showed 2.21 (±0.14) % nitrogen in the structure of the HC and GS of 0.413 (±0.001). The hemicelluloses showed negative zeta potentials, while the HC showed positive zeta potentials, indicating that the ETA was inserted into the hemicelluloses' structure. The HC were applied as a primary coagulant in raw water supply from Uberabinha River, collected at Renato de Freitas Water Treatment Plant, in the municipality of Uberlândia - MG. In *jar test* trials we accomplished, with a coagulation pH range of 5 to 11, dosages of 0.5 to 4.0 ppm HC, with sedimentation time of 20 and 30 minutes, and the coagulation diagrams were elaborated using radial basis interpolation. In the treatability tests, the best results were found with a dosage of 3.0 ppm, a sedimentation time of 20 minutes and a coagulation pH of 9.16, with apparent color and turbidity removal of 66.3% and 89.2%, respectively, resulting in apparent color of 13.7 uH and turbidity of 0.9 uT. Therefore, considering this efficiency, we concluded that the HC extracted and synthesized from the PM agro-industrial waste are a promising alternative as a primary coagulant in the treatment of water supplies, since they provided the removal of apparent color and turbidity parameters within the limits established by normative standards - suggesting the advantage in a more sludge with higher biodegradability and of less environmental impact, when compared to the use of inorganic coagulants.

Keywords: Lignocellulosic biomass. Agro-industrial waste. *Oxiorganosolv*. Organic Coagulant. Cationic Hemicelluloses.

² Supervising committee: Advisor: Prof. Fábio Augusto do Amaral, Dr.
Co-advisor: Prof. Sheila Cristina Canobre, Dr.

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ACRIPOL C10	Poliacrilamida catiônica comercial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AE	Análise Elementar
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
C	Carbono
Co	Cobalto
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DMSO	Dimetilsulfóxido
ESL	Efluente Sintético de Laticínio
ETA	Cloreto de 2,3-epoxi-propil-trimetil-amônio
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de <i>Fourier</i>
Gr	Gradiente de velocidade
GS	Grau de substituição
°C	Graus Celsius
H	Hidrogênio
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio (água oxigenada)
HC	Hemicelulose(s) Catiônica(s)
HCN	Hemicelulose Catiônica Natural
HCl	Ácido clorídrico
L	Litro
LAETE	Laboratório de Armazenamento de Energia e Tratamento de Efluentes da UFU
m	Massa
M	Molar
mgL ⁻¹	Miligramas por Litro
mL	Mililitros
N	Nitrogênio
NaOH	Hidróxido de sódio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial Hidrogeniônico

PM	Palha que reveste a espiga do milho
ppm	Partes por milhão
Pt	Platina
RELAM	Rede de Laboratório Multiusuários da UFU
s	Segundo(s)
SMEWW	<i>Standard Methods for Examination of Water and Wastewater</i>
T	Temperatura
TSG	Tanino Catiônico SG
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
uH	Unidade Hazen (mg Pt Co L ⁻¹)
uT	Unidade de Turbidez
VMP	Valor Máximo Permitido

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema representativo da parede celular da PM.....	31
Figura 2 - Fragmento da cadeia molecular da celulose com sua unidade de repetição celobiose em destaque.....	32
Figura 3 - Principais açúcares que compõem as hemiceluloses.....	33
Figura 4 – Monômeros precursores da lignina.....	34
Figura 5 - Representação esquemática da síntese das hemiceluloses utilizando ETA.....	35
Figura 6 - Representação esquemática da síntese das HC utilizando ETA.....	42
Figura 7 - Fluxo da extração das hemiceluloses.....	44
Figura 8 - Esquema representativo da extração das hemiceluloses.....	45
Figura 9 - Fluxo da cationização das HC.....	46
Figura 10 - Representação esquemática das etapas de coagulação e floculação em equipamento <i>jar test</i>	51
Figura 11 - Metodologia utilizada nos ensaios e análises da tratabilidade da água bruta com o coagulante HC.....	53
Figura 12 - Espectros da FTIR das Hemiceluloses e das HC (a) e apontamentos na Fórmula estrutural e deformações relativas às bandas apontadas nos espectros de FTIR (b)	61
Figura 13 - pH do ponto de carga zero nas hemiceluloses e nas HC.....	65
Figura 14 - Perfis potenciométricos e condutimétricos das titulações simultâneas das hemiceluloses e das HC.....	66
Figura 15 - Variação do Potencial Zeta em função do pH para as hemiceluloses e para as HC.....	69
Figura 16 - Resultados unificados de medidas de superfície (ponto de carga zero, titulações potenciométricas/condutimétricas simultâneas e potenciais <i>zeta</i>) nas hemiceluloses e nas HC.....	70
Figura 17 - Ensaios de tratabilidade da água bruta com 3,0 ppm de HC em pH variando de 6 a 11 - após 30 minutos de sedimentação.....	81

Figura 18 - Diagramas de coagulação com dosagem de HC variando de 100 a 400 ppm.....	82
Figura 19 - Diagramas de coagulação com dosagem de HC variando de 0,5 a 4 ppm no tempo de sedimentação de 20 minutos.....	83
Figura 20 - Diagramas de coagulação com dosagem de HC variando de 0,5 a 4 ppm no tempo de sedimentação de 30 minutos.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pesquisas com uso de coagulantes alternativos no tratamento de efluentes efetuadas pelos alunos do LAETE.....	19
Tabela 2 - Composição da PM em três estudos - percentual de celulose, hemicelulose e lignina.....	32
Tabela 3 - Aplicação das HC como auxiliar de coagulação ou coagulante primário no tratamento de efluentes e seus principais resultados.....	36
Tabela 4 - Métodos analíticos para caracterização físico-química da água bruta e tratada.....	50
Tabela 5 - Parâmetros físicos adotados inicialmente na realização dos ensaios	52
Tabela 6 - Parâmetros físicos adotados neste estudo.....	52
Tabela 7 - Padrão organoléptico de potabilidade - Portaria GM/MS 888/202.....	55
Tabela 8 - Rendimento das hemiceluloses neste estudo.....	57
Tabela 9 - Percentuais de hemiceluloses encontrados nas cascas do amendoim e na PM.....	58
Tabela 10 - Rendimento das HC neste estudo.....	58
Tabela 11 - Percentual de HC encontrado em outros trabalhos.....	59
Tabela 12 - Dados da Análise Elementar (AE) das hemiceluloses e das HC.....	60
Tabela 13 - Grau de Substituição das HC calculado a partir da Análise Elementar (AE) de diferentes fontes de biomassa.....	60
Tabela 14 - Principais atribuições das bandas dos espectros de FTIR das hemiceluloses e das HC em diferentes biomassas.....	63
Tabela 15 - Resultados obtidos com dosagem de 100 e 400 ppm de HC no tempo de sedimentação de 15 minutos.....	74
Tabela 16 - Resultados obtidos com dosagem de 1,0 ppm de HC no tempo de sedimentação de 15 e 30 minutos.....	75
Tabela 17 - Resultados obtidos com dosagem em duas etapas de HC (1,0 ppm mais 0,5 ppm de HC) no tempo de sedimentação de 15 minutos.....	76
Tabela 18 - Média e desvio padrão da média dos parâmetros de caracterização analítica da água bruta antes da realização dos ensaios de tratabilidade.....	77
Tabela 19 - Resultados obtidos com dosagens de HC (0,5 a 4,0 ppm) no tempo de sedimentação de 20 minutos.....	78
Tabela 20 - Resultados obtidos com dosagens de HC (0,5 a 4,0 ppm) no tempo de sedimentação de 30 minutos.....	79
Tabela 21 - Melhores pontos experimentais de remoção de turbidez e de cor aparente obtidos neste estudo na dosagem de 3,0 ppm.....	85
Tabela 22 - Análise do desdobramento de tempo em cada nível de dosagem de 3,0 ppm de HC e pH 9,16* para Cor Aparente e Turbidez.....	85

Tabela 23 - Análise do desdobramento de pH dentro de cada nível de dosagem de 3,0 ppm HC e tempo de 20 minutos* para Cor Aparente e Turbidez.....	86
Tabela 1A - Dosagem 100 ppm HC com tempo de floculação de 15 minutos e repouso de 15 minutos.....	101
Tabela 2A - Dosagem de 400 ppm HC com tempo de floculação de 15 minutos e repouso de 15 minutos.....	102
Tabela 3A - Dosagem de 1,0 ppm HC com tempo de floculação de 15 minutos e repouso de 15 minutos.....	103
Tabela 4A - Dosagem de 1,0 ppm HC com tempo de floculação de 30 minutos e repouso de 30 minutos.....	104
Tabela 5A - Água do Experimento 1** + 0,5 ppm HC com tempo de floculação de 15 minutos e repouso de 15 minutos.....	105
Tabela 6A - Água do Experimento 2*** após tempo de sedimentação de 60 minutos.....	106
Tabela 7A - Dosagem de 1,0 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos.....	107
Tabela 8A- Dosagem de 2,0 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos.....	108
Tabela 9A - Dosagem de 3,0 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos.....	109
Tabela 10A - Dosagem 4,0 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos.....	110
Tabela 11A - Dosagem de 0,5 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos.....	111
Tabela 12A - Dosagem de 0,5 a 4,0 ppm HC com pH em torno de 5,0 e tempo de floculação de 28 minutos.....	112

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	25
2.1 Objetivo Geral	25
2.2 Objetivos específicos	25
3 REFERENCIAL TEÓRICO	26
3.1 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)	26
3.2 O tratamento de água	28
3.3 Uso da palha de milho como fonte de matéria-prima renovável	30
3.4 Celulose, Hemicelulose e Lignina	32
3.5 Hemiceluloses Catiônicas	34
3.6 Aplicação das HC em diversos tipos de efluentes	35
3.7 Coagulantes inorgânicos e coagulantes orgânicos	39
3.8 Processo de coagulação e floculação na água	40
4 MATERIAL E MÉTODOS	42
4.1 Obtenção da Hemicelulose Catiônica (HC) a partir da PM	42
<i>4.1.1 Extração das Hemiceluloses</i>	43
<i>4.1.2 Cationização das Hemiceluloses</i>	46
4.2 Caracterização estrutural e espectroscópica dos materiais	47
<i>4.2.1 Determinação do Grau de Substituição (GS) por Análise Elementar (AE) e determinação do rendimento</i>	47
<i>4.2.2 Caracterização espectroscópica por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)</i>	48
4.3 Determinação pH do Ponto de Carga Zero (pH_{PCZ})	48
4.4 Determinação da carga superficial por titulação potenciométrica e condutimétrica simultâneas	49
4.5 Determinação do potencial Zeta	49
4.6 Água de estudo: Água Bruta Superficial	50
4.7 Determinação dos ensaios de tratabilidade: coagulação/ floculação e sedimentação	51
4.8 Ensaio de tratabilidade	53
4.9 Valor máximo permitido (VMP) para Cor aparente e Turbidez	55
4.10 Estabelecimento dos diagramas de coagulação	55
4.11 Análise estatística dos parâmetros de tratabilidade	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57

5.1	Rendimento das Hemiceluloses e da HC	57
5.2	Caracterização das hemiceluloses e HC por análise elementar (AE) e grau de substituição (GS)	59
5.3	Caracterização espectroscópica das hemiceluloses e HC por FTIR	61
5.4	Determinação do pH do Ponto de carga zero (pH_{PCZ})	64
5.5	Titulações potenciométrica e condutimétrica simultâneas das hemiceluloses e HC	65
5.6	Determinação do Potencial Zeta das hemiceluloses e HC	68
5.7	Ensaio de tratabilidade em equipamento <i>jar test</i>	71
5.7.1	<i>Um breve histórico da investigação da dosagem da HC</i>	72
5.7.2	<i>Ensaio de tratabilidade realizado com 100 e 400 ppm de HC com amostras diferentes</i> ..	73
5.7.3	<i>Comparação de 2 ensaios com dosagem de 1,0 ppm de HC com aumento nos tempos de floculação e sedimentação, passando de 15 minutos para 30 minutos (em amostras diferentes)</i>	74
5.7.4	<i>Ensaio de tratabilidade realizado com 1,0 ppm de HC com adição de 0,5 ppm HC</i>	75
5.7.5	<i>Ensaio de tratabilidade com dosagem de HC de 0,5 a 4,0 ppm e variação de pH de 5 a 11</i>	77
5.8	Diagramas de coagulação dos ensaios de tratabilidade	81
5.8.1	<i>Diagramas de coagulação com dosagem de 100 e 400 ppm de HC</i>	81
5.8.2	<i>Diagramas de coagulação dos ensaios de tratabilidade com dosagem de HC de 0,5 a 4,0 ppm com variação do pH de 5 a 11 com tempo de sedimentação de 20 e 30 minutos</i>	82
5.9	Estabelecimento de análises estatísticas dos resultados de tratabilidade	84
6	CONCLUSÕES	88
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICE A	100
	APÊNDICE A – TABELAS	101

1 INTRODUÇÃO

O consumo humano de água exige padrões específicos de potabilidade. Como forma de alcançar esses padrões, a água bruta – como é encontrada no ambiente – deve passar por algum tipo de tratamento (Vianna, 2019), de forma que esteja adequada para o consumo.

Os tratamentos convencionais de água normalmente utilizam coagulantes inorgânicos compostos por sais de ferro e alumínio. Monaco *et al.* (2010) informam que no Brasil, o sulfato de alumínio é um coagulante inorgânico muito utilizado para tratar a água de abastecimento público em razão de seu relativo baixo custo para aquisição e por sua alta eficiência na remoção de sólidos em suspensão.

O uso de coagulantes inorgânicos é preocupante, considerando-se o potencial de toxicidade desse tipo de coagulante. O residual de alumínio em águas tratadas e a dificuldade quanto à disposição final do lodo contendo alumínio no meio ambiente é preocupante, pois pode estar relacionado com doenças como o mal de Alzheimer e doença de Parkinson. Concentrações elevadas de alumínio, sabe-se, podem representar um risco potencial para a saúde humana, gerando alterações cerebrais características da doença de Alzheimer (Krupinska, 2020).

Vários estudos têm sido realizados visando à substituição dos coagulantes inorgânicos por coagulantes orgânicos no tratamento de águas, pois não apresentam metais em sua constituição, apresentam baixa toxicidade, são biodegradáveis e sua fonte de matéria-prima é renovável – a exemplo dos resíduos da agroindústria (Choy *et al.*, 2014).

As hemiceluloses são provenientes da palha que reveste a espiga do milho (PM), uma biomassa lignocelulósica constituída principalmente por celulose, hemicelulose e lignina – que é um recurso abundante e renovável. Assim sendo, uma destinação alternativa sustentável da PM seria sua utilização como fonte de matéria-prima para a extração das hemiceluloses para síntese das HC que podem ser usadas como coagulante ou auxiliar de coagulação em diversos tipos de efluentes: esgoto doméstico e industrial (Landim *et al.*, 2013), lavanderia industrial (Ribeiro *et al.*, 2017a) ou efluente sintético de laticínio (Mesquita, 2023), por exemplo.

A hipótese de pesquisa levantada é de que a HC produzida a partir da extração das hemiceluloses por deslignificação *Oxiorganosolv* com agente cationizante ETA, pode ser um coagulante viável no tratamento de água bruta em Estações de Tratamento de Água.

Nesse contexto, o presente trabalho insere-se na linha de pesquisa do LAETE. Sendo continuidade dos estudos do grupo (ver Tabela 1), busca formular novos coagulantes a partir de resíduo lignocelulósico, de modo que este possa ser aplicado a diversos tipos de efluentes, na busca por processos mais sustentáveis de tratamento de efluentes, com menor impacto ambiental e garantindo sustentabilidade. Este trabalho é a primeira pesquisa realizada pelo grupo utilizando-se água bruta de abastecimento.

Tabela 1 - Pesquisas com uso de coagulantes alternativos no tratamento de efluentes efetuadas pelos alunos do LAETE

Período	Referência	Tipo de Pesquisa	Título	Avanços da Pesquisa
2011-2013	Thompson Júnior (2013)	Dissertação	Investigação da flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes de lavanderia industrial utilizando coagulante de fonte renovável tanino	Estabeleceu todas as metodologias de tratamento de águas e efluentes, construiu todos os instrumentos para separação sólido-líquido por flotação por ar dissolvido (FAD). Publicação do livro Passando a Limpo.
2011-2013	Costa (2013)	Dissertação	Investigação de diagramas de coagulação utilizando coagulantes e auxiliares de coagulação de fontes renováveis	Investigou diferentes proporções e formas de aplicação de coagulantes orgânicos e inorgânicos de forma sistemática.
2014-2017	Ribeiro (2017)	Tese	Lignocelulósicos nos processos de purificação de biodiesel por via úmida utilizando floculantes de fontes renováveis e processo de separação com membranas de celulose regenerada	Primeira investigação de metodologia de extração de hemiceluloses com aplicação de hemiceluloses catiônicas (HC) como auxiliares de coagulação para tratamento de efluentes sintético e real de biodiesel.
2017a	Ribeiro <i>et al.</i> (2017a)	Artigo	Utilização de hemiceluloses catiônicas obtidas a partir do aproveitamento da palha de milho, associadas com tanino para o tratamento de efluentes de lavanderia industrial	Primeira proposição de HC como auxiliar de coagulação extraídas de uma fonte de biomassa. Estabeleceu as metodologias dos diagramas de coagulação.
2017b	Ribeiro <i>et al.</i> (2017b)	Artigo	Polymeric polyelectrolytes obtained from renewable sources for biodiesel wastewater treatment by dual flocculation	Primeira proposição das HC como coagulante primário em um sistema de dual flocculation com sulfato de acetato de celulose (SAC).

(continua)

Tabela 1, Cont.

2018	Resende (2018)	Trabalho de Conclusão de Curso	Uso do tanino associado ao sulfato de alumínio como coagulantes para o tratamento de efluente de lavanderia industrial	Continuidade dos trabalhos de Thompson Jr. Investigou as relações de pH e dosagens do coagulante orgânico com inorgânico.
2017-2019	Castro <i>et al.</i> (2019)	Capítulo de livro	Aplicação de coagulantes orgânicos catiônicos sintetizados por indução de micro-ondas para o tratamento de efluentes industriais	Investigou a síntese das HC por micro-ondas.
2016-2019	Rozeno (2019)	Iniciação científica e Trabalho de Conclusão de Curso	Investigação do uso de floculantes de fontes renováveis para o tratamento físico-químico de efluente industrial de processamento de milho	Continuidade do trabalho de Ribeiro. Avaliou as diferentes proporções entre tanino/hemiceluloses catiônicas com adição posterior de sulfato de acetato de celulose (<i>dual flocculation</i>).
2017-2020	Castro (2020)	Iniciação científica e Trabalho de Conclusão de Curso	Síntese de hemiceluloses catiônicas por indução de micro-ondas para utilização como coagulante em tratamento de efluentes industriais	Investigou diferentes formas de aplicação do coagulante HC, em meio ácido e neutro , associadas ou não ao tanino. Aumento da atuação dos coagulantes em regiões neutras.
2019-2021	Pacheco (2021)	Dissertação	Investigação de hemiceluloses catiônicas obtidas de cascas de amendoim como coagulante primário no tratamento físico-químico de efluente sintético de laticínio	Primeira investigação por captura/binarização de imagens digitais por método não intrusivo , HC demonstraram uma baixa variação da Dimensão Fractal (Df) dos flocos de 1,319 ($\pm 0,02$) e 1,871 ($\pm 0,001$), para HCN e TSG, respectivamente, com formação de flocos menores e menos densos das HCN (diâmetros de 0,023 a 0,254 mm) comparado ao tanino TSG (0,032 a 5,718 mm).

(continua)

Tabela 1, Cont.

2022	Pacheco <i>et al.</i> (2022)	Artigo	Performance of cationic hemicelluloses arising from peanut shell residue from agroindustry in application as primary coagulant in physical-chemical treatment of dairy wastewater	Estabeleceu estudo teórico de FTIR por química computacional para as HC e diagramas de coagulação modelo regressão <i>Kringing</i> .
2021	Alves (2021)	Trabalho de Conclusão de Curso	Investigação de hemicelulose catiônica – sintetizada a partir de resíduo agroindustrial casca de amendoim – como coagulante natural no tratamento de efluente industrial de laticínio	Investigou sistematicamente as HC a partir do resíduo agroindustrial casca de amendoim (biorrefinaria), estabelecendo padrões estatísticos para determinação de pontos ótimos, a partir de diagramas de coagulação tridimensionais . Os parâmetros de análise morfológica dos flocos das HC obtidos por DTP (captura/binarização de imagens digitais) indicou baixa agregação de partículas .
2022	Alves <i>et al.</i> (2022)	Artigo	Investigation of new natural coagulant - cationic hemicellulose associated with cationic tannin - for coagulation/dissolved air flotation (C/DAF) in the treatment of industrial effluent	As hemiceluloses catiônicas foram investigadas como coagulante primário e submetidas à separação por flotação por ar dissolvido (FAD) . Primeiro estudo a estabelecer mecanismos de interação bolha-partícula das HC na separação por flotação por ar dissolvido (FAD) inferindo que prevaleçam interação bolha-partícula por <i>attachment</i> para as HC e <i>entrapment</i> para o TSG.

(continua)

Tabela 1, Cont.

2021-2023	Borgato (2023)	Dissertação e (submissão do artigo)	Novo pré-tratamento <i>Oxiorganosolv</i> da palha de milho em temperatura ambiente para a produção de açúcares fermentescíveis e etanol A new low temperature <i>Oxigornasolv</i> pretreatment of corn straw for fermentable sugars and ethanol production	Primeira investigação do método <i>Oxiorganosolv</i> de pré-tratamento para deslignificação de biomassa (resultou no pedido de patente). A condições da deslignificação oxidativa básica em meio alcoólico , <i>Oxiorganosolv</i> (PT-OOS) foram estabelecidas.
2021-2023	Mesquita (2023)	Dissertação	Aplicação de hemiceluloses catiônicas sintetizadas a partir de hemiceluloses extraídas de holoceluloses obtidas por diferentes métodos de deslignificação da palha de milho, como coagulante em tratamento de efluente de laticínio	Sequência do trabalho de Alves, comparando-se as HC obtidas por dois métodos de deslignificação: clorito-ácido e <i>Oxiorganosolv</i> . A deslignificação da biomassa lignocelulósica pelo método de oxidação por peróxido de hidrogênio. propiciou uma redução de tempo de 87.5% nessa etapa e de custo de 86,34% em relação a deslignificação por clorito de sódio. Aplicou as HC em menores dosagens que Alves. A aplicação do coagulante HC CL-ETA em 18,75 ppm em pH 11 forneceu remoções de turbidez, cor verdadeira e DQO de 83,74%, 93,33% e 55,67% e do HC PER-ETA em 12,5 ppm em pH 10 forneceu remoções de turbidez, cor verdadeira e DQO de 73,61%, 84,91% e 64,90%.

(continua)

Tabela 1, Cont.

2023	Tomé <i>et al.</i> (2023)	Artigo	Biorefinery of peanut shell agroindustrial lignocellulosic waste for synthesis of a natural coagulant applied in the treatment of dairy wastewater	Investigou sistematicamente a rota de síntese de HC a partir do resíduo agroindustrial casca de amendoim (biorrefinaria), resumindo tanto os aprendizados de rotas de síntese, métodos de deslignificação, quanto de aplicação de coagulantes com análise dos flocos sedimentados. Ademais, foi a primeira investigação de titulações condutimétricas/potenciométricas, ponto de carga zero e potencial zeta para estabelecimento de efeitos de superfícies das HC, inferindo sobre o mecanismo de adsorção e neutralização de cargas para a atuação das HC como coagulante primário.
2023 2024	Tomé <i>et al.</i> (2024)	Patente	<i>Oxiorganosolv</i> , carboximetilcelulose	Primeiro pedido de patente do Grupo de deslignificação pelo método <i>Oxiorganosolv</i> sem aplicação de temperatura ou pressão controlada. Estabelecimento da rota de síntese da carboximetilcelulose (a partir da celulose) visando aumentar o conceito de biorrefinaria de destinação para as diferentes frações poliméricas (celulose, hemiceluloses e lignina). A carboximetilcelulose será investigada como floculante aniônico (<i>dual flocculation</i>) em substituição ao SAC.

(continua)

Tabela 1, Cont.

2023 - 2024	Lara/Ana Clara	Iniciação Científica	Deslignificação <i>Oxiorganosolv</i> a partir do sabugo de milho para síntese da carboximetilcelulose	Em andamento. Pré-tratamento <i>Oxiorganosolv</i> para deslignificação do resíduo agroindustrial sabugo de milho e síntese de dois coagulantes naturais para tratamento de água em um sistema dual flocculation. O sabugo de milho contendo celulose e hemiceluloses será usado para produção de um coagulante natural secundário: carboximetilcelulose (CMC) , a partir da extração do resíduo da Bayer, para agregar valor a celulose.
2023 - 2024	Felicio	Iniciação Científica	Estratégias de reaproveitamento de biomassas agroindustriais para produção de coagulantes e etanol celulósico, visando a otimização da rota de extração, síntese e aplicação. Captura de imagens digitais binarizadas (laser vermelho)	Em andamento. O sistema dual flocculation será investigado aplicando o coagulante catiônico de forma simultânea a um coagulante aniônico, a carboximetilcelulose (CMC) em dosagens de 0,5 a 4,0 ppm para pH entre 5 e 11 por captura/binarização de imagens digitais (DTP, dimensão fractal) para avaliar a estrutura, resistência, quebra e reformação dos flocos.

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Investigar o desempenho das HC como coagulante primário, obtido da PM, considerando a remoção da cor aparente e da turbidez no processo de tratabilidade (coagulação, floculação e sedimentação) aplicada a água bruta superficial para abastecimento, tendo em vista processos sustentáveis.

2.2 Objetivos específicos

São estabelecidos como objetivos específicos:

- a) Extrair as hemiceluloses da PM por meio do método de deslignificação *Oxiorganosolv* com peróxido de hidrogênio em meio alcoólico básico;
- b) Cationizar as hemiceluloses usando o agente cationizante ETA (Cloreto de 2,3-epoxi-propil-trimetil-amônio) em meio básico;
- c) Caracterizar as hemiceluloses e as HC por espectroscopia na região do infravermelho e determinação do grau de substituição;
- d) Aplicar as HC provenientes da PM como coagulante primário em água bruta superficial para abastecimento, em ensaios de tratabilidade, em equipamento *jar test*, elaborando diagramas de coagulação com diferentes faixas de pH e dosagem de HC para remoção de cor aparente e turbidez.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão bibliográfica empenhada neste capítulo foca o tratamento de água para abastecimento público, abordando coagulantes orgânicos e HC, a fim de esclarecer pontos relevantes para uma melhor compreensão da pesquisa realizada. De modo igualmente importante, aborda os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) relacionados ao trabalho aqui desenvolvido.

3.1 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS)

No mês setembro de 2015 foi realizada na cidade de Nova York a Assembleia Geral das Nações Unidas, que contou com a participação de 193 países membros da ONU – incluindo o Brasil. Nesse evento, foram estabelecidos os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e as 169 metas a serem atingidas até o ano de 2030. Esses objetivos devem ser atingidos por meio de cinco pilares: pessoas, planeta, prosperidade, paz e parcerias. Esses pilares são conhecidos também como 5 Ps e as dimensões do desenvolvimento sustentável são de ordem econômica, social, ambiental e institucional (ONU, 2015).

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 2 (ODS 2) está ligado à agricultura e à segurança alimentar e, nesse sentido, a agricultura tem como responsabilidade fornecer alimentos, cumprindo essa demanda nos próximos anos, sendo fundamental a criação de estratégias para redução dos impactos associados à produção agrícola, sem que haja prejuízo ao meio ambiente. O desenvolvimento agrícola é uma ferramenta poderosa para reduzir ou extinguir a pobreza extrema; no entanto, a quantidade de resíduos gerada pela agricultura requer melhores abordagens e perspectivas, tendo em vista reduzir o impacto ambiental. Isso faz emergir oportunidades para usos de resíduos da agricultura como matéria-prima industrial renovável (Vaz Junior, 2020).

Uma das metas do ODS 3 trata de assegurar uma vida saudável, promover o bem-estar para todos e em todas as idades, reduzindo o número de mortes e doenças por produtos químicos perigosos. Assim sendo, pode-se dizer que fatores como a emergência do controle biológico, a consolidação das sementes transgênicas e o aumento de eficiência

no uso de fertilizantes por microrganismos contribuem para o alcance desta meta na cadeia do milho, especificamente (Miranda, 2021).

De acordo com a ONU (Nações Unidas Brasil), o acesso à água potável e ao saneamento básico é um direito humano essencial, ligado aos direitos à vida, à saúde, à alimentação e à habitação. Uma das metas do ODS 6 é alcançar o acesso universal e equitativo à água potável e segura, atingindo também acesso universal ao saneamento e à higiene. Segundo dados da Agência Nacional da Água (ANA, 2019), no ano de 2017, um percentual de 97,2% da população brasileira teve acesso a serviços de água potável geridos de forma segura; entretanto, apenas 86,7% dos domicílios possuíam água diariamente, e 31% da população ainda viviam em municípios com baixa garantia hídrica, sendo, portanto, afetados em períodos de seca. No ano de 2016, no Brasil, eram tratados apenas 50% dos esgotos gerados pela população urbana e rural em sistemas coletivos e em fossas sépticas (Jacobi *et al.*, 2020). Em 2017, índice de tratamento de esgoto foi de 73,7% e subiu para 80,8% em 2021 (BRASIL, 2023).

Necessário é reconhecer que a disponibilidade de água potável não é uma realidade em todo o Brasil, uma vez que há regiões no país que sofrem a escassez de água, o que vulnerabiliza suas populações e dificulta o desenvolvimento dessas regiões. O não tratamento do esgoto doméstico, com lançamento de água não tratada em cursos d'água causam diversos problemas ambientais – como a poluição das águas superficiais e subterrâneas –, deixando comunidades e povoados suscetíveis a doenças (Monaco *et al.*, 2010) e prejudicando os ecossistemas aquáticos. Por outro lado, a utilização de coagulantes/floculantes a base de metal nos tratamentos de água e das águas residuais é preocupante em razão de seus efeitos na saúde humana e da poluição dos ambientes aquáticos pelo lodo não biodegradável gerado. O uso de biocoagulantes/biofloculantes, por sua vez, não resulta na presença de resíduos químicos no efluente e cria lodo que é biodegradável e não prejudicial (Kurniawan *et al.*, 2020). Isso diminui os impactos ambientais e cumpre metas do ODS 6.

Nesse contexto, a presente pesquisa utilizou a PM, resíduo do cultivo do milho, como fonte de matéria-prima para a extração das hemiceluloses e síntese das HC, aqui estudadas como coagulante primário no tratamento de água para abastecimento. Nesse empreendimento de estudo, a pesquisa corresponde aos ODS 2, ODS 3 e ODS 6, portanto

colaborando para atingir as metas propostas pelos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da ONU.

3.2 O tratamento de água

A água é indispensável ao organismo vivo e se faz necessário consumi-la tendo havido eliminação ou redução de certos elementos químicos e microrganismos, de forma que seja garantida segurança no consumo da água. Algumas doenças são transmitidas por meio da água de qualidade insatisfatória e, exatamente por isso, a água deve passar por tratamento adequado e atender aos padrões de potabilidade vigentes no país, de modo a evitar essas doenças (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017). No Brasil, o padrão de potabilidade da água está descrito na Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 (Ministério da Saúde, 2021).

O tratamento de saneamento pelo qual a água passará depende da qualidade dessa água – ou seja, responde ao enquadramento da água em classe específica, de acordo com a Resolução CONAMA 357 (Brasil, 2005). A resolução classifica os corpos de água em doces, salobras e salinas. As águas doces são classificadas em Especial, Classe 1, Classe 2, Classe 3 e Classe 4. As Classes Especial, 1, 2 e 3 podem ser destinadas para consumo humano após passar por tratamento. No entanto, águas de Classe 4 só podem ser destinadas à navegação e à harmonia paisagística.

Choy *et al.* (2014), em seu trabalho de revisão, apresentaram diversos tipos de coagulantes a base de plantas – incluindo resíduos de frutas e outras fontes (cactos, cereais, fungos, nozes, arbustos e especiarias), os quais desempenharam atividades de coagulação promissoras no tratamento de águas turvas. Vários desses coagulantes podem fornecer desinfecção primária contra algumas bactérias comumente presentes em águas superficiais e outros são capazes de remover metais pesados. Os coagulantes a base de plantas são seguros, ecologicamente corretos, geralmente livres de tóxicos e geram volume muito menor de lodo, sendo este de maior valor nutricional.

Lodos resultantes do tratamento de águas que utiliza os polímeros orgânicos provenientes de biomassa como coagulantes/floculantes podem servir como matéria-

prima na produção de fertilizante orgânico de liberação lenta e controlada de nitrogênio (Mangrich *et al.*, 2014).

As diversas possibilidades de aplicação dos coagulantes orgânicos (tratamento de águas superficiais, subterrâneas e residuais) refletem a importância dos produtos naturais em todo o mundo e representam uma opção sustentável para o desenvolvimento de processos químicos que vão ao encontro dos princípios da Química Verde. Além disso, resultam na possibilidade de geração de renda nos países em desenvolvimento por meio do aproveitamento de matérias-primas abundantes ou subutilizadas (Lima Júnior; Abreu, 2018).

Como exemplo de trabalhos que utilizaram coagulantes orgânicos no tratamento de água, podem ser citadas algumas pesquisas. Abdulsalam. *et al.* (2007), estudando a clarificação da água bruta de Maiduguri, na Nigéria, usaram o óleo extraído das sementes da *Moringa oleífera* como coagulante e obtiveram uma remoção na turbidez de 82,35% para a dosagem ótima de 180 ppm. Os autores destacam no estudo que a moringa pode substituir o sulfato de alumínio por ser ela econômica, ecológica, de aquisição local. O lodo produzido a partir do coagulante da moringa pode ser utilizado na produção de biofertilizante por ser biodegradável.

Monaco *et al.* (2010) avaliaram a eficiência de diferentes concentrações do extrato de sementes de moringa como agente coagulante na remoção de turbidez a ser utilizada em abastecimento público e concluíram que, na concentração de 0,4 gL⁻¹ do extrato em um tempo de sedimentação de 2 horas, a remoção de turbidez foi de até 98%, demonstrando que as sementes de moringa são uma alternativa para o tratamento de água.

Bongiovani *et al.* (2010) estudaram a aplicação do coagulante orgânico a base de tanino, Tanfloc SS no tratamento das águas do Rio Pirapó (PR) e concluíram que as melhores remoções nos parâmetros cor e turbidez ocorreram na faixa de pH de 6,0 a 9,0, em concentração do coagulante de 10,0 a 60,0 mgL⁻¹, mantendo-se a temperatura da água na faixa de 25,0 ± 3,0°C. Concluiu-se, também, que a utilização de coagulantes orgânicos biodegradáveis é uma alternativa técnica aos coagulantes convencionais, gerando benefícios para a saúde pública e preservação ambiental.

Silveira *et al.* (2019) avaliaram a performance dos coagulantes orgânicos a base de tanino, Tanfloc SG e Tanfloc SL e dos coagulantes inorgânicos sulfato de alumínio e cloreto férrico na água bruta do reservatório em Epitácio Pessoa (Boqueirão, Paraíba) por

meio de diagramas de coagulação com variação de dosagem, em pH de 4,5 a 9,5. Com base nos diagramas, observaram que os flocos gerados com os coagulantes orgânicos apresentaram velocidades de sedimentação maiores na comparação com os coagulantes inorgânicos. Os valores obtidos de Turbidez foram inferiores a 0,5 uT em amplas faixas de pH.

3.3 Uso da palha de milho como fonte de matéria-prima renovável

Com o possível esgotamento dos recursos derivados do petróleo – como gás natural, carvão e minerais – o foco volta-se para os recursos renováveis. Um desses recursos são os resíduos agrícolas, abundantes e disponíveis a baixo custo (Mohite *et al.*, 2022).

Para Vaz Junior (2020), a preocupação com o aproveitamento de resíduos da agricultura se deve a uma pressão mundial para que os processos produtivos sejam cada vez mais sustentáveis, reduzindo os impactos negativos ao meio ambiente e aumentando os impactos positivos na sociedade e na economia. O uso de diferentes tipos de biomassa vegetal pode ser a alternativa de uso para matérias-primas mais barata e menos poluente, quando da comparação com fontes não renováveis de elevado potencial poluidor.

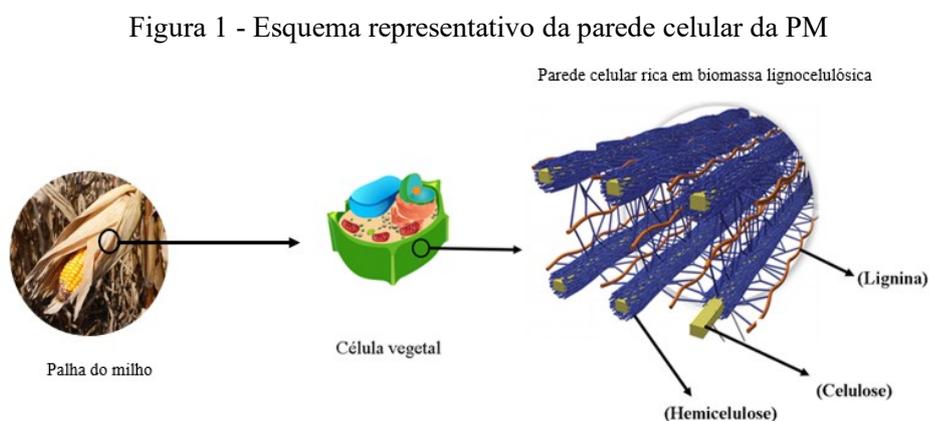
Partindo dessa perspectiva, estão sendo desenvolvidas pesquisas visando ao aproveitamento desses resíduos gerados pela agricultura, de modo a tornar também o cultivo dos alimentos mais produtivo e sustentável. Tem-se estabelecido já o entendimento de que as tecnologias geradoras de novos produtos a partir de resíduos da agroindústria e a reversão do conceito de “resíduos” ao conceito de “matéria-prima” é fundamental para otimizar a eficiência do agronegócio e para a redução dos impactos ambientais (Rosa *et al.*, 2011).

Os resíduos agroindustriais de composição lignocelulósica são formados principalmente por carboidratos complexos (celulose e hemicelulose) e por lignina (Jiang *et al.*, 2020; Vaz Junior, 2020), que podem ser utilizados como absorventes, polímeros renováveis, bioplásticos, materiais de construção leves, substitutos de embalagens, bem como na produção de energia por combustão, dentre outros usos (Vaz Junior, 2020; Jiang *et al.*, 2020; Mohite *et al.*, 2022).

Uma das atividades de grande relevância para o setor agrícola do Brasil é o cultivo do milho. Os Estados Unidos, a China e o Brasil são os maiores produtores de milho, de acordo com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Nas Safra 2019/2020, esses três países produziram 345,9 milhões de toneladas, 260,8 milhões de toneladas e 101 milhões de toneladas de milho. Os três maiores produtores produziram juntos 63,6 % da safra global (Miranda, 2021). No Brasil, para a safra de 2023/24, a previsão de produção de milho é de 113,7 milhões toneladas (Conab, 2024).

Como resíduos da cultura do milho têm-se: a PM, o caule, as folhas e o sabugo. Quando devolvidos ao solo, melhoram seu teor de nutrientes e sua qualidade, promovendo o crescimento das culturas. Esses resíduos podem também ser usados como ração para o gado (Jiang *et al.*, 2020; Mohite *et al.*, 2022). A PM é considerada um resíduo agrícola, sendo geralmente incinerado ou utilizado como cama nos criadouros de aves em propriedades rurais brasileiras, podendo também gerar renda quando destinada à produção de artesanato (Paes, Teixeira e Martins, 2008). A PM pode também ser convertida em bioetanol de segunda geração, a partir da hidrólise da celulose e da hemicelulose presentes em sua estrutura (Santos, 2014; Almeida, 2021). Quando utilizada como fonte de matéria-prima, vale frisar, a PM é valorada, diminui seu impacto ambiental e torna a agricultura mais sustentável.

Neste trabalho, investigou-se a PM como fonte de matéria-prima renovável para a extração das hemiceluloses para posterior síntese das HC. Na Figura 1 estão os principais componentes da parede celular da PM.



Fonte: Adaptado de Pacheco, 2021.

Na Tabela 2 estão descritos os percentuais de celulose, hemicelulose e lignina encontrada por alguns autores na PM.

Tabela 2 - Composição da PM em três estudos - percentual de celulose, hemicelulose e lignina

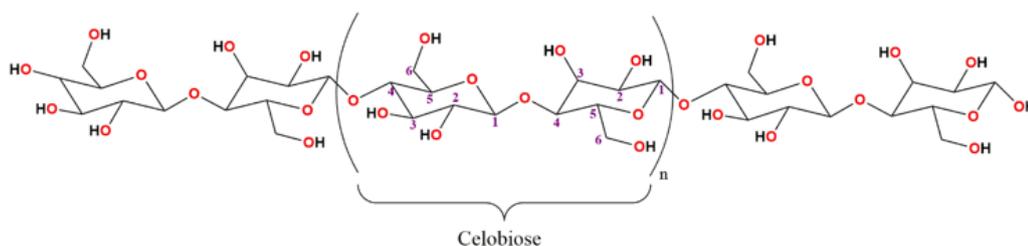
	Porcentagem de Celulose (%)	Porcentagem de Hemicelulose (%)	Porcentagem de Lignina (%)
Dermibas (2001)	51,53	30,88	17,59
Saha (2005)	40	25	17
Salazar (2005)	41,18	16,31	14,14

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

3.4 Celulose, Hemicelulose e Lignina

A celulose é um homopolissacarídeo constituído por moléculas de glicose ligadas entre si por ligações glicosídicas (β -1,4) formando uma cadeia linear não ramificada. Duas unidades adjacentes formam uma ligação glicosídica por meio da eliminação de uma molécula de água que envolve os grupos hidroxílicos dos carbonos 1 e 4. Na Figura 2, tem-se um fragmento da cadeia molecular da celulose. A estrutura dissacarídica recebe o nome de celobiose, que é a unidade conformacional mínima de celulose (Fengel; Wegener, 1989; Farinas, 2011).

Figura 2 - Fragmento da cadeia molecular da celulose, com sua unidade de repetição celobiose em destaque

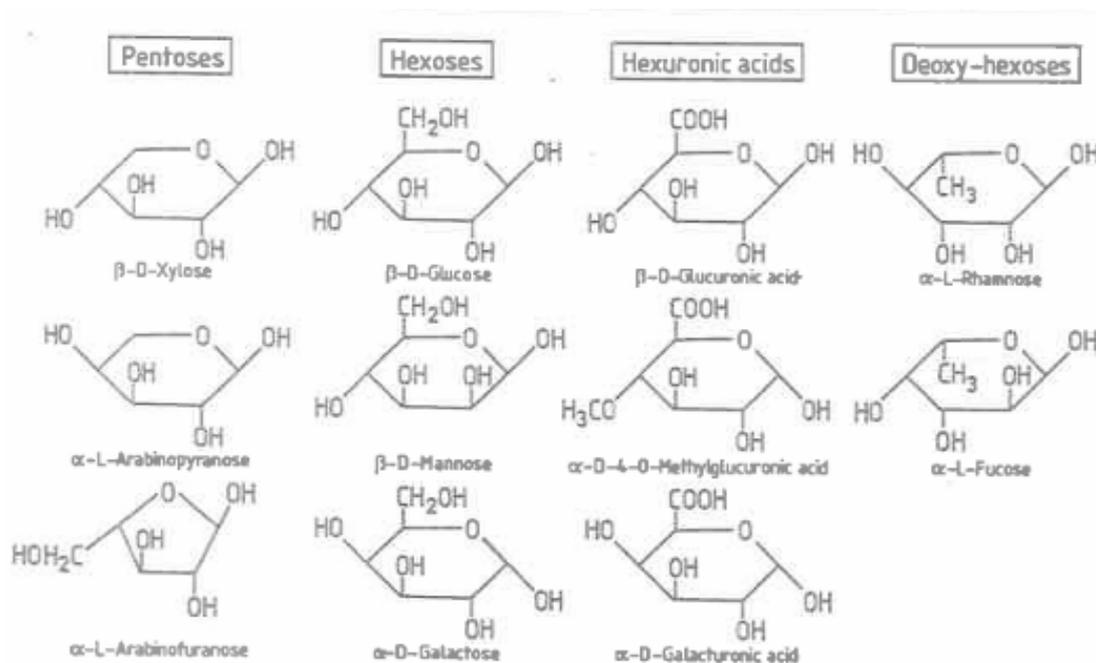


Fonte: Pacheco, 2021.

As hemiceluloses são heteropolissacarídeos (também denominadas polioses) formadas por várias unidades de monossacarídeos polimerizados, incluído açúcares

pentoses (xilose e arabinose), as hexoses (glicose, manose e galactose), ácidos urônicos e grupos acetila. Esses açúcares estão ligados entre si por ligações glicosídicas β -1,4, principalmente (Fengel; Wegener, 1989; Ren *et al.*, 2006; Farinas, 2011).

Figura 3 - Principais açúcares que compõem as hemiceluloses

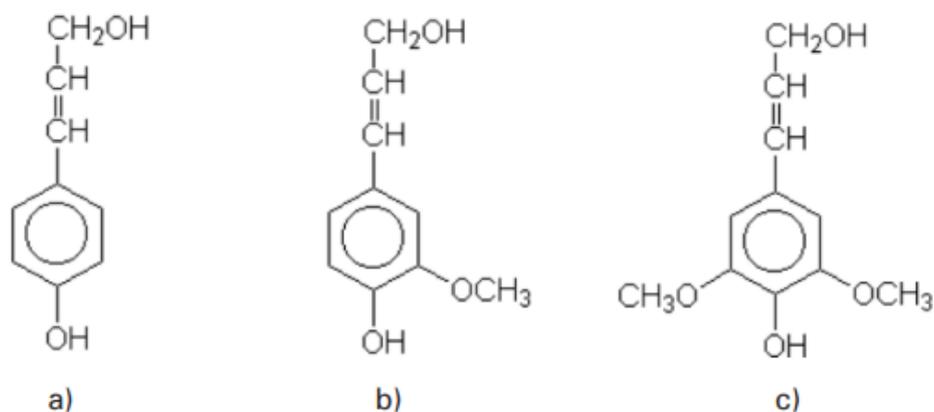


Fonte: Fengel; Wegener (1989).

Na Figura 3, tem-se a estrutura dos principais açúcares que compõem as hemiceluloses, que são de baixa massa molecular e apresentam ramificação em sua estrutura. As hemiceluloses são diferenciadas da celulose pela facilidade na hidrólise por ácidos diluídos e por terem maior solubilidade em soluções alcalinas (Landim, 2013; Ribeiro, 2013).

Os precursores primários da lignina são os álcoois p-hidroxiciamílicos: álcool p-cumarílico, álcool coniferílico e álcool sinapílico, com representação que pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 – Monômeros precursores da lignina



Fonte: Farinas (2011).

Nota: álcool p-cumarílico (a), álcool coniferílico (b), álcool sinapílico (c).

A lignina é incorporada durante o crescimento do vegetal, dando rigidez e resistência às plantas e é caracterizada por uma estrutura aromática de natureza fenólica, tridimensional e amorfa (Farinas, 2011).

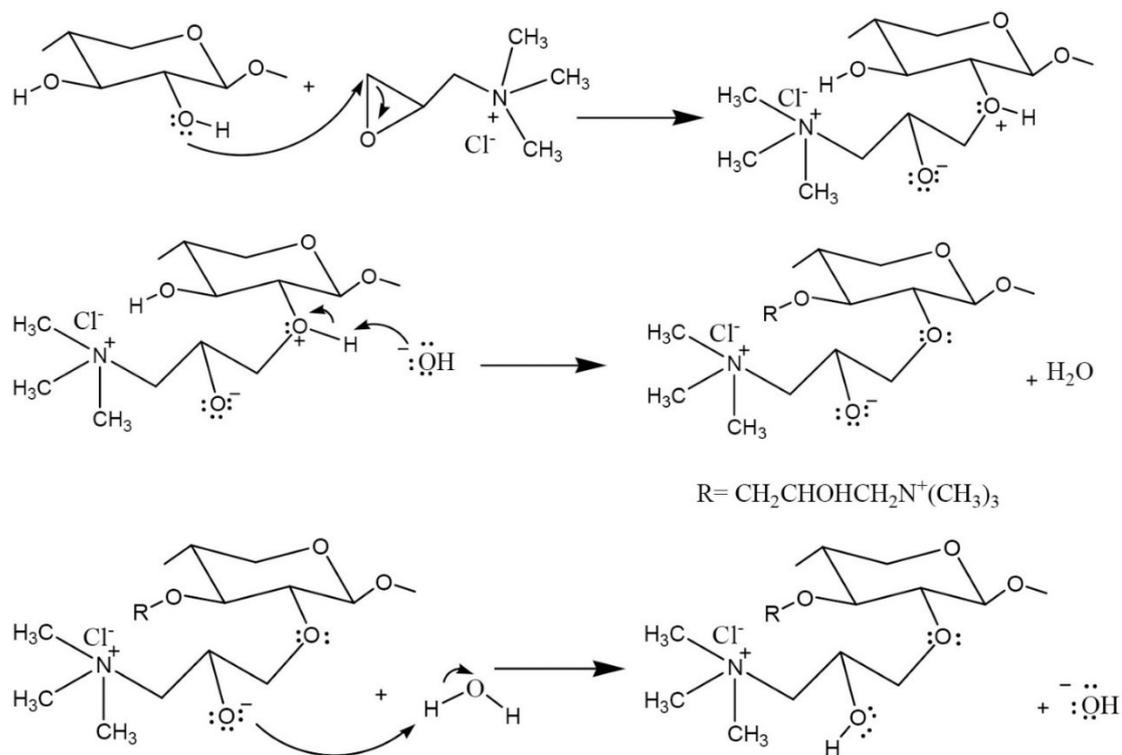
3.5 Hemiceluloses Catiônicas

Conforme estudo de Ribeiro *et al.* (2017a), as hemiceluloses possuem hidroxilas disponíveis para modificações químicas, e a cationização das hemiceluloses é uma das modificações possíveis. Sendo cationizadas, as hemiceluloses catiônicas podem ser aplicadas como coagulante e/ou auxiliares de coagulação em tratamento de efluentes (Landim *et al.* 2013; Pacheco, 2021; Alves, 2021; Mesquita, 2023). A quaternização das hemiceluloses aumenta a sua solubilidade e produz polímeros catiônicos com propriedades semelhantes aos derivados quaternizados obtidos a partir do amido, celulose e quitosana (Ren *et al.*, 2007b).

Na Figura 5 tem-se a representação da síntese das HC. A PM foi a matéria prima utilizada na extração das hemiceluloses e a cationização se deu utilizando o Cloreto de 2,3-epoxi-propil-trimetil-amônio (ETA) em meio básico. A carga positiva na cadeia

polimérica do derivado hemicelulósico produzido é devida à presença do grupo trimetil amônio (Souza, 2012; Costa, 2013; Landim, 2013, Ribeiro *et al.*, 2017a).

Figura 5 - Representação esquemática da síntese das hemiceluloses utilizando ETA



Fonte: Ribeiro *et al.* (2017a).

3.6 Aplicação das HC em diversos tipos de efluentes

Na Tabela 3 estão apresentados alguns estudos utilizando as HC aplicadas em diversos tipos de efluentes e os principais resultados obtidos pelos autores.

Tabela 3 - Aplicação das HC como auxiliar de coagulação ou coagulante primário no tratamento de efluentes e seus principais resultados

Referência	Coagulante	Efluente	Principais resultados
Landim <i>et al.</i> (2013)	Cloreto férrico / HC (PM)	Esgoto doméstico e industrial	10 mgL ⁻¹ de HC como auxiliar de coagulação com 200 mgL ⁻¹ de cloreto férrico com redução de cor de 37%, turbidez de 39%
Costa (2013)	Tanino e associações com coagulante inorgânico sulfato de alumínio, aluminato de sódio e HC (PM)	Lavanderia industrial	A adição das HC ofereceu melhorias na remoção de turbidez em regiões de pH básicos proporcionado pelo tanino
Ribeiro <i>et al.</i> (2017a)	Tanfloc SL / HC (PM)	Lavanderia industrial	HC como auxiliar de coagulação (3200 mgL ⁻¹) associado ao tanino (3000 mgL ⁻¹) remoção de turbidez superior a 95% em toda faixa de pH investigada
Ribeiro <i>et al.</i> (2017b)	Tanfloc SG / HC (casca de amendoim)	Biodiesel sintético	(25% TC/75% HC) Remoção de 89,1% de turbidez associado ao sulfato acetato de celulose
Castro (2020)	Tanfloc SG / HC (casca de amendoim)	Indústria alimentícia	Remoção de 76 % de turbidez TC/HC (3:1) no pH 11

(continua)

Tabela 3, Cont.

Pacheco (2021)	HC neutra (casca de amendoim)	Efluente Sintético de Laticínio	Remoção de 94,79 % turbidez, 56,72 % cor aparente, 47,83 % DQO e 73,93 % DBO5,20 com 400 ppm HC no pH 9,00
Pacheco <i>et al.</i> (2022)	HC (casca de amendoim)	Efluente Sintético de Laticínio	Remoção de 93,55 % turbidez, 56,98 % cor aparente, 47,68 % DQO com 400 ppm HC no pH 9
Alves (2021)	HC neutra (casca de amendoim)	Efluente Sintético de Laticínio	Remoção de 84,74 % turbidez, 98,75 % cor verdadeira e de 99,89 % DQO com 50 ppm HC no pH 11
Alves <i>et al.</i> (2022)	Tanfloc SG / HC neutra (casca de amendoim)	Processamento de grãos	Remoção de 98 % de turbidez TC/HC (3:1) no pH 10,72 200 mgL ⁻¹ 350 mgL ⁻¹ no pH 9,72 e 500 mgL ⁻¹ no pH 9,56
Mesquita (2023)	HC (PM)	Efluente Sintético de Laticínio	12,5 ppm HC em pH 10,03 remoção de turbidez 73,61%, cor verdadeira 84,91%, DQO 64,90%
Tomé <i>et al.</i> (2023)	HC (casca de amendoim)	Efluente Sintético de laticínio	Remoção de 84,74% turbidez, 98,75% cor verdadeira, 99,89% DQO com 50 ppm HC no pH 11,0

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

As hemiceluloses podem ser extraídas de biomassa de PM ou da casca de amendoim, cationizadas e utilizadas como coagulante primário e/ou como auxiliares no processo de coagulação/floculação (Landim *et al.*, 2013; Ribeiro *et al.*, 2017a; Ribeiro *et al.*, 2017b; Pacheco *et al.*, 2022; Alves *et al.*, 2022; Mesquita, 2023).

Landim *et al.* (2013), que investigaram o uso das HC da PM como auxiliares de coagulação do cloreto férrico no tratamento de esgoto doméstico e industrial, encontraram desempenho comparável à poliacrilamida catiônica comercial (ACRIPOL C10). Em ensaios de *jar test*, quando utilizadas as HC (10 mgL⁻¹) como coagulante auxiliar em conjunto com o cloreto férrico como coagulante primário (200 mgL⁻¹), a remoção de cor foi de 37% e a remoção de turbidez chegou a 39%. O desempenho das HC foi comparado com o desempenho da poliacrilamida comercial e os resultados para as HC foram semelhantes ou superiores quando comparadas ao ACRIPOL C10.

Costa (2013) investigou os diagramas de coagulação utilizando o tanino associado ou não ao sulfato de alumínio e aos auxiliares de coagulação aluminato de sódio e HC no tratamento de efluente de lavanderia industrial. A metodologia consistiu na retirada de óleos e graxas, seguida de filtração e ajuste de pH, e aplicação dos coagulantes primários e auxiliares em diversas dosagens. A associação do tanino com o sulfato de alumínio apresentou maiores remoções de turbidez em todas as faixas de pH e concentrações investigadas. A adição das HC ofereceu melhorias para a remoção de turbidez em regiões de pH básicos proporcionado pelo tanino, porém a atuação destas está condicionada à eficácia do tanino no processo de coagulação. O uso do tanino associado às HC permitiu a formação de um lodo de maior biodegradabilidade.

Ribeiro *et al.* (2017a) aplicaram as HC da PM associado ao tanino catiônico em tratamento de efluente de lavanderia industrial e verificaram que, quando usados associados, promoveram aumento na eficiência no tratamento deste efluente, pois ampliou a faixa de atuação em pH testados com remoção superior a 95%.

Em outro estudo, Ribeiro *et al.* (2017b) aplicaram as HC da casca do amendoim em associação com o tanino catiônico no tratamento de efluente de biodiesel sintético, na proporção de 25% (Tanino catiônico SG) para 75% (HC), resultando em remoção de turbidez de 89,1% e 89,5% para adições de sulfato de acetato de celulose aniônico e poliacrilamida aniônico.

Pacheco (2021) obteve os melhores resultados com 400 ppm HC e pH 9,00 no efluente sintético de laticínio, alcançando 94,79 % de Turbidez, 56,72 % na Cor Aparente, 47,83 % de DQO e 73,93 % de DBO_{5,20}, utilizando HC neutra proveniente da casca do amendoim.

Alves (2021) obteve resultados melhores para sedimentação no efluente sintético de laticínio com 100 ppm de tanino catiônico SG no pH 8 e 50 ppm de HC no pH 11. As eficiências de remoção de turbidez, cor verdadeira e demanda química de oxigênio para o tanino catiônico SG / HC foram, respectivamente: 96,31%/84,74%, 92,58%/98,75% e 84,53%/99,89%.

Alves *et al.* (2022) utilizaram tanino catiônico SG associado a HC (TSG3:1HC V/V) no tratamento de efluente de processamento de grãos, obtendo remoção de turbidez superior a 98% com 200 mgL⁻¹ no pH 10,72, 350 mgL⁻¹ no pH 9,72 e 500 mgL⁻¹ no pH 9,56, na sedimentação. Verificaram também que as HC expandiram a ação do tanino catiônico SG para a região básica.

3.7 Coagulantes inorgânicos e coagulantes orgânicos

Os principais tipos de coagulantes utilizados no tratamento de água potável incluem sais de ferro (FeCl₃, Fe₂(SO₄)₃), sais de alumínio (Al₂(SO₄)₃) e cloreto de polialumínio (PAC). Esses tipos de coagulantes possuem metais em sua composição, não são degradáveis ou não são biodegradáveis. Causam impactos ambientais, tais como o aumento da taxa de corrosão de utilidades metálicas e possível presença de resíduos de metais no lodo, dificultando seu manuseio e disposição final (Kurniawan *et al.*, 2020).

Nesse contexto, emerge a necessidade de alternativas ao uso de coagulantes inorgânicos e como proposta para a mitigação dos impactos surge a alternativa dos coagulantes orgânicos obtidos a partir de produtos naturais (Mangrich *et al.*, 2014). O desenvolvimento de novos coagulantes e floculantes, provenientes de matérias-primas naturais biodegradáveis, vem ganhando espaço como uma tecnologia ambiental que segue os princípios da Química Verde (Lima Júnior; Abreu, 2018). Os coagulantes orgânicos, por representarem menores danos ao meio ambiente e ao homem, têm se

apresentado como alternativa de uso para coagulação/floculação de diversos tipos de efluentes (Lima; Almeida; Vicentini, 2020).

Os coagulantes e floculantes orgânicos, também denominados biocoagulantes e biofloculantes, são geralmente polímeros solúveis em água que possuem grupos ionizáveis ao longo de grandes cadeias moleculares. São classificados em aniônicos, catiônicos e não iônicos, pois exibem sítios com cargas positivas ou negativas com capacidade de adsorção de partículas ao seu redor (Lima; Almeida; Vicentini, 2020; Pacheco, 2021). Os biocoagulantes emergem como uma tecnologia promissora no setor de saneamento ambiental, destacando-se por serem solúveis em água e efetivos em uma ampla faixa pH. Produzem menores volumes de lodo biodegradável e de menor impacto ambiental; não são corrosivos e são constituídos em sua maioria por polímeros e proteínas vegetais de baixa toxicidade (Lima Júnior; Abreu, 2018).

Em geral, os coagulantes orgânicos utilizam resíduos como matéria-prima. Tem baixo custo de aquisição, são geralmente abundantes na fonte e é uma tecnologia sustentável. Caracterizam-se pela biodegradabilidade, baixa toxicidade, redução do volume de lodo formado, o lodo formado tem potencial uso na fertilização de solos e apresenta baixa corrosividade sobre o sistema de distribuição (Choy *et al.*, 2014; Lima Júnior; Abreu, 2018; Kurniawan *et al.*, 2020).

A HC, coagulante/floculante orgânico, pode ser usada no tratamento de efluentes – como mostrado nos estudos de Landim *et al.* (2013), Ribeiro *et al.* (2017a) e Mesquita (2023), que utilizaram como matéria-prima a PM, e ainda nos estudos de Ribeiro *et al.* (2017b), Pacheco *et al.* (2022) e Alves *et al.* (2022), que utilizaram as cascas do amendoim como fonte de matéria-prima para a síntese da HC. Este trabalho investigou as HC proveniente da PM como coagulante primário no tratamento de água bruta de abastecimento, visando à aplicabilidade real em sistemas de tratamento de água.

3.8 Processo de coagulação e floculação na água

A água pode conter uma variedade de impurezas – como as partículas coloidais, substâncias húmicas e organismos em geral. Tais impurezas possuem carga superficial negativa, impedindo que se aproximem uma das outras. Para que essas impurezas possam

ser removidas é preciso alterar algumas características dessas impurezas por meio da coagulação, floculação, sedimentação ou flotação (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017).

Conforme aponta Vianna (2019), a fase crucial no tratamento convencional de água é a mistura rápida. Nessa fase, as partículas que se pretende remover são bombardeadas por agentes químicos com o objetivo de desestabilizá-las para que, na fase de floculação, sejam aglutinadas umas às outras, formando flocos que serão removidos por sedimentação e filtração. Uma vez que as partículas coloidais foram desestabilizadas, na coagulação deve-se manter a água em agitação durante certo tempo para promover os choques entre as partículas. Inicialmente, essa agitação deve ser intensa e, com o passar do tempo, os flocos que se formam como resultado desses choques vão se tornando menos numerosos e mais volumosos; daí, a necessidade de reduzir a intensidade da agitação com o tempo para que os flocos cresçam ao longo do processo e sejam sedimentados, posteriormente. Como os flocos maiores não resistem a agitações intensas, como no início da floculação e podem se romper, o gradiente de velocidade deve ser reduzido gradualmente.

A eficiência da coagulação depende de diversos fatores como o tipo de coagulante, temperatura, pH, a qualidade da água, o tipo de agitadores, razão pela qual são realizados ensaios de *jar test* visando relacionar o gradiente de velocidade médio e o tempo da mistura rápida (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017).

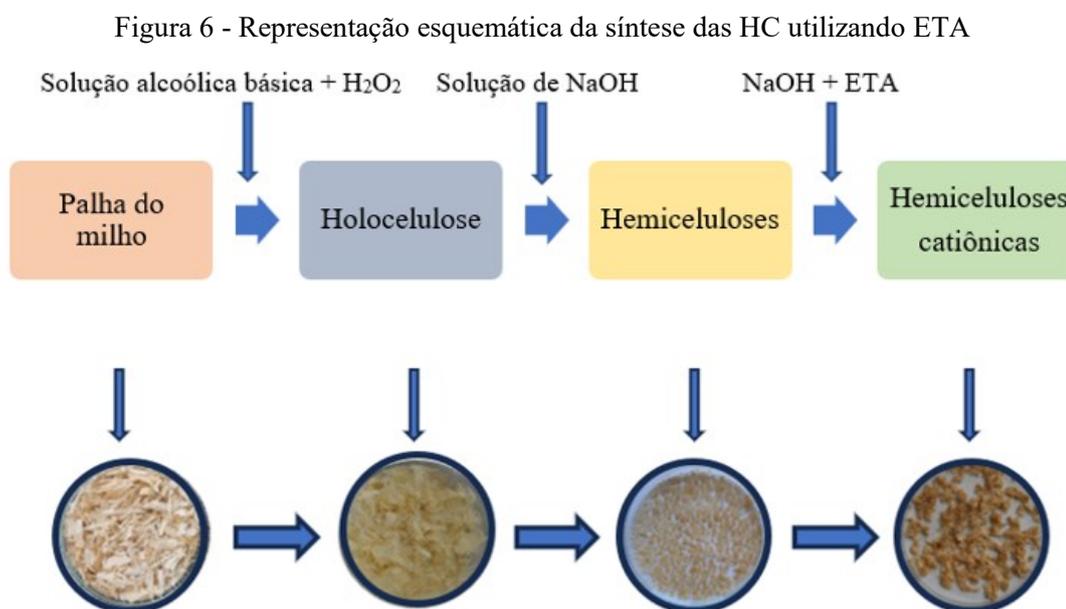
A NBR 12216 sugere que os gradientes de velocidade, tempo de mistura e concentração de coagulante devem preferencialmente ser determinados por ensaios de laboratório (ABNT, 1992). Os floculadores são unidades utilizadas para promover a agregação das partículas formadas na mistura rápida, podendo ser hidráulicos ou mecanizados. O tempo de detenção nas unidades de floculação e os gradientes de velocidade devem ser determinados por meios de ensaios com a água a ser tratada e, quando não é possível determinar o tempo adequado, podem ser adotados valores entre 20 e 30 min, para floculadores hidráulicos, e entre 30 e 40 min, para floculadores mecanizados. Não sendo realizados ensaios, o gradiente de velocidade máximo previsto no primeiro compartimento deve ser de 70 s^{-1} e, no último compartimento, um mínimo de 10 s^{-1} .

4 MATERIAL E MÉTODOS

Apresenta-se, a seguir, as metodologias, os materiais, os equipamentos e os programas computacionais que foram utilizadas na execução desse estudo.

4.1 Obtenção da Hemicelulose Catiônica (HC) a partir da PM

As HC tiveram por matéria-prima a PM, coletada no solo em área cuja colheita mecânica do milho já havia sido realizada. Apenas as que apresentaram bom aspecto visual foram utilizadas. As PM foram higienizadas com água destilada, secas ao natural e armazenadas em temperatura ambiente.



Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

As etapas do processamento das HC podem ser resumidas em: preparação das PM, obtenção da holocelulose (celulose e hemiceluloses), extração e cationização das hemiceluloses, conforme a Figura 6. A extração da holocelulose se deu pelo método *Oxiorganosolv* com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) em meio alcóolico básico, as hemiceluloses foram extraídas em solução de hidróxido de sódio ($NaOH$) e precipitadas

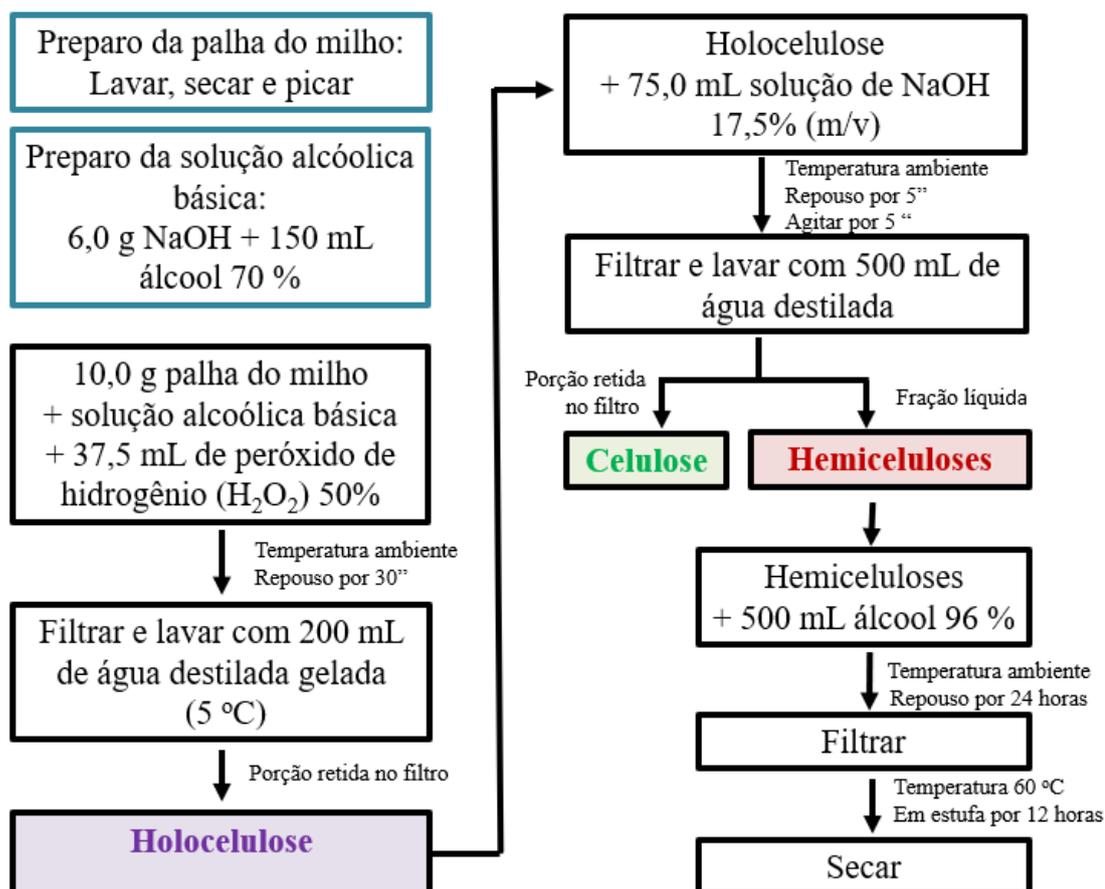
em álcool 96%. Na cationização das hemiceluloses foi utilizado o cloreto de 2,3-epoxi-propil-trimetil-amônio (ETA) como agente cationizante, em meio básico.

4.1.1 Extração das Hemiceluloses

De acordo com o pedido de patente BR 10 2024 006492-5, de 2024, o método *Oxiorganosolv* consiste em um pré-tratamento da biomassa lignocelulósica que realiza a deslignificação do material e a recuperação das frações de lignina, hemicelulose e celulose com rapidez e reduzido impacto ambiental. Apresenta como vantagens: maior velocidade de reação (30 minutos); não é preciso usar sistemas para controle de temperatura e pressão; não há produção de inibidores/subprodutos (Furfural e hidroximetilfurfural) durante a etapa de deslignificação. O método *Oxiorganosolv* está relacionado com o ODS 9 (indústria, inovação e infraestrutura) e ODS 12 (consumo e produção responsáveis).

A extração das hemiceluloses seguiu o procedimento adaptado do pedido de patente BR 10 2024 006492-5 (2024), pelo método *Oxiorganosolv* com peróxido de hidrogênio em meio alcoólico básico, esquematizado na Figura 7, realizado em temperatura ambiente. A PM foi lavada com água destilada, seca em temperatura ambiente e picada com tesoura comum, em dimensões aproximadas de 0,5 cm x 1,0 cm. Em 10,0 g desta PM, adicionou-se solução alcóolica básica preparada com 6,0 g de NaOH e 150 mL de álcool 70%. A seguir, adicionou-se 37,5 mL de H₂O₂ (50%), deixou-se a mistura em repouso por 30 minutos, em temperatura ambiente. Após, filtrou-se o material em filtro de *nylon* e sendo ele lavado com 200 mL de água gelada (5 °C). A holocelulose, um material fibroso e esbranquiçado, ficou retido no filtro. Na holocelulose obtida, acrescentou-se 75 mL de solução de NaOH (17,5% m/v) que ficou em repouso por cinco minutos, sendo, após isso, agitada por cinco minutos. Posteriormente ao tempo de agitação, deu-se a filtração e lavagem com 500 mL de água destilada. O material retido no filtro de *nylon* foi a celulose e o líquido obtido da filtração foi a hemicelulose solubilizada, que foi precipitada utilizando-se álcool 96%. Após 24 horas, foi efetuada filtração com filtro de *nylon* e as hemiceluloses ficaram retidas no filtro e foram transferidas para uma placa de Petri para secar na estufa na 60 °C, por 12 horas.

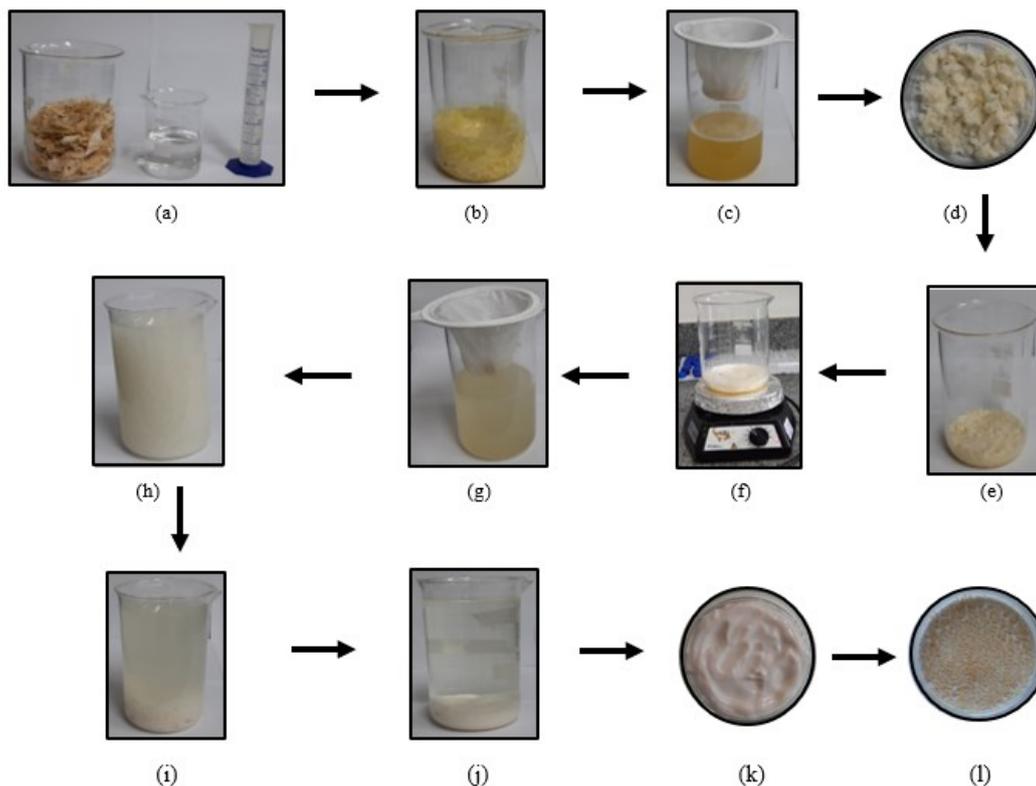
Figura 7 - Fluxo da extração das hemiceluloses



Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

A Figura 8 apresenta os registros fotográficos das etapas realizadas na extração das hemiceluloses.

Figura 8 - Esquema representativo da extração das hemiceluloses



Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

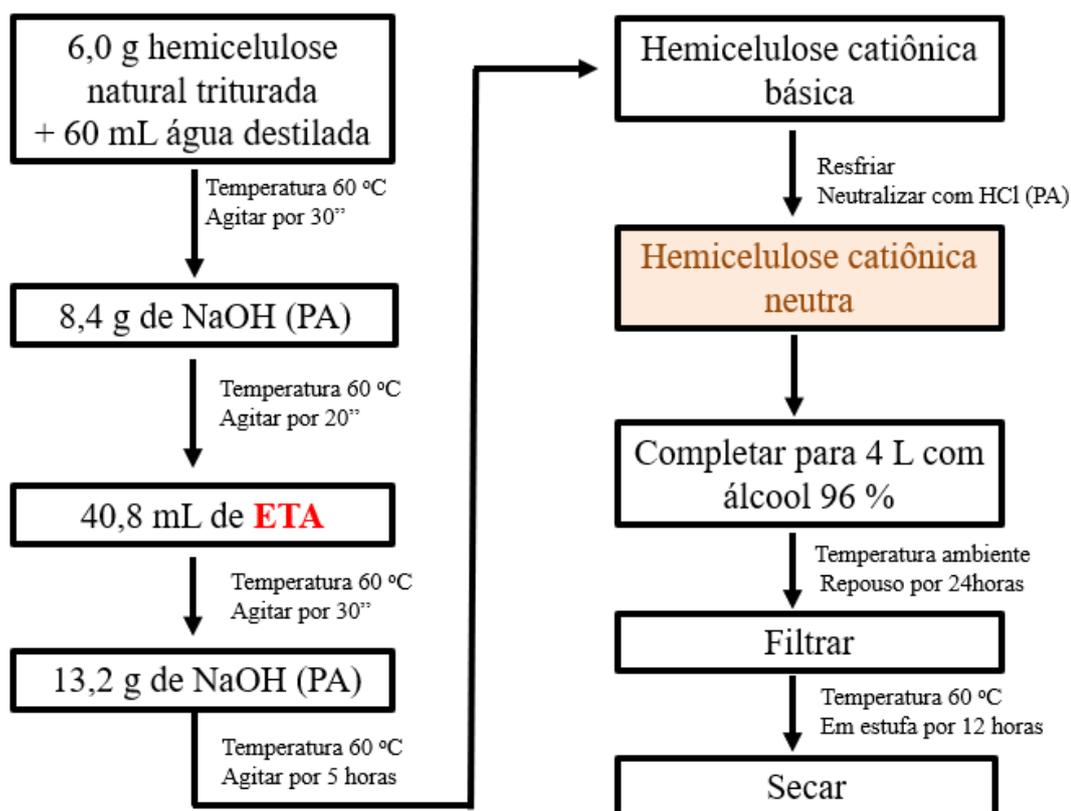
Nota:

- (a) PM; solução alcoólica de NaOH; H₂O₂;
- (b) PM + solução alcoólica de NaOH + H₂O₂ (repouso por 30");
- (c) (PM + solução alcoólica de NaOH + H₂O₂) + água destilada gelada (5 °C).
Separação da Holocelulose da lignina (no filtro: holocelulose; filtrado: lignina);
- (d) Holocelulose (celulose + hemiceluloses);
- (e) Holocelulose + solução de NaOH (repouso de 5");
- (f) Holocelulose + solução de NaOH (agitação por 5");
- (g) (Holocelulose + solução de NaOH) + água destilada. Separação da celulose das hemiceluloses (no filtro: celulose; filtrado: hemiceluloses);
- (h) Filtrado (hemicelulose) + álcool 96°;
- (i) Filtrado (hemiceluloses) + álcool 96°, após algumas horas;
- (j) Hemiceluloses (precipitado) + álcool 96°, após 24 horas;
- (k) Hemiceluloses (precipitado filtrado);
- (l) Hemiceluloses secas por 12 horas na estufa a 60 °C.

4.1.2 Cationização das Hemiceluloses

A cationização das hemiceluloses seguiu o procedimento adaptado de Ren *et al.* (2008), conforme metodologia de Landim *et al.* (2013), mostrado na Figura 9. Em um erlenmeyer, colocou-se 6,0 g de hemicelulose triturada com 60 mL de água destilada que ficou em banho-maria com óleo na temperatura de 60 °C por 30 minutos, sob agitação. A seguir adicionou-se 8,4 g de NaOH (PA) e deixou-se em agitação por 20 minutos a 60 °C. Depois adicionou-se 40,8 mL do agente cationizante ETA e deixou-se em agitação por 30 minutos a 60 °C. A seguir acrescentou-se 13,2 g de NaOH (PA) e manteve-se em agitação por 5 horas a 60 °C. Após este tempo, resfriou-se em banho de água com gelo e neutralizou-se com HCl concentrado até o pH 7. Depois, verteu-se essa solução em um béquer e completou com álcool 96% para 4 L, para precipitar as HC. Após 24 horas, filtrou-se em filtro de nylon e secou na estufa a 60 °C por 12 horas.

Figura 9 - Fluxo da cationização das HC



Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

4.2 Caracterização estrutural e espectroscópica dos materiais

Para verificar as características das hemiceluloses e da HC (como presença de ligações específicas), amostras foram analisadas por análise elementar (AE) e espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

4.2.1 Determinação do Grau de Substituição (GS) por Análise Elementar (AE) e determinação do rendimento

A análise elementar (AE) determina as medidas quantitativas do % C, % H e % N presentes nas hemiceluloses e HC. Com essas medidas, é possível calcular o grau de substituição dos agrupamentos amina na estrutura das hemiceluloses, que indica a cationização. As amostras de hemiceluloses e HC foram secas a 60 °C por 24 horas e levadas ao em equipamento EA 1110-CHNS/O da CE Instruments. O analisador permite a determinação da porcentagem em massa de Carbono (C), Hidrogênio (H) e Nitrogênio (N). Para verificar a cationização das hemiceluloses, calculou-se o grau de substituição pela quantidade de Nitrogênio e Carbono de acordo com Equação 1 (Schwikal *et al.*, 2005).

Equação (1)

$$GS = \frac{60 \times \%N}{14 \times \%C - 72 \times \%N}$$

Nota:

GS: grau de substituição;

%N: porcentagem de nitrogênio determinado por análise elementar;

%C: porcentagem de carbono determinado por análise elementar;

60: massa molar de carbonos da molécula de xilose;

14: massa molar de nitrogênio presente no grupo substituinte catiônico;

72: massa molar de carbonos acoplados ao grupo substituinte catiônico (nitrogênio quaternário).

Para calcular o rendimento das etapas de extração das hemiceluloses e cationização da HC, utilizou-se a Equação 2.

Equação (2)

$$R = \frac{mf}{mi} \times 100$$

Onde:

R: Rendimento (%);

mi: massa inicial;

mf: massa final (massa obtida).

4.2.2 Caracterização espectroscópica por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

Para verificar a presença dos principais grupos funcionais indicativos do processo de cationização, realizou-se a caracterização por espectroscopia de infravermelho com transformada de *Fourier* (FTIR) no espectrofotômetro FT-IR Frontier Single Range – MIR da Perkin Elmer, na região compreendida entre 4000 e 400 cm^{-1} . As medidas das amostras foram realizadas no estado sólido, com a utilização do acessório de Reflectância total atenuada (ATR) com cristal de diamante.

4.3 Determinação pH do Ponto de Carga Zero (pH_{PCZ})

Utilizou-se o método de adição de sólidos (Hao *et al.*, 2004) para determinar o pH de carga zero (pH_{PCZ}) das hemiceluloses e das HC – o pH no qual a superfície é neutra é chamado de Ponto de Carga Zero.

Preparou-se uma solução de 0,1 molL^{-1} de NaCl e, desta, retirou-se uma alíquota de 20,0 mL para cada um dos 20 *erlenmeyers* de 50 mL separados: 10 para as hemiceluloses e 10 para a HC. Cada *erlenmeyer* teve seu pH corrigido com solução de NaOH 0,1 molL^{-1} (para faixas alcalinas) e com solução de HCl 0,1 molL^{-1} (para faixas ácidas), de tal modo que as soluções variaram o pH de 2 a 11. Após, adicionou-se 20 mg

de hemiceluloses ou HC em cada *erlenmeyer* e estes foram mantidos por 24 horas sob agitação constante, em mesa vibratória, a 150 rpm (Solab Scientific, modelo SL 223) e em temperatura ambiente. Após as 24 horas de agitação, realizou-se uma nova leitura do pH das soluções de cada *erlenmeyer*. Os dados foram anotados em planilhas eletrônicas no *Microsoft Excel*.

4.4 Determinação da carga superficial por titulação potenciométrica e condutimétrica simultâneas

Para a determinação da carga superficial por titulação potenciométrica e condutimétrica simultâneas, preparou-se uma solução aquosa de $1,0 \text{ gL}^{-1}$ de hemiceluloses e HC. Realizou-se o ajuste de pH para 11, utilizando solução de NaOH $0,1 \text{ molL}^{-1}$. Em um béquer de 250 mL, contendo 200 mL de amostra, acoplou-se um condutivímetro e um pHmetro e, sob agitação constante, iniciou-se a titulação com solução de HCl $0,1 \text{ molL}^{-1}$ (Pandochi, 2009; Viana, 2016). Acrescentou-se alíquotas de HCl $0,1 \text{ molL}^{-1}$ na amostra, anotando-se o volume e, a seguir, realizou-se a leitura simultânea da condutividade e do pH. As titulações foram realizadas em duplicata e os dados foram anotados em planilhas eletrônicas no *Microsoft Excel*.

O pH foi monitorado com medidor PHMETER PHS-3C e a condutividade, com o Multiparâmetro Edge USB EC/TDS/salinidade HI 2030-02.

4.5 Determinação do potencial Zeta

Na Determinação do potencial Zeta, solubilizou-se 100 mg de hemiceluloses em 10 mL de solução de Dimetilsulfóxido (DMSO) 50% e a mistura foi agitada por 48 horas a 150 rpm em temperatura ambiente (25°C). Solubilizou-se 50 mg de HC em 100 mL de água destilada ($0,5 \text{ gL}^{-1}$), sendo a mistura agitada também por 48 horas a 150 rpm em temperatura ambiente (25°C). As amostras de hemiceluloses e HC tiveram o pH ajustado para 3, 5, 7, 9 e 11 com solução de NaOH $0,1 \text{ molL}^{-1}$ e HCl $0,1 \text{ molL}^{-1}$. Foram determinados os valores do potencial Zeta (mV) das amostras de acordo com o seguinte

procedimento: em uma cubeta ômega, adicionou-se 1 mL de cada amostra que foi colocada no equipamento Litesizer (Anton Paar Instruments, Anton Paar, Berlim, Alemanha). O índice de refração foi modulado de acordo com o solvente da amostra, operando com tensão máxima de 200 V (25 °C, n=3) (Jiang *et al.*, 2014).

4.6 Água de estudo: Água Bruta Superficial

A água bruta superficial foi coletada na Estação de Tratamento de Água Renato de Freitas, na cidade de Uberlândia, do estado de Minas Gerais. A água bruta é proveniente do Rio Uberabinha, cuja nascente está situada no município de Uberaba, a cerca de 96 Km ao sul da cidade, próximo ao distrito de Tapuirama (Prefeitura Municipal de Uberlândia, 2021).

Vale informar, a turbidez das águas é devida à presença de partículas em suspensão e em estado coloidal que pode apresentar uma ampla faixa de tamanho. A turbidez pode ser causada, principalmente, por areia fina, argila e microrganismos em geral. A cor verdadeira não sofre interferência de partículas suspensas na água pois, passa por centrifugação ou filtração. Já a cor aparente é obtida sem a remoção das partículas suspensas na água. O pH é utilizado para expressar a acidez de uma solução e é um parâmetro muito importante nas etapas de coagulação, filtração, desinfecção e controle da corrosão (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017).

Tabela 4 - Métodos analíticos para caracterização físico-química da água bruta e tratada

Parâmetro analisado	Equipamento utilizado	Princípio da metodologia	Procedimento SMEWW, 23 ^a edição
pH	DM-23-DC Digimed	Método eletrométrico	4500 H ⁺ B
Cor aparente (uH)	AquaColor Cor Policontrol	Colorimétrico	2120B
Turbidez (uT)	DLI-2500 DEL LAB	Nefolométrico	2130B

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

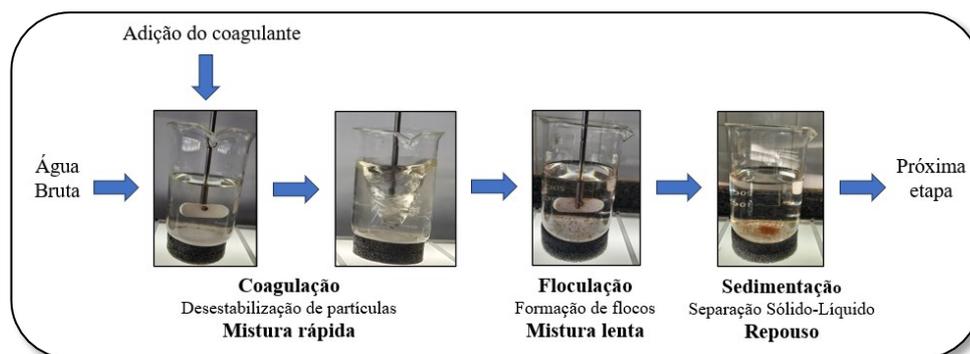
Nota: os métodos seguem procedimentos descritos em *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (SMEWW, 2017).

A água bruta, neste estudo, passou pela caracterização analítica antes e após o tratamento. Os parâmetros de pH, Cor Aparente e Turbidez da água bruta foram adotados como parâmetros de controle para a água de estudo. A Cor Aparente e a Turbidez foram aferidas em triplicata, conforme procedimentos descritos no *Standard Methods of Examination Water and Wastewater* (SMEWW), da 23ª edição de 2017. A Tabela 4 apresenta os parâmetros analisados, o princípio dos métodos adotados e os principais equipamentos utilizados para cada parâmetro analisado.

4.7 Determinação dos ensaios de tratabilidade: coagulação/ floculação e sedimentação

Na mistura rápida, adicionou-se o coagulante orgânico HC na água bruta a ser tratada. Nessa etapa, tem-se a mistura do coagulante e a desestabilização das partículas que normalmente possuem cargas negativas. A etapa seguinte é a floculação, na qual a velocidade de agitação é reduzida gradualmente. Nessa fase, ocorre a formação dos flocos e/ou os choques entre os flocos já formados, fazendo que eles aumentem de tamanho, como já mencionado. A fase seguinte é a sedimentação, na onde haverá a separação dos flocos da água. Os flocos sedimentados constituem o lodo formado e a água decantada seguirá para a próxima etapa, que é a filtração. Na Figura 10, tem-se a representação esquemática destes processos.

Figura 10 - Representação esquemática das etapas de coagulação e floculação em equipamento *jar test*



Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Inicialmente, foram utilizados os parâmetros de referência dos estudos anteriores do grupo de pesquisa do LAETE (Pacheco, 2021; Alves, 2021), quando se considerou a mistura rápida com gradiente de velocidade médio de 250 rpm em 30 segundos e a mistura lenta com gradiente de velocidade médio de 30 rpm, com variação de 15 a 30 minutos e o tempo de sedimentação, com 15 minutos com variação de até 60 minutos, conforme Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros físicos adotados inicialmente na realização dos ensaios

Etapa	Parâmetros Físicos	Valores
Mistura rápida (Coagulação)	Gradiente de velocidade mistura rápida	600 s ⁻¹ (250 rpm)
	Tempo de mistura rápida	30 s
Mistura lenta (Floculação)	Gradiente velocidade mistura lenta	20 s ⁻¹ (30 rpm)
	Tempo de mistura lenta	15 a 30 min
Sedimentação	Gradiente de velocidade sedimentação	0
	Tempo de sedimentação	15 a 60 min

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Visando melhorar a eficiência do tratamento, elaborou-se um ajuste nos parâmetros físicos conforme apresentado na Tabela 6, quando foi considerado quatro velocidades de floculação e tempo de sedimentação de 20 e 30 minutos, de acordo com a NBR 12216 (ABNT, 1992).

Tabela 6 - Parâmetros físicos adotados neste estudo

Etapa	Parâmetros Físicos	Valores
Mistura Rápida (Coagulação)	Gradiente de velocidade mistura rápida	1.000 s ⁻¹
	Tempo de mistura rápida	1 min

(continua)

Tabela 6, Cont.

Mistura lenta (Floculação)	Gradiente de velocidade mistura lenta 1	60 s ⁻¹
	Tempo de mistura lenta 1	7 min
	Gradiente de velocidade mistura lenta 2	45 s ⁻¹
	Tempo de mistura lenta 2	7 min
	Gradiente de velocidade mistura lenta 3	30 s ⁻¹
	Tempo de mistura lenta 3	7 min
	Gradiente de velocidade mistura lenta 4	20 s ⁻¹
	Tempo de mistura lenta 4	7 min
Sedimentação	Gradiente de velocidade sedimentação	0
	Tempo de sedimentação 1	20 min
	Tempo de sedimentação 2	30 min

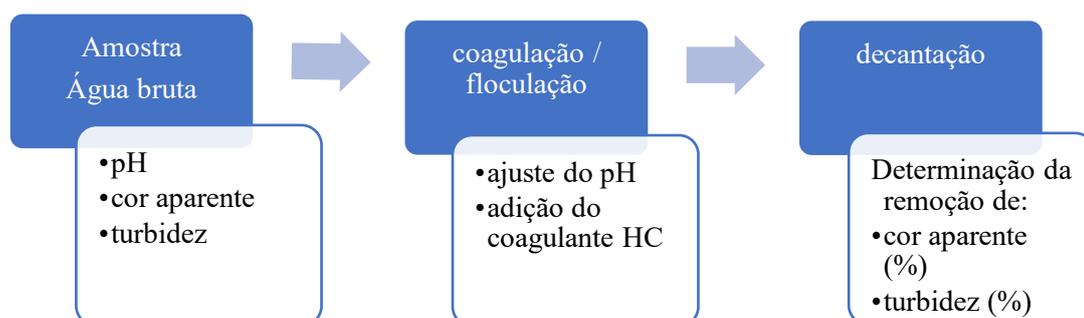
Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

4.8 Ensaio de tratabilidade

Os ensaios de tratabilidade foram realizados em equipamento *jar test*, modelo FlocControl III com seis cubas da PoliControl, o qual possui um painel digital que permite a programação da rotação das paletas e o tempo de duração em cada rotação.

Um resumo da metodologia do ensaio no *jar test* empregada no trabalho é apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Metodologia utilizada nos ensaios e análises da tratabilidade da água bruta com o coagulante HC



Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Para o levantamento dos dados, utilizou-se o equipamento *jar test*, cujos parâmetros foram sendo ajustados (Tabela 6). A realização dos ensaios de *jar test*, seguiu os seguintes passos:

- a) Em béqueres de 600 mL, foram colocados 400 mL de água bruta e realizadas medições de pH, cor aparente e turbidez da água bruta antes de cada ensaio;
- b) Ajustou-se o pH das amostras com solução de HCl 0,1 M (acidificante) e com solução de NaOH 0,1 M (alcalinizante);
- c) Foram adicionadas as HC e o equipamento *jar test* foi ligado;
- d) Após a realização do ciclo programado no *jar test*, realizou-se a coleta das amostras para medições remanescentes de cor aparente e turbidez das amostras.

A primeira coleta deu-se após 20 minutos em repouso e a segunda coleta, após 10 minutos da primeira coleta, totalizando 30 minutos. Para cada tempo de sedimentação, aferiu-se a cor aparente remanescente (uH) e a turbidez remanescente (uT), visando do calcular o percentual de remoção (%) dessas características da água bruta após tratamento. Os resultados foram anotados em planilhas eletrônicas no *Microsoft Excel*.

A determinação da eficiência de remoção (%) para os parâmetros analisados após ensaios de tratamento foi calculada conforme a Equação 3.

Equação (3)

$$E(\%) = \frac{(V_i - V_f)}{V_i} \times 100$$

Sendo:

E: Eficiência de remoção, em % (Cor aparente ou Turbidez);

V_i: valor inicial do parâmetro (Cor aparente ou Turbidez);

V_f: valor final do parâmetro (Cor aparente ou Turbidez).

4.9 Valor máximo permitido (VMP) para Cor aparente e Turbidez

A Portaria GM/MS 888/2021 (Ministério da Saúde, 2021), em seu Anexo 11, estabelece os padrões organolépticos de potabilidade. Os valores máximos permitidos (VMP) para cor aparente e turbidez estão descritos na Tabela 7 que serviram como referência para discussão dos resultados.

Tabela 7 - Padrão organoléptico de potabilidade - Portaria GM/MS 888/2021

Parâmetro	Unidade	VMP
Cor aparente	uH	15
Turbidez	uT	5

Fonte: Portaria GM/MS 888/2021 (Ministério da Saúde, 2021).

Nota: ver Anexo 11.

4.10 Estabelecimento dos diagramas de coagulação

Os diagramas de coagulação são utilizados como forma de delimitar as melhores faixas de pH e dosagem de coagulantes (Bartiko; Julio, 2015). Para Voltan (2007), não há dosagem ótima de coagulante, tampouco pH de coagulação ótimo, mas sim um par de valores “dosagem de coagulante x pH de coagulação” apropriados a cada situação.

Os registros das leituras de pH de coagulação, dosagem de coagulantes e os percentuais de remoção de cor aparente e turbidez foram tabulados em planilhas eletrônicas no *Microsoft Excel* e depois transferidos para o programa computacional *Surfer 16*, com o objetivo de elaborar os diagramas de coagulação. Foi utilizada a interpolação de base radial. O diagrama de coagulação foi plotado para estimar os percentuais médios de remoção em pontos não amostrados, o que possibilita estabelecer regiões de dosagem de coagulante x pH de coagulação ideais, possibilitando a utilização em estudos como exemplo de remoções de turbidez, cor aparente e cor verdadeira.

4.11 Análise estatística dos parâmetros de tratabilidade

Os dados de Cor aparente e Turbidez foram submetidos a análise de variância no delineamento inteiramente ao acaso, em esquema fatorial com três fatores, sendo o fator dosagem em cinco níveis, o fator pH em sete níveis e o tempo em dois níveis. Foi utilizado o teste de Scott-Knott para as comparações múltiplas de médias. Toda a análise foi feita no programa R Core Team 2023, considerando significância de 5%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Deste tópico constam os resultados obtidos nos experimentos da pesquisa e a discussão desses resultados. Pode-se afirmar que a extração das hemiceluloses e a posterior síntese delas estão diretamente relacionadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especificamente ODS 2 e ODS 3, pois a PM é utilizada como fonte de biomassa. Já os testes de tratabilidade da água bruta estão relacionados ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6) por estar relacionado à água potável e ao saneamento.

5.1 Rendimento das Hemiceluloses e da HC

Na Tabela 8 constam os dados dos dez experimentos realizados para a extração das hemiceluloses. Na Tabela 8, refere-se T à temperatura em que ocorreu a reação entre a PM e a solução alcoólica de NaOH e H₂O₂. A massa das hemiceluloses se referem à massa seca obtida após a precipitação com álcool 96%. O experimento ocorreu em temperatura ambiente. Utilizando a Equação 2, obteve-se rendimento médio de 34,95 ($\pm 0,98$) %.

Tabela 8 - Rendimento das hemiceluloses neste estudo

Data	m _{PM} (g)	m _{NaOH} (g)	T (°C)	m _{Hemiceluloses} (g)	Rendimento (%)
21/03/2023	10,0063	6,0019	56	3,12	31,2
21/03/2023	10,0044	6,005	56	3,54	35,4
06/04/2023	10,0067	6,0127	52	3,8906	38,9
06/04/2023	10,0048	6,0075	58	3,806	38,0
13/04/2023	10,0031	6,0075	59	2,9723	29,7
13/04/2023	10,0013	6,0089	59	3,19878	32,0
18/04/2023	10,0068	6,0052	58	3,404	34,0
18/04/2023	10,0038	6,0142	60	3,648	36,5
20/04/2023	10,005	6,005	52	3,673	36,7
20/04/2023	10,0047	6,0022	56	3,721	37,2

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Na Tabela 9 constam os valores de rendimento encontrados em outros trabalhos que utilizaram como fonte de matéria-prima a PM e cascas do amendoim. Pacheco (2021) e Tomé *et al.* (2023) utilizaram o método do clorito-ácido para a extração das hemiceluloses.

Tabela 9 - Percentuais de hemiceluloses encontrados nas cascas do amendoim e na PM

Referências	Rendimento Cascas do amendoim Percentual (%)	Rendimento PM Percentual (%)
Este trabalho	-	34,95 ($\pm 0,98$)
Dermibas, 2001	-	30,88
Pacheco, 2021	24,46 ($\pm 3,36$)	-
Tomé <i>et al.</i> , 2023	24,31 ($\pm 1,16$)	-

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Na Tabela 10 estão os dados obtidos na síntese da HC. Na primeira precipitação, o valor concerne às HC secas. Como é possível observar, o valor é superior ao das hemiceluloses secas utilizadas, o que indica que havia muito sal (sais de amônio e/ou cloreto de sódio) nas HC. Por esse motivo, as HC foram colocadas novamente em álcool 96% para precipitar com uma pequena quantidade de água destilada, retirando-se o sal, assim.

Tabela 10 - Rendimento das HC neste estudo

Data	Hemiceluloses (g)	1ª precipitação no álcool 96% (g)	2ª precipitação no álcool 96% (g)	% Rendimento das HC
20/05/2023	6,0070	12,158	5,6612	94,2
20/05/2023	6,0011	11,745	4,88775	81,3

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Neste trabalho, utilizando-se a Equação 2, o rendimento médio de HC foi de 87,76 ($\pm 6,48$) – valor próximo ao encontrado em outros trabalhos com diferentes fontes de biomassa, conforme Tabela 11.

Tabela 11 - Percentual de HC encontrado em outros trabalhos

Referências	Cascas do amendoim	PM
Este trabalho	-	87,76 ($\pm 6,48$)
Pacheco, 2021	86,29 ($\pm 4,16$)	-
Tome <i>et al.</i> , 2023	94,21 ($\pm 2,34$)	-

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

5.2 Caracterização das hemiceluloses e HC por análise elementar (AE) e grau de substituição (GS)

A análise elementar foi realizada para determinar o grau de substituição dos agrupamentos amina na estrutura das hemiceluloses. Essa quantificação indica se houve cationização das hemiceluloses. Observa-se que as hemiceluloses possuem % N de 0,045 ($\pm 0,05$), que pode ser ter sido incorporado às hemiceluloses em razão do nitrogênio do solo onde o milho foi plantado. Após a cationização, as HC passaram a ter 2,21 ($\pm 0,14$) % N, demonstrando, assim, a incorporação de um agrupamento amina terciária na estrutura das hemiceluloses, conforme Tabela 12. Mesquita (2023) encontrou em seu estudo 2,19 ($\pm 0,09$) % N nas HC, valor semelhante ao encontrado neste estudo.

Tabela 12 - Dados da Análise Elementar (AE) das hemiceluloses e das HC

Amostra	Porcentagem de C (%)	Porcentagem de H (%)	Porcentagem de N (%)
Hemicelulose	29,73 ($\pm 0,15$)	5,84 ($\pm 0,31$)	0,045 ($\pm 0,05$)
HC	34,26 ($\pm 2,23$)	6,79 ($\pm 1,32$)	2,21 ($\pm 0,14$)

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Considerando que as hemiceluloses são constituídas principalmente por xilose ($MM = 132 \text{ g mol}^{-1}$) e, portanto, possuem duas hidroxilas por unidade de β -D-xilose disponíveis para serem etericadas, teriam elas um grau de substituição máximo de 2,0 (Ren *et al.*, 2006; Ribeiro *et al.*, 2017a). O GS máximo igual a 2,0 só seria possível se as hemiceluloses utilizadas fossem compostas apenas por xilose (Tomé *et al.*, 2023).

Com a utilização da Equação 1 e com os dados da AE, determinou-se o GS igual a 0,413 ($\pm 0,001$), valor compatível aos encontrados por outros pesquisadores que utilizaram o mesmo método de síntese em diferentes fontes de biomassa, conforme Tabela 13.

Tabela 13 - Grau de Substituição das HC calculado a partir da Análise Elementar (AE) de diferentes fontes de biomassa

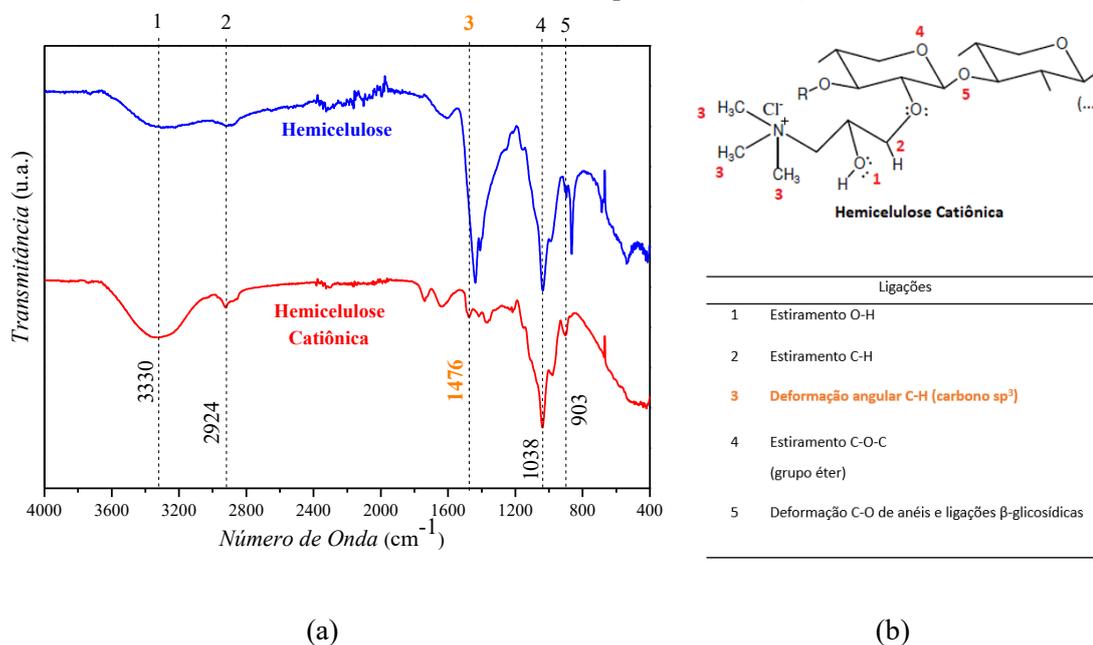
Referência	Fonte de biomassa	Grau de Substituição (GS)
Esse trabalho	PM	0,413 ($\pm 0,001$)
Ren <i>et al.</i> (2006)	Bagaço da cana-de-açúcar	0,54
Landim <i>et al.</i> (2013)	PM	0,43
Ribeiro <i>et al.</i> (2017a)	PM	0,52
Mesquita (2023)	PM	0,34 ($\pm 0,03$)
Pacheco <i>et al.</i> (2022)	Casca de Amendoim	0,32 ($\pm 0,01$)
Tomé <i>et al.</i> (2023)	Casca de Amendoim	0,38 ($\pm 0,05$)

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

5.3 Caracterização espectroscópica das hemiceluloses e HC por FTIR

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) fornece evidências da presença de grupos funcionais na estrutura química das substâncias, podendo ser usada para identificar um composto ou investigar sua composição química. Com a finalidade de obter indícios da cationização das hemiceluloses foi efetuada a caracterização por infravermelho. A Figura 12 apresenta os espectros na região do infravermelho das hemiceluloses e das HC com número de onda variando de 4000 a 400 cm^{-1} .

Figura 12 - Espectros da FTIR das Hemiceluloses e das HC (a) e apontamentos na Fórmula estrutural e deformações relativas às bandas apontadas nos espectros de FTIR (b)



Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Pela Figura 12(a) pode-se observar que as estruturas das hemicelulose foram, no geral, mantidas após a cationização, podendo ser observada nos tracejados verticais da Figura 12(a), na qual os números de onda 3330, 2924, 1038 e 903 cm^{-1} demonstram as atribuições presentes tanto nas hemiceluloses quanto nas HC, estando estas descritas na Tabela 14. Na Figura 12(b) tem-se a estrutura das HC e os tipos de ligações presentes na HC. A conformação dos gráficos de FTIR das hemiceluloses e HC são compatíveis com os resultados obtidos por Mesquita (2023), estudo em que se deu o mesmo processo de

extração das hemiceluloses e síntese da HC, tendo como fonte de matéria-prima a PM. De modo geral, observou-se que os espectros de FTIR das hemiceluloses e HC apresentam bandas características de materiais lignocelulósicos, como caracterizados por Ribeiro *et al.* (2017a), Pacheco (2021) e Alves (2021).

Na Tabela 14 constam os valores encontrados neste e em outros estudos, destacando-se as principais atribuições das bandas vibracionais observadas nos espectros da PM e cascas de amendoim (CA). O estiramento se refere à alteração do comprimento da ligação, e a deformação angular fundamenta-se na alteração do ângulo da ligação.

O estiramento em 3330 cm^{-1} refere-se ao estiramento de grupos hidroxilas (-OH) e o estiramento 2924 cm^{-1} de grupos (C-H) estão presentes em biomassa lignocelulósica, compatíveis com os trabalhos de Ribeiro *et al.* (2017a), Pacheco (2021), Tomé *et al.* (2023) e Mesquita (2023).

Uma banda intensa pode ser observada na região de 1038 cm^{-1} , que representa o conjunto de deformações angulares de éter com álcoois primários (C-OH) e está presente tanto nas hemiceluloses quanto nas HC (Pacheco, 2021; Mesquita, 2023).

A região onde se encontra a banda de 903 cm^{-1} refere-se à deformação do anel associada à ligação entre anéis de xilana (C-O-C), denominadas ligações β -glicosídicas, que podem ser observadas nas hemiceluloses e nas HC (Ren *et al.*, 2006; Pacheco, 2021; Tomé *et al.*, 2023).

Nas hemiceluloses, a banda 1438 cm^{-1} se refere à carbonila devido ao método de deslignificação *Oxiorganosolv*. Os grupos hidroxilas das cadeias de carboidratos são atacados em meio oxidativo, formando as carbonilas (C=O) (Eiras; Colodette; Carvalho, 2005).

Na estrutura da HC, em 1476 cm^{-1} – ver Figura 12(a) – está presente o estiramento referente a deformações angulares de ligações C-H, concernentes ao agrupamento metila (-CH₃), sendo uma banda de baixa intensidade, mas presente apenas no espectro das HC (Ren *et al.*, 2006; Alves, 2021).

As vibrações de ligações C-N presente no ETA, que indicariam a inserção do grupo amina quaternária nas hemiceluloses, não são facilmente visíveis nos espectros de FTIR. Elas aparecem na faixa de 1240 a 1030 cm^{-1} , são de baixa intensidade e sobrepostas pela presença de outras vibrações – como estiramento da função éter (C-O-C), ligações entre carbonos (C-C) e deformações angulares de álcoois primários (C-OH) que estão presentes

nas hemiceluloses (Pacheco, 2021).

Tabela 14 - Principais atribuições das bandas dos espectros de FTIR das hemiceluloses e das HC em diferentes biomassas

Atribuições	Número de Onda (cm ⁻¹)					
	Hemiceluloses (PM) Este trabalho	HC (PM) Este trabalho	HC (PM) Ribeiro <i>et al.</i> (2017a)	HC (CA) Pacheco (2021)	HC (CA) Tomé <i>et al.</i> (2023)	HC (PM) Mesquita (2023)
Estiramento O-H	3300	3330	3421	3340	3370	3300
Estiramento C-H dos grupos CH ₂ e CH ₃	2910	2924	2920	2920	2888	2917
Deformação angular (CH ₂ adjacente a carbonila)	1438	-	-	-	-	-
Deformação angular assimétrica de CH ₃ (carbono sp ³)	-	1476	1475	1475	1480	1480
Estiramento C-O- C (grupo éter) e deformação angular C-OH (álcoois primários)	1036	1038	1049	1035	1044	1035
Deformação C-O de anéis e ligações β-glicosídicas	896	903	908	893	902	893

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Nota: PM: palha de milho; CA: Cascas do amendoim.

A ocorrência de um aumento no agrupamento metila (-CH₃) em 1476 cm⁻¹ no FTIR é um indicativo de cationização e é corroborado pelo grau de substituição GS 0,413 ($\pm 0,001$).

5.4 Determinação do pH do Ponto de carga zero (pH_{PCZ})

O pH_{PCZ} é uma estimativa do comportamento da carga líquida superficial do sólido. Comumente definido pelo pH da solução no qual existe uma carga superficial neutra, o pH_{ZPC} é a condição na qual uma superfície tem uma densidade líquida de carga elétrica igual a zero, o que é característico de superfícies anfotéricas (Cerovic *et al.*, 2007).

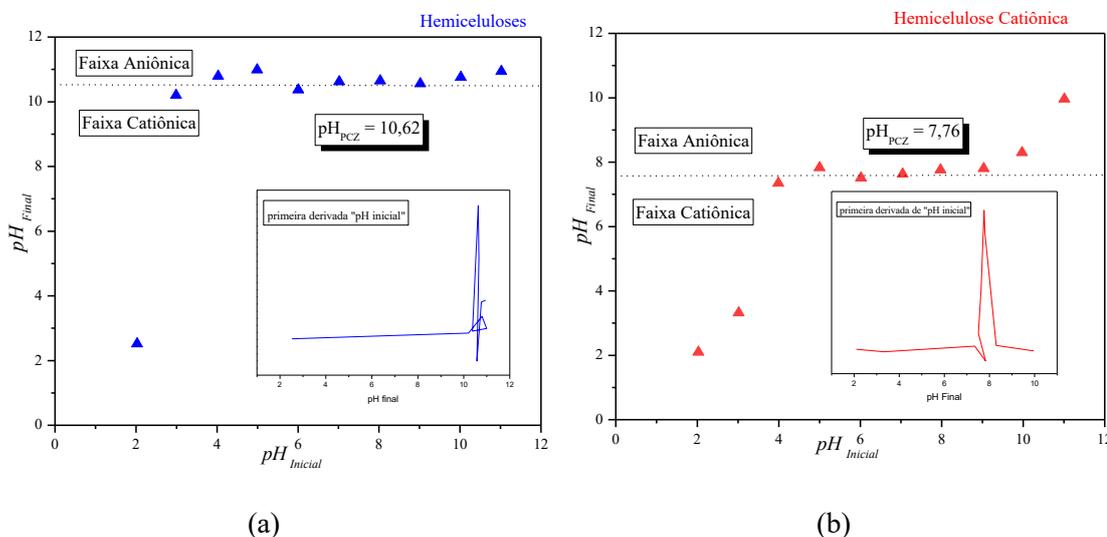
Assim, analisou-se o comportamento das hemiceluloses e das HC sintetizadas em relação à variação de pH do meio. A partir da nova leitura dos valores de pH após o período de agitação da amostra, foi realizada a derivada da curva do pH_{inicial} x pH_{final}, o que confere o pH_{PCZ}, valor de pH do meio onde a carga superficial é nula (ponto de mínimo da curva).

Na Figura 13(a) pode-se observar que o pH_{PCZ} das hemiceluloses está localizado em uma região básica, pH_{PCZ} 10,62; isso significa que, no pH de 10,62, a carga superficial das hemiceluloses é neutra. Em pH acima de 10,62, há predominância de cargas negativas sob a superfície das hemiceluloses, favorecendo a adsorção de cátions; abaixo de 10,62, as hemiceluloses tornam-se positivamente carregadas, favorecendo a adsorção de ânions. Na Figura 13(b) observa-se que, nas HC, há um deslocamento do pH_{PCZ} – passando de 10,62 para 7,76. Assim, em pH 7,76, a carga superficial das HC é neutra; tornou-se negativa acima do pH 7,76 e positiva abaixo deste pH. O deslocamento do pH_{PCZ} de 10,62 para 7,76 é um indicativo de que houve cationização das hemiceluloses, corroborando os dados de FTIR e GS.

Tomé *et al.* (2023) encontraram que a carga superficial líquida das HC se tornou negativa para pH acima de 6,99, cuja extração de hemiceluloses se deu por método de deslignificação oxidativa com uso do clorito de sódio em meio ácido, utilizando-se como fonte de biomassa as cascas de amendoim. Apesar de as hemiceluloses serem obtidas por

fontes de biomassa e por métodos de deslignificação diferentes, as HC apresentaram os pH_{PCZ} próximo ao pH neutro após a cationização.

Figura 13 - pH do ponto de carga zero das hemiceluloses e das HC



Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Zhu *et al.* (2015) observaram que a quantidade de grupos amina e o pH da suspensão influenciam em diversas cargas superficiais com diferentes potenciais *zeta* já que os grupos amina podem atuar como aceitadores de prótons devido ao par livre de elétrons no átomo de nitrogênio. Assim, em pH ácido ocorre protonação e em pH básico a desprotonação e, por isso, os pH_{ZPC} obtidos para as HC estão em torno do pH neutro (Singh & Gaydardzhiev, 2006).

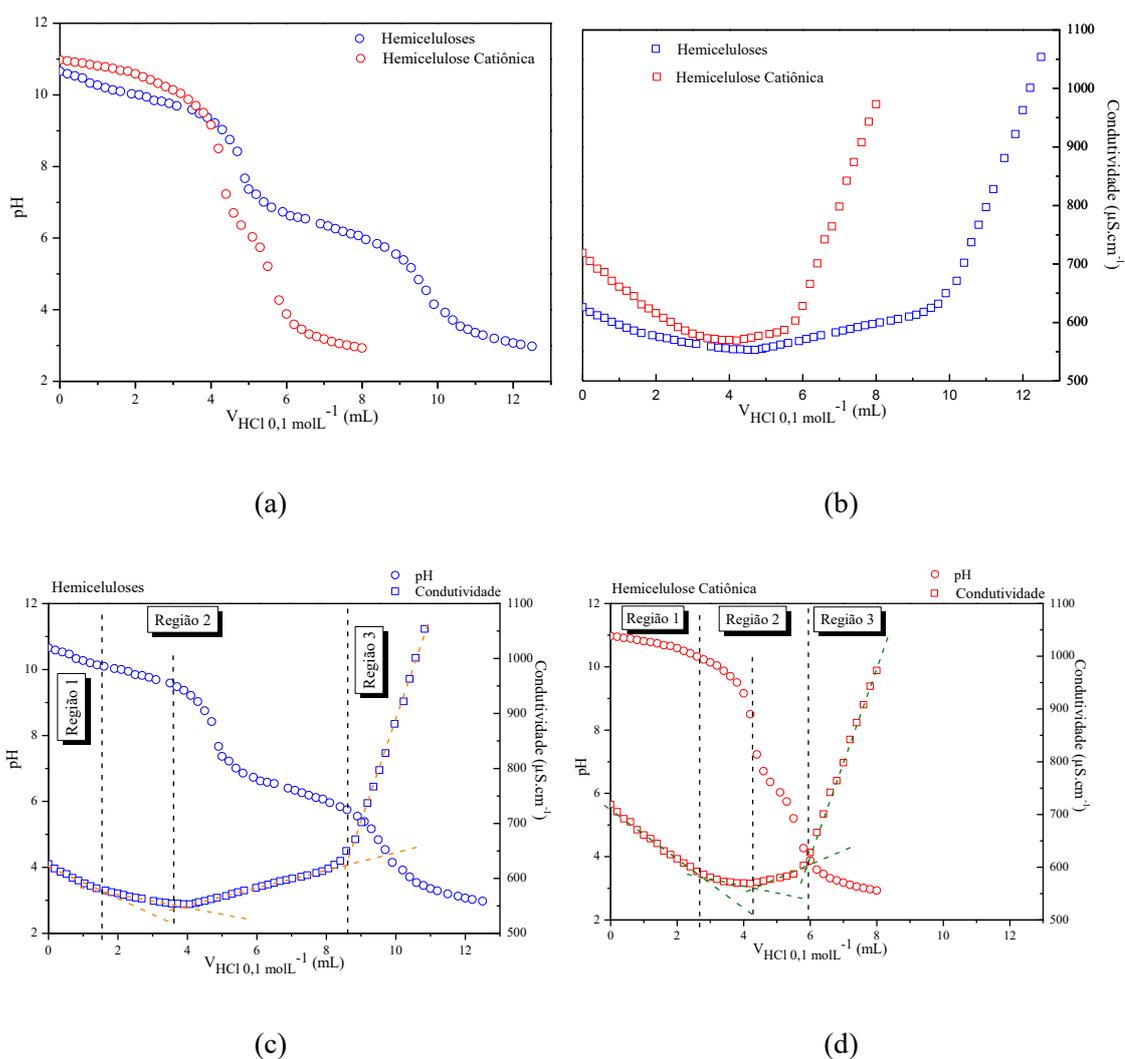
Embora o pH_{ZPC} tenha indicado neutralidade das estruturas das HC, o conhecimento dos pontos de equivalência das HC em meio aquoso se fez necessário, buscando-se maior elucidação da atuação destas como coagulante orgânico.

5.5 Titulações potenciométrica e condutimétrica simultâneas das hemiceluloses e HC

As titulações potenciométrica/condutimétrica foram realizadas de forma simultânea com o objetivo de caracterizar os perfis de superfície das hemiceluloses e HC.

A Figura 14 apresenta os perfis das curvas de titulação potenciométrica e condutimétrica para as hemiceluloses e HC provenientes dos métodos de extração investigados cujos perfis foram obtidos a partir dessa titulação simultânea, sendo a titulação realizada da faixa básica (pH próxima a 11) para a faixa ácida (pH próxima a 3).

Figura 14 - Perfis potenciométricos e condutimétricos das titulações simultâneas das hemiceluloses e das HC



Região 1 = Excesso de Base; Região 2 = Superfície da partícula; Região 3 = Excesso de ácido

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

As hemiceluloses apresentaram pH básico próximo a 11, sendo desnecessário o ajuste do pH e as HC tiveram o pH ajustado para 11, utilizando-se solução NaOH (0,1

molL⁻¹). As hemiceluloses e HC apresentaram comportamentos similares aos observados por Tomé *et al.*, (2023) para hemiceluloses e HC obtidas de casca de amendoim.

Na Figura 14(a), verifica-se que, no perfil potenciométrico das hemiceluloses e HC com a adição do titulante (HCl 0,1 molL⁻¹), há um decaimento em dois estágios, sendo mais definido para as hemiceluloses quando comparado às HC, cujo decaimento foi mais brusco. A presença de dois pontos de equivalência sugere que inicialmente é neutralizada uma região da espécie e, após, outra região é neutralizada. A ocorrência desse fenômeno demanda estudos mais amplos, de forma que seja isso suficientemente compreendido.

No perfil condutimétrico, Figura 14(b), verifica-se uma diminuição na condutividade com adição do titulante (HCl 0,1 molL⁻¹) em razão da neutralização dos íons livres OH⁻, sendo mais brusca na HC. A seguir, ocorre um aumento na condutividade à medida que aumenta a concentração de íons Cl⁻, proveniente do ácido titulante. A seguir, tem-se uma ascendência na condutividade quando do aumento do titulante, em vista da adição de excesso de HCl, cujos íons H₃O⁺ possuem maior condutividade que os íons OH⁻.

As Figuras 14(c) e 14(d) apresentam os perfis das curvas de titulação potenciométrica e condutimétricas simultâneas das hemiceluloses e HC, respectivamente. Nas Figuras 14(c) e 14(d), na Região 1, tem-se um excesso de base com decaimento do pH e da condutividade à medida que é acrescentado o titulante (HCl 0,1 molL⁻¹), característico de uma base forte, sendo mais pronunciado para a HC. Na Região 2, tem-se a superfície da partícula onde, na condutividade, ocorre um decaimento e, depois, uma ascensão, podendo estar isso relacionado com os dois pontos de equivalência observado nos perfis potenciométricos da Figura 14(a). Na Região 3, tem-se um excesso de ácido proveniente do titulante, causando um aumento no pH e na condutividade das hemiceluloses e HC. A interação da estrutura com o meio que corresponde inicialmente ao decaimento linear da condutividade e o crescimento linear ao final da titulação sugerem que:

(1) inicialmente, ocorre neutralização da base de Lewis presente no meio;

(2) na sequência, ocorre o fenômeno de interação na superfície das hemiceluloses; a interação está menos pronunciada nas HC do que nas hemiceluloses, indicando uma interação mais rápida da estrutura com o meio.

De acordo com a Figura 14(d) em relação à Figura 14(c), pode-se observar um consumo menor de titulante (HCl) para que se obtenha decaimento de pH e ascensão da condutividade, sugerindo que houve uma modificação na estrutura das hemiceluloses.

Desse modo, em uma avaliação conjunta, as curvas potenciométricas/conductimétricas das HC obtidas pelo método *Oxiorganosolv* – Figura 14(d), Região 1 – apresentaram perfis cuja diminuição do pH e da condutividade devido à neutralização de íons livres (característicos de uma base forte) foram mais pronunciados que os perfis apresentados pelas hemiceluloses obtidas pelo método *Oxiorganosolv* – Figura 14(c), Região 1. Verifica-se dois pontos de equivalência, sendo que o segundo ponto de equivalência se mostrou mais afetado nas HC do que nas hemiceluloses.

5.6 Determinação do Potencial *Zeta* das hemiceluloses e HC

As medidas de potenciais *zeta* foram realizadas com o objetivo de se determinar o pH isoelétrico das hemiceluloses e HC em função da variação do pH. A Figura 15 mostra os potenciais *zeta* encontrados para as hemiceluloses e HC em diversos pHs.

Na Figura 15(a), as hemiceluloses extraídas pelo método *Oxiorganosolv* apresentam potenciais *zetas* negativos para toda faixa de pH investigada (pH 3 a 11), com decaimento desses potenciais acentuado no sentido de pHs ácidos para básicos, apresentando potencial *zeta* mínimo para pH 11 próximo a -25 mV.

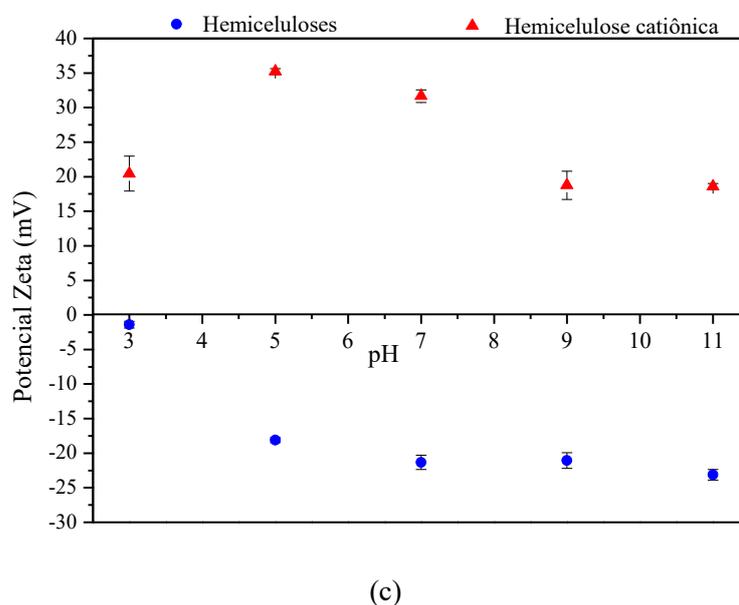
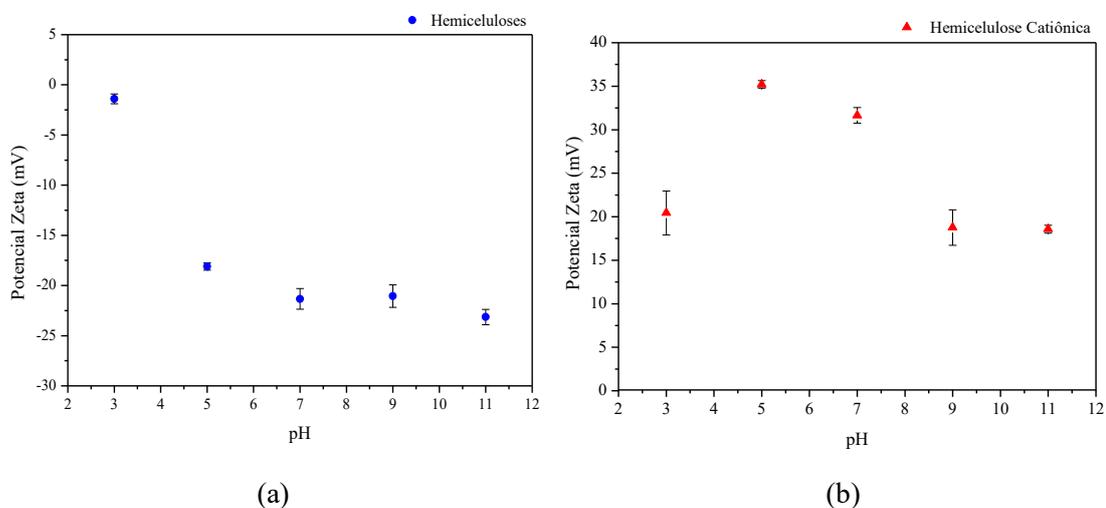
Já as HC, Figura 15(b), apresentaram potenciais *zeta* positivos para toda faixa de pH investigada (pH 3 a 11), com potenciais *zetas* máximos observados para os meios de pH 5 e 7.

O potencial *zeta* determinado para as hemiceluloses foi de $-19,18 \pm 0,97$ mV e o potencial *zeta* das HC foi de $+31,65 \pm 0,89$ mV indicando que houve alteração na estrutura das hemiceluloses com a cationização. Tomé *et al.* (2023) também encontraram potencial *zeta* negativo para as hemiceluloses ($-11,4 \pm 0,6$ mV) e potencial *zeta* positivo para as HC ($+13,1 \pm 0,5$ mV), com variação do pH.

Apesar de não ter se observado a transição de potencial *zeta* do positivo para negativo ou do negativo para o positivo, não sendo, possível determinar o ponto

isoeletrico das hemiceluloses e HC (onde as cargas negativas e positivas se igualam), pode-se corroborar os dados de pontos de carga zero e das titulações simultâneas.

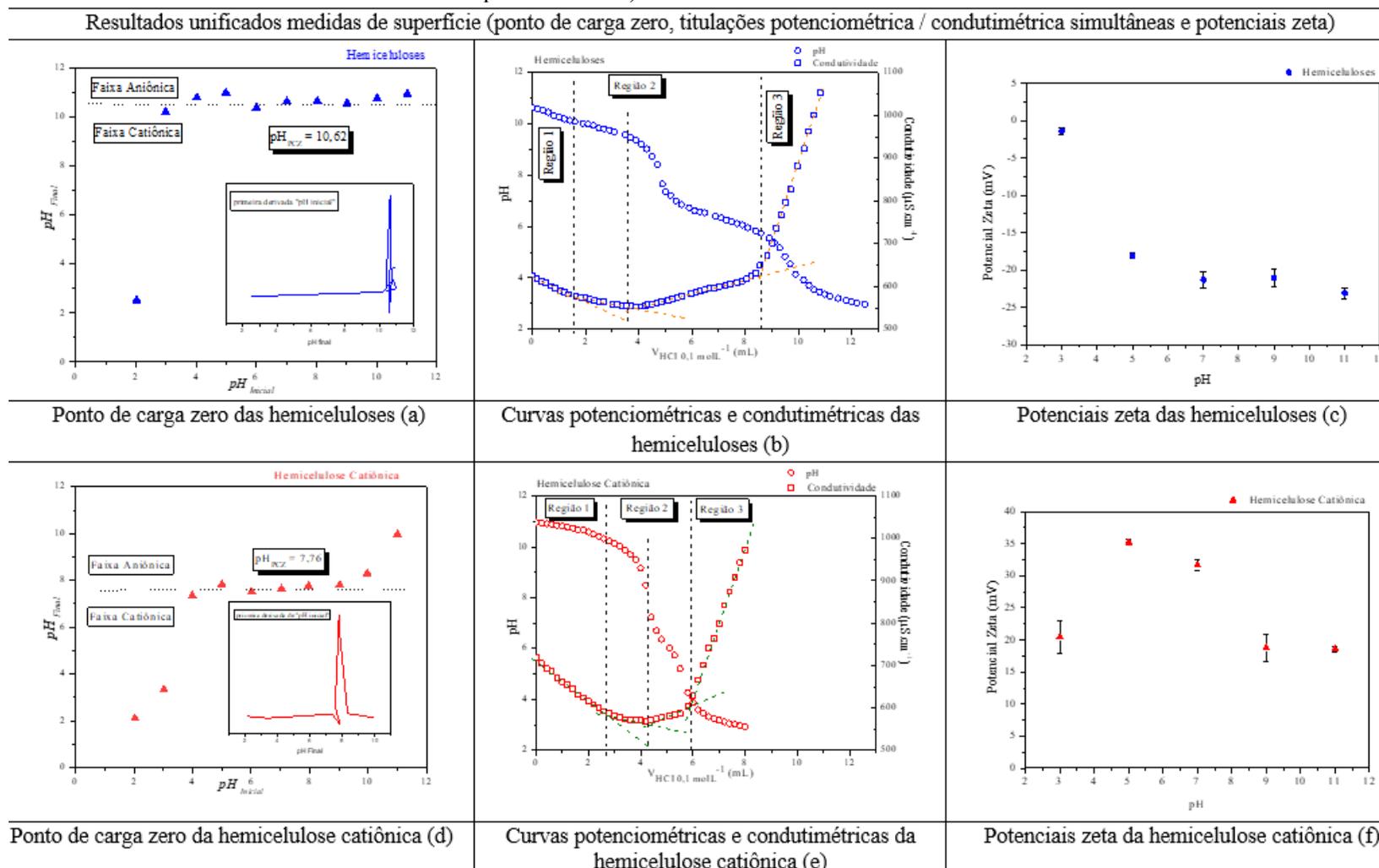
Figura 15 - Variação do Potencial Zeta em função do pH para as hemiceluloses e para as HC



Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Tal fato deve-se provavelmente à grande quantidade de cargas das hemiceluloses e HC em relação ao meio, sendo a proporção de H^+ e OH^- não suficiente para a observância do fenômeno pelo qual as cargas positivas e negativas se igualam (Tomé *et al.*, 2023; Serrano-Latina *et al.*, 2023).

Figura 16 - Resultados unificados de medidas de superfície (ponto de carga zero, titulações potenciométricas/conduvimétricas simultâneas e potenciais zeta) nas hemiceluloses e nas HC



Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Desse modo, os efeitos de superfície foram avaliados pelo pHs de carga zero (pH_{PCZ}), titulações potenciométricas/conduítmétricas simultâneas e potenciais *zeta*, conforme Figura 16.

O pH_{PCZ} das hemiceluloses foi influenciado pelo método de extração das hemiceluloses. Utilizando o método *Oxiorganosolv*, o pH_{PCZ} das hemiceluloses foi de 10,62 (situado na faixa básica) e utilizando o método do clorito-ácido, o pH_{PCZ} das hemiceluloses foi de 5,48 – situado na faixa ácida (Tomé *et al.*, 2023). Após cationização das hemiceluloses, o pH_{PCZ} torna-se 7,76 pelo método *Oxiorganosolv*, conforme Figura 16(d); já pelo método do clorito-ácido, o pH_{PCZ} da HC torna-se 6,99, próximo ao pH neutro (Tomé *et al.*, 2023).

Os potenciais *zeta* das hemiceluloses foram negativos ($-19,18 \pm 0,97$ mV) – Figura 16(c) –, enquanto das HC foram positivos ($+31,65 \pm 0,89$ mV) – Figura 16(f) –, confirmando que o grupamento amina ligou-se à estrutura química das hemiceluloses. A reação de esterificação, responsável por garantir o processo de cationização ao introduzir um grupamento amina terciária na estrutura das hemiceluloses, promoveu configurações semelhantes nas estruturas das HC quando comparada àquelas obtidas pelo método clorito-ácido (Tomé *et al.*, 2023).

5.7 Ensaios de tratabilidade em equipamento *jar test*

Os ensaios de tratabilidade foram realizados para encontrar a combinação “concentração de coagulante x pH de coagulação” que proporcionasse remoções eficientes de cor aparente e turbidez em água bruta para abastecimento.

Inicialmente, os ensaios foram realizados com intuito investigativo, buscando determinar a melhor dosagem do coagulante orgânico HC e o melhor pH de coagulação (faixa de pH de 5 a 11), já que esse foi o primeiro estudo com HC utilizando água bruta e não havia nenhuma referência anterior. A eficiência da remoção de cor aparente e turbidez, foram calculados utilizando a Equação 3.

5.7.1 Um breve histórico da investigação da dosagem da HC

Os ensaios de tratabilidade começaram em 08/07/2023, utilizando a Tabela 5, com pHs de coagulação variando de 6 a 11. Este trabalho foi pioneiro no uso do HC como coagulante em água bruta (portanto, não havia referências prévias de dosagens adequadas de HC). Foram realizados vários ensaios com água bruta em diferentes concentrações de HC e visualmente não se observou coagulação.

Como ainda não havido sido realizada a AE e nem FTIR, cujos resultados indicariam se houve cationização das hemiceluloses, surgiu o questionamento se as hemiceluloses não foram cationizadas e, por isso, não estaria ocorrendo a coagulação. Foi, então, realizado o ensaio de tratabilidade utilizando efluente sintético de laticínio (ESL), que foi preparado conforme descrito nos estudos de Mesquita (2023).

Mesquita (2023) e Tomé *et al.* (2023) aplicaram a HC no ESL e obtiveram bons resultados. Por isso, o ensaio foi realizado em ESL utilizando a HC sintetizada neste trabalho e foi obtida coagulação, concluindo-se, portanto, que as hemiceluloses haviam sido cationizadas e que o problema de não estar ocorrendo a coagulação não estava no coagulante.

Foram realizados ensaios posteriores de tratabilidade utilizando água bruta com o coagulante inorgânico PAC associado com a HC, obtendo-se resultados sem melhoria importante. Foram realizados, também, ensaios com o coagulante tanino catiônico SG associado à HC, em água bruta, e não se obteve a coagulação da água; talvez, devido a dosagens incorretas dessa associação.

Após inúmeros ensaios com dosagens relativamente altas de coagulante HC (25 a 600 ppm) e sem sucesso, chegou-se à conclusão de que poderia estar havendo uma dosagem excessiva de coagulante e, por isso, não estaria ocorrendo coagulação. Essa hipótese foi confirmada quando foram elaborados os diagramas de coagulação de remoção de cor aparente e turbidez para as dosagens de 100 a 400 ppm de HC, nos quais se pode observar que quanto maior a dosagem da HC, menores foram os percentuais de remoção de cor aparente e turbidez. No trabalho de Mesquita (2023), vale considerar, foram obtidas remoções de turbidez e de cor verdadeira com dosagem de 6,25 ppm de HC no ESL, o que corrobora com a hipótese de dosagem excessiva do coagulante, visto que o ESL tinha cor aparente e turbidez bem mais elevadas que a água bruta deste estudo.

Assim sendo, foi decidido que os próximos ensaios de tratabilidade seriam realizados com dosagens mais baixas de HC.

Na data 14/09/2023 obteve-se o primeiro resultado positivo com dosagem baixa de HC em duas etapas. A partir daí, vários ensaios foram realizados – com diferentes combinações de dosagem de HC e em diferentes tempos de adição do coagulante –, o que gerou bons resultados. Porém, esse procedimento não estava de acordo com a realidade do tratamento de água em que a adição de coagulante ocorre em apenas uma etapa. Assim, conversando com pessoas ligadas à área de saneamento, chegou-se à conclusão de que deveria ser feita alteração nos parâmetros utilizados nos ensaios de tratabilidade. A partir disso, a Tabela 6 foi elaborada. Em 02/10/2023, utilizando-se a Tabela 6 e baixas dosagens de HC, obteve-se o primeiro resultado positivo de coagulação com a adição do coagulante em dose única, na água bruta.

Esse é um histórico resumido dos ensaios de tratabilidade realizados. A seguir, serão apresentados alguns dos resultados obtidos e os resultados dos ensaios utilizando a água bruta deste estudo.

5.7.2 Ensaios de tratabilidade realizado com 100 e 400 ppm de HC com amostras diferentes

Dosando 100 ppm de HC a 250 rpm por 30 segundos na mistura rápida, 30 rpm por 15 minutos na mistura lenta e tempo de sedimentação de 15 minutos houve uma pequena remoção de turbidez, que não pôde ser visualmente observada (Tabela 1A do Apêndice). Dosando 400 ppm de HC a 250 rpm por 30 segundos na mistura rápida, 30 rpm por 15 minutos na mistura lenta, com tempo de sedimentação de 15 minutos, também não se observou visualmente coagulação/floculação (Tabela 2A do Apêndice).

Os resultados obtidos com dosagem de 400 ppm pioraram muito em relação à dosagem de 100 ppm de HC, visto que os percentuais de remoção de turbidez e cor aparente, foram todos negativos. Desse modo, pode ter havido uma dosagem excessiva do coagulante HC, nos próximos ensaios realizados as dosagens de HC foram menores. Na Tabela 15 apresenta-se uma síntese dos resultados dos experimentos com 100 e 400

ppm de HC, no tempo de sedimentação de 15 minutos. Em vermelho e preto, as remoções negativas e positivas, respectivamente.

Tabela 15 - Resultados obtidos com dosagem de 100 e 400 ppm de HC no tempo de sedimentação de 15 minutos

	pH	Turb i	Cor Ap i	Turb f	Cor Ap f	%RTurb	%RCor Ap
D1 = 100 ppm HC							
1	6,04	4,8	23,7	4,7	24,5	2,5	-3,4
2	6,99	4,8	23,7	4,5	24,0	7,0	-1,4
3	8,14	4,8	23,7	4,8	25,5	0,0	-7,5
4	9,12	4,8	23,7	4,5	25,0	7,8	-5,6
5	9,92	4,8	23,7	4,5	25,1	6,4	-5,8
6	10,93	4,8	23,7	4,6	25,6	4,6	-8,0
D2 = 400 ppm HC							
1	6,05	3,5	21,9	5,6	28,9	-58,2	-32,0
2	7,06	3,5	21,9	5,7	29,1	-60,6	-33,2
3	8,14	3,5	21,9	5,7	29,6	-60,0	-35,2
4	8,94	3,5	21,9	5,8	29,6	-63,6	-35,5
5	9,96	3,5	21,9	5,7	28,8	-60,5	-31,9
6	11,03	3,5	21,9	5,4	30,2	-54,2	-38,3

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Nota: esta tabela sintetiza a apresentação das Tabelas 1A e 2A.

5.7.3 Comparação de 2 ensaios com dosagem de 1,0 ppm de HC com aumento nos tempos de floculação e sedimentação, passando de 15 minutos para 30 minutos (em amostras diferentes)

Na Tabela 3A do Apêndice constam os resultados obtidos com agitação rápida de 30 segundos, agitação lenta de 30 rpm de 15 minutos e repouso de 15 minutos. Observou-se que não houve remoção de cor aparente e de turbidez. Na Tabela 4A do Apêndice constam os resultados obtidos com agitação rápida de 30 segundos, agitação lenta de 30 rpm de 30 minutos e repouso de 30 minutos. Pode-se observar que o aumento no tempo de floculação (de 15 para 30 minutos) e de sedimentação (de 15 para 30 minutos)

proporcionaram remoção de cor aparente e de turbidez. Concluiu-se, então, que o tempo de sedimentação de 15 minutos não foi suficiente para uma completa sedimentação dos flocos, sendo necessário um maior tempo de sedimentação para se obter melhores remoções de cor aparente e turbidez. Na Tabela 16 está o resumo dos resultados das Tabelas 3A e 4A. Em vermelho e preto, as remoções negativas e positivas, respectivamente.

Tabela 16 - Resultados obtidos com dosagem de 1,0 ppm de HC no tempo de sedimentação de 15 e 30 minutos

	pH	Turb i	Cor Ap i	Turb f	Cor Ap f	%RTurb	%RCor Ap
D1 = 1,0 ppm HC T1 = 15 min							
1	5,82	4,0	28,6	4,4	29,1	-11,3	-1,8
2	6,94	4,0	28,6	4,4	28,7	-10,1	-0,6
3	7,90	4,0	28,6	4,4	29,4	-9,8	-2,8
4	8,91	4,0	28,6	4,4	29,1	-10,8	-1,8
5	9,98	4,0	28,6	4,4	29,5	-11,1	-3,4
6	11,04	4,0	28,6	4,2	29,6	-6,6	-3,5
D2 = 1,0 ppm HC T2 = 30 min							
1	6,10	4,3	28,7	3,9	26,6	9,3	7,2
2	6,98	4,3	28,7	3,3	23,1	23,0	19,5
3	7,84	4,3	28,7	3,2	22,3	25,5	22,2
4	8,83	4,3	28,7	3,1	22,9	27,2	20,1
5	9,85	4,3	28,7	3,0	23,5	28,5	18,1
6	10,93	4,3	28,7	2,9	23,2	31,6	19,0

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Nota: esta tabela sintetiza a apresentação das Tabelas 3A e 4A.

5.7.4 Ensaio de tratabilidade realizado com 1,0 ppm de HC com adição de 0,5 ppm HC

Neste ensaio, foi utilizado 250 rpm por 30 segundos na mistura rápida, 30 rpm por 15 minutos na mistura lenta e tempo de sedimentação de 15 minutos. Com dosagem de 1,0 ppm de HC, com variação do pH de 6 a 11, não se observou coagulação/floculação (Tabela 3A, no Apêndice). Então, adicionou-se mais 0,5 ppm de HC na água do

experimento, com rotação lenta (30 rpm) por 15 minutos e repouso de 15 minutos (Tabela 5A do apêndice). Observou-se que houve pequena remoção de cor aparente e turbidez.

O material foi deixado por mais 30 minutos em repouso e a remoção de cor aparente e de turbidez aumentou. Concluiu-se, então, que o tempo de sedimentação influencia na remoção de cor aparente e turbidez (Tabela 6A do Apêndice). A síntese dos resultados das Tabelas 3A, 5A e 6A é apresentada na Tabela 17. Em vermelho e preto, as remoções negativas e positivas, respectivamente.

Tabela 17 - Resultados obtidos com dosagem em duas etapas de HC (1,0 ppm mais 0,5 ppm de HC) no tempo de sedimentação de 15 minutos

	pH	Turb i	Cor Ap i	Turb f	Cor Ap f	%RTurb	%RCor Ap
D1 = 1,0 ppm HC T1 = 15 min							
1	5,82	4,0	28,6	4,4	29,1	-11,3	-1,8
2	6,94	4,0	28,6	4,4	28,7	-10,1	-0,6
3	7,90	4,0	28,6	4,4	29,4	-9,8	-2,8
4	8,91	4,0	28,6	4,4	29,1	-10,8	-1,8
5	9,98	4,0	28,6	4,4	29,5	-11,1	-3,4
6	11,04	4,0	28,6	4,2	29,6	-6,6	-3,5
D2 = + 0,5 ppm HC T2 = 15 min							
1	5,82	4,0	28,6	4,1	27,2	-3,9	4,9
2	6,94	4,0	28,6	3,2	22,2	19,4	22,3
3	7,90	4,0	28,6	3,1	21,5	21,2	24,9
4	8,91	4,0	28,6	3,2	20,2	19,0	29,3
5	9,98	4,0	28,6	2,7	20,3	32,8	28,9
6	11,04	4,0	28,6	2,5	22,2	37,2	22,3
T3 = 30 min							
1	5,82	4,0	28,6	3,9	27,5	0,9	3,6
2	6,94	4,0	28,6	3,1	21,9	22,4	23,3
3	7,90	4,0	28,6	2,5	19,3	37,4	32,4
4	8,91	4,0	28,6	1,6	15,8	59,7	44,8
5	9,98	4,0	28,6	1,5	16,4	61,1	42,7
6	11,04	4,0	28,6	2,2	20,0	43,7	30,0

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Nota: esta tabela sintetiza a apresentação das Tabelas 3A, 5A e 6A.

5.7.5 Ensaio de tratabilidade com dosagem de HC de 0,5 a 4,0 ppm e variação de pH de 5 a 11

Na Tabela 18 estão descritos os parâmetros analisados da água bruta utilizado nos ensaios de tratabilidade.

Tabela 18 - Média e desvio padrão da média dos parâmetros de caracterização analítica da água bruta antes da realização dos ensaios de tratabilidade

Parâmetro analisado	Média/Desvio Padrão Média
pH	6,51 ($\pm 0,01$)
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	26,20 ($\pm 0,03$)
Turbidez (uT)	8,50 ($\pm 0,02$)
Cor Aparente (uH)	40,67 ($\pm 0,11$)

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Nota: os procedimentos estão descritos em *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (SMEWW, 2017)

Na Tabela 19 (tempo de sedimentação de 20 minutos) e Tabela 20 (tempo de sedimentação de 30 minutos), consta a síntese dos ensaios realizados com baixas dosagens de HC. Essas tabelas se referem às Tabelas 7A a 12A do Apêndice. Os parâmetros físicos para a realização dos *jar test* seguiram as especificações da Tabela 6. Foram realizados ensaios com sete variações de pH (6, 7, 8, 9, 10, 11 e 5), cinco variações de dosagem de coagulante orgânico HC (1, 2, 3, 4 e 0,5 ppm) e duas variações de tempo de sedimentação (20 e 30 minutos).

Os maiores percentuais de remoção de cor aparente e turbidez ocorreram com dosagem de 3,0 ppm de HC, pH de coagulação de 9,16 e 10,06, em tempo de sedimentação de 20 e 30 minutos (ver negrito nas Tabelas 19 e 20).

Tabela 19 - Resultados obtidos com dosagens de HC (0,5 a 4,0 ppm) no tempo de sedimentação de 20 minutos

Ensaio	pH	Turb i	Cor Ap i	Turb f	Cor Ap f	%RTurb	%RCor Ap
D1 = 1,0 ppm HC T1 = 20 min							
1	5,87	8,5	41,3	2,6	17,4	69,4	57,9
2	7,10	8,5	41,3	3,6	22,2	57,5	46,3
3	7,92	8,5	41,3	5,1	25,9	40,1	37,4
4	8,80	8,5	41,3	5,0	30,4	40,7	26,5
5	9,85	8,5	41,3	5,7	33,5	32,7	18,9
6	11,00	8,5	41,3	3,6	27,8	57,3	32,7
7	5,05	8,4	40,3	2,7	16,2	67,8	59,9
D2 = 2,0 ppm HC T1 = 20 min							
1	6,04	8,6	40,9	2,3	16,0	73,3	60,9
2	7,25	8,6	40,9	1,9	15,6	78,5	61,9
3	8,08	8,6	40,9	2,4	15,9	72,4	61,1
4	8,96	8,6	40,9	2,3	18,6	73,2	54,4
5	9,94	8,6	40,9	2,5	18,2	71,2	55,5
6	10,80	8,6	40,9	1,7	19,6	80,8	52,0
7	5,03	8,4	40,3	3,7	22,7	56,6	43,8
D3 = 3,0 ppm HC T1 = 20 min							
1	6,05	8,5	40,5	2,8	21,3	66,9	47,5
2	7,22	8,5	40,5	1,8	16,3	79,1	59,8
3	8,19	8,5	40,5	1,5	14,6	82,4	63,9
4	9,16	8,5	40,5	0,9	13,7	89,2	66,3
5	10,06	8,5	40,5	0,9	14,4	89,7	64,4
6	11,12	8,5	40,5	1,4	18,1	83,3	55,3
7	5,14	8,4	40,3	7,1	36,9	15,9	8,5
D4 = 4,0 ppm HC T1 = 20 min							
1	6,00	8,5	40,7	5,6	28,5	33,9	30,0
2	7,26	8,5	40,7	2,0	17,2	76,6	57,7
3	8,01	8,5	40,7	1,6	15,9	81,2	60,9
4	8,86	8,5	40,7	1,4	15,3	83,2	62,5

(continua)

Tabela 19, Cont.

5	9,80	8,5	40,7	1,4	17,8	83,4	56,3
6	10,99	8,5	40,7	1,4	16,7	84,0	58,9
7	5,07	8,4	40,3	8,0	39,5	4,6	2,1
D5 = 0,5 ppm HC T1 = 20 min							
1	6,00	8,4	40,3	4,0	23,2	52,3	42,3
2	7,05	8,4	40,3	5,8	31,8	31,3	20,9
3	8,12	8,4	40,3	7,4	36,5	11,9	9,3
4	9,13	8,4	40,3	7,0	35,1	17,0	12,8
5	10,08	8,4	40,3	7,7	40,1	8,7	0,4
6	11,15	8,4	40,3	7,0	38,8	17,4	3,6
7	5,04	8,4	40,3	2,9	19,4	65,8	51,9

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Nota: esta tabela sintetiza a apresentação das Tabelas 7A a 12A.

Tabela 20 - Resultados obtidos com dosagens de HC (0,5 a 4,0 ppm) no tempo de sedimentação de 30 minutos

Ensaio	pH	Turb i	Cor Ap i	Turb f	Cor Ap f	%RTurb	%Rcor Ap
D1 = 1,0 ppm HC T2 = 30 min							
1	5,87	8,5	41,3	2,5	16,6	70,5	59,8
2	7,10	8,5	41,3	3,1	20,7	63,2	49,9
3	7,92	8,5	41,3	3,7	22,9	55,9	44,6
4	8,80	8,5	41,3	4,6	28,8	46,0	30,3
5	9,85	8,5	41,3	5,2	31,2	38,8	24,5
6	11,00	8,5	41,3	3,7	24,9	56,3	39,8
7	5,05	8,4	40,3	2,9	16,1	65,0	60,1
D2 = 2,0 ppm HC T2 = 30 min							
1	6,04	8,6	40,9	1,5	13,4	82,1	67,2
2	7,25	8,6	40,9	1,3	13,4	84,5	67,2
3	8,08	8,6	40,9	1,5	14,7	82,5	64,0
4	8,96	8,6	40,9	2,4	17,5	72,6	57,2

(continua)

Tabela 20, Cont.

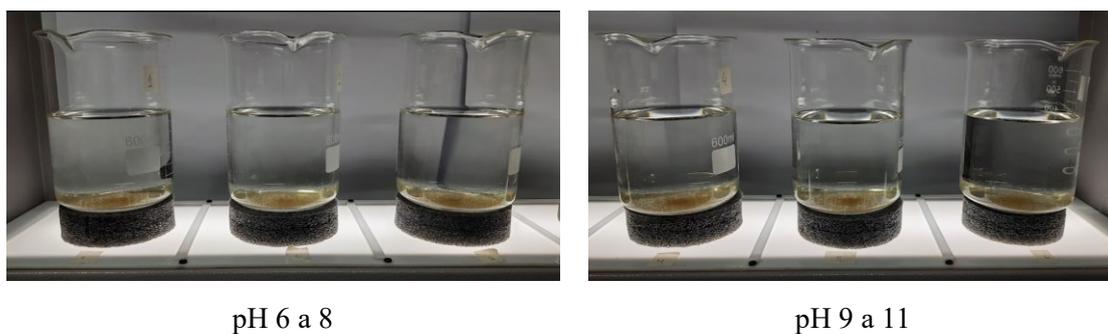
5	9,94	8,6	40,9	1,6	15,8	80,9	61,3
6	10,80	8,6	40,9	3,5	18,1	59,2	55,7
7	5,03	8,4	40,3	3,2	21,6	61,6	46,4
D3 = 3,0 ppm HC T2 = 30 min							
1	6,05	8,5	40,5	2,5	17,5	71,0	56,9
2	7,22	8,5	40,5	1,3	14,2	84,4	65,0
3	8,19	8,5	40,5	1,0	15,2	87,8	62,4
4	9,16	8,5	40,5	0,9	14,1	89,6	65,3
5	10,06	8,5	40,5	1,1	15,5	86,7	61,8
6	11,12	8,5	40,5	1,2	17,0	86,5	58,1
7	5,14	8,4	40,3	6,7	33,7	20,6	16,4
D4 = 4,0 ppm HC T2 = 30 min							
1	6,00	8,5	40,7	4,8	26,8	43,7	34,1
2	7,26	8,5	40,7	1,7	15,9	79,9	60,9
3	8,01	8,5	40,7	1,5	15,1	82,6	62,9
4	8,86	8,5	40,7	1,2	14,7	86,3	63,9
5	9,80	8,5	40,7	1,1	14,5	87,0	64,3
6	10,99	8,5	40,7	1,3	16,7	85,0	58,9
7	5,07	8,4	40,3	7,5	36,9	10,6	8,5
D5 = 0,5 ppm HC T2 = 30 min							
1	6,00	8,4	40,3	3,5	22,6	58,0	43,9
2	7,05	8,4	40,3	4,6	27,3	45,9	32,2
3	8,12	8,4	40,3	6,8	35,5	19,9	11,8
4	9,13	8,4	40,3	6,5	35,0	22,4	13,1
5	10,08	8,4	40,3	7,2	38,9	14,1	3,4
6	11,15	8,4	40,3	6,8	38,3	18,9	4,9
7	5,04	8,4	40,3	2,4	18,6	71,3	53,9

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Nota: esta tabela sintetiza a apresentação das Tabelas 7A a 12A.

Na Figura 17 estão as fotos do ensaio realizado com a água bruta (dosagem de 3,0 ppm de HC, com variação do pH de 6 a 11, após o tempo de sedimentação de 30 minutos). Nas imagens é possível observar a separação entre líquido e sólido.

Figura 17 - Ensaio de tratabilidade da água bruta com 3,0 ppm de HC em pH variando de 6 a 11 - após 30 minutos de sedimentação



pH 6 a 8

pH 9 a 11

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

5.8 Diagramas de coagulação dos ensaios de tratabilidade

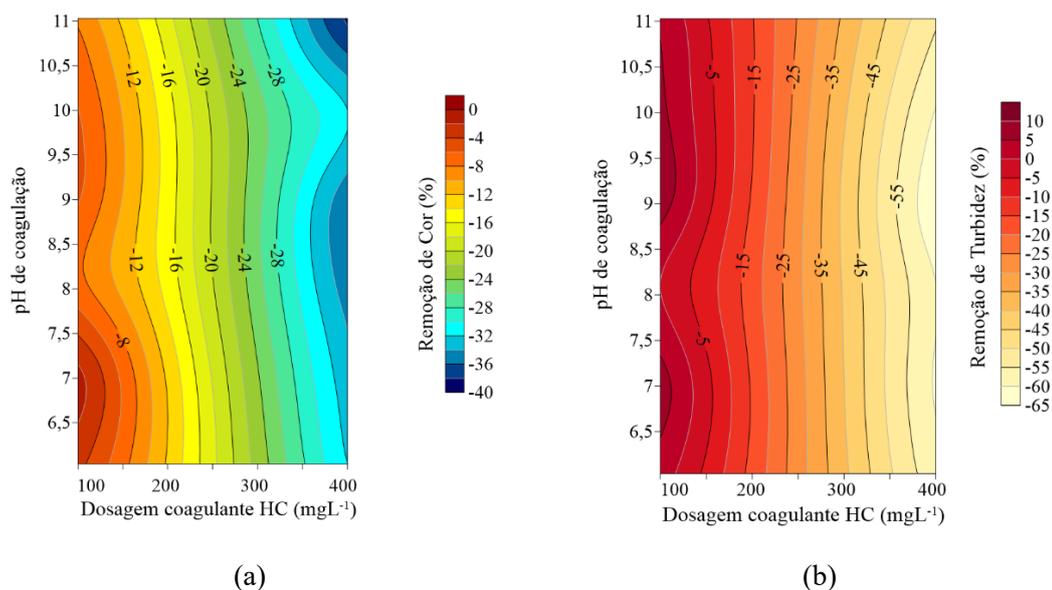
Os ensaios de coagulação/floculação foram realizados para verificar os efeitos de diferentes dosagens de HC em diferentes pHs na remoção de cor aparente e turbidez da água bruta. O diagrama de coagulação possibilita estabelecer regiões de “dosagem de coagulante x pH de coagulação” em pontos não amostrados, o que permite sua utilização em estudos de Remoção de Turbidez, Cor Aparente e Cor Verdadeira, por exemplo.

5.8.1 Diagramas de coagulação com dosagem de 100 e 400 ppm de HC

A Figura 18 comprova o argumento, antes apresentado, das superdosagens, pois à medida que diminui a dosagem de coagulante HC, a remoção turbidez melhora. No diagrama de coagulação de percentual de remoção de cor aparente, nota-se que não houve remoção de cor aparente em nenhuma faixa de dosagem HC e pH ensaiada (remoções negativas). Já no diagrama de remoção de turbidez é possível perceber que houve uma

pequena remoção de turbidez com dosagem na faixa de 100 ppm e que, nas faixas acima de 100 ppm até a dosagem de 400 ppm, não houve nenhuma remoção de turbidez (remoções negativas). O eixo das ordenadas tem-se o pH de coagulação (variando de 6 a 11) e no eixo das abscissas estão as dosagens do coagulante HC (variando de 100 a 400 ppm).

Figura 18 - Diagramas de coagulação com dosagem de HC variando de 100 a 400 ppm



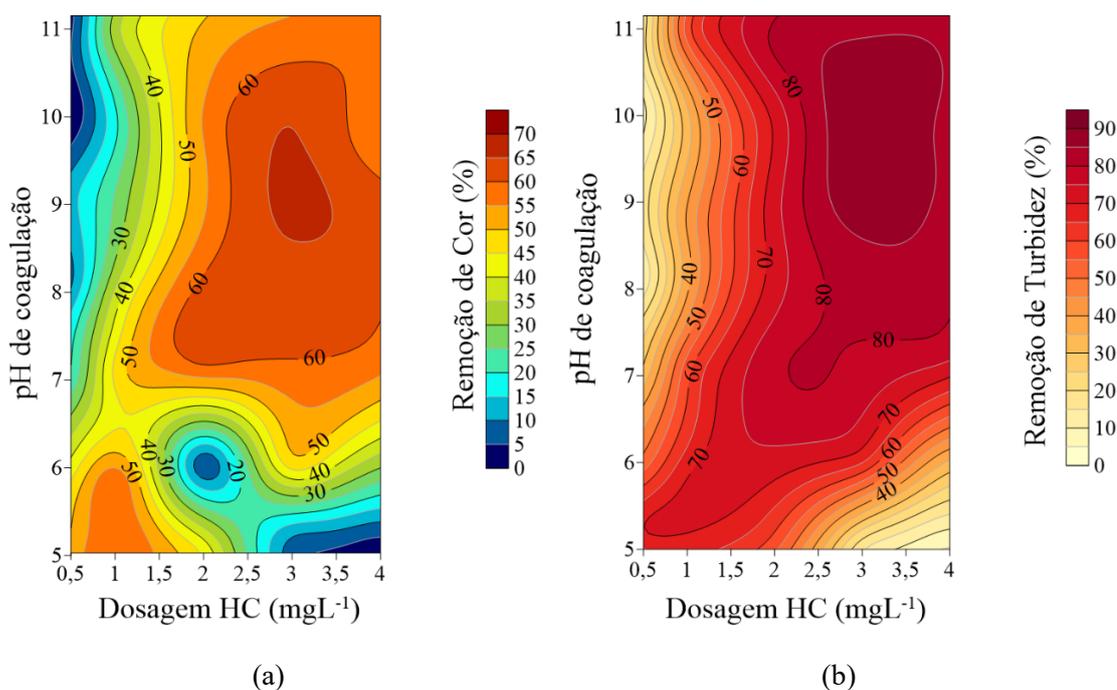
Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.
Nota: percentual de Remoção de cor aparente (a) e de Turbidez (b).

5.8.2 Diagramas de coagulação dos ensaios de tratabilidade com dosagem de HC de 0,5 a 4,0 ppm com variação do pH de 5 a 11 com tempo de sedimentação de 20 e 30 minutos

Os diagramas de coagulação da Figura 19 (tempo de sedimentação de 20 minutos) e Figura 20 (tempo de sedimentação de 30 minutos) tiveram resultados dos percentuais de remoção de turbidez e de cor aparente com dosagem de HC variando de 0,5 a 4,0 ppm (eixo das abscissas) e pH de coagulação variando de 5 a 11 (eixo das ordenadas), conforme as Tabelas 7A a 12A do Apêndice.

Na Figura 19 é possível observar que em baixas dosagens de HC (0,5 a 1,5 ppm) as melhores remoções de cor aparente (a) e turbidez (b) ocorreram em faixa de pH mais baixa (5,0 a 6,0). Para dosagens maiores de coagulante, na faixa acima de 1,5 ppm, as maiores remoções de cor aparente (a) e turbidez (b) ocorreram em faixas de pH acima 6,0.

Figura 19 - Diagramas de coagulação com dosagem de HC variando de 0,5 a 4 ppm no tempo de sedimentação de 20 minutos



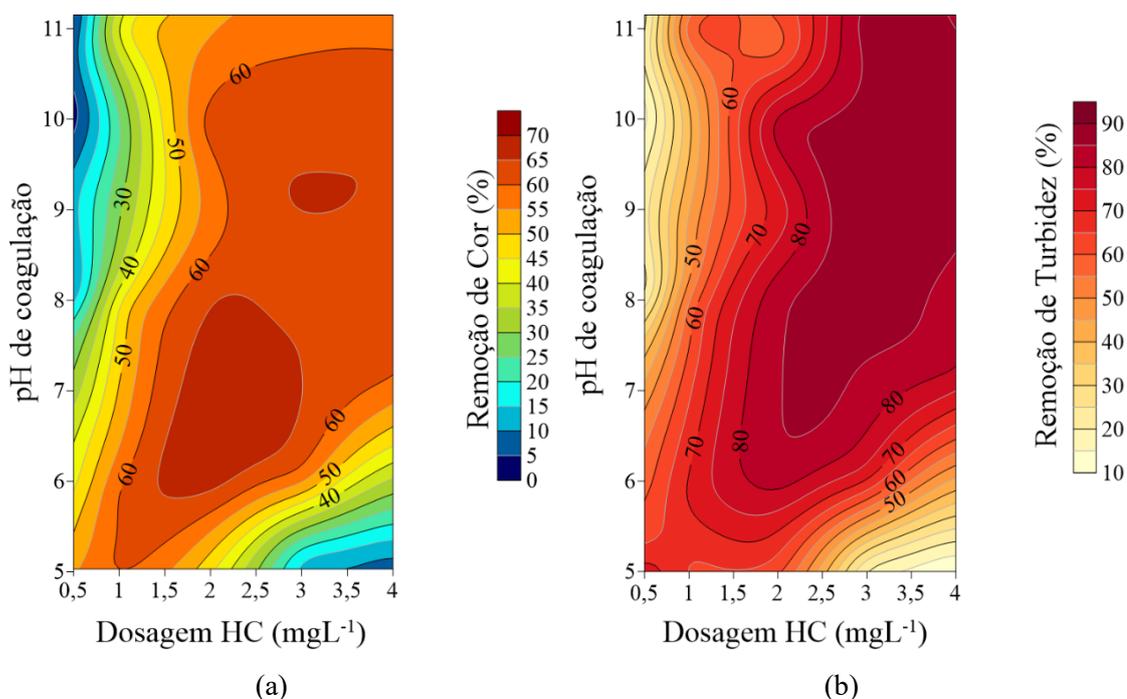
Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Nota: percentual de Remoção de cor aparente (a) e de Turbidez (b).

Pela Figura 20, com tempo de sedimentação de 30 minutos, nota-se uma melhora visível em todo o diagrama no percentual de remoção em relação à Figura 19. Na Figura 20(a), com o tempo de sedimentação de 30 minutos, observou-se uma melhora nas áreas em que a remoção de cor aparente não tinha sido tão efetiva, no tempo de sedimentação de 20 minutos, como na região próxima ao pH 6 e dosagem 2,0 ppm, visto na Figura 19(a). Pela Figura 20(b), com o tempo de sedimentação de 30 minutos, nota-se uma ampliação na faixa de percentual de remoção de turbidez em relação à Figura 19(b). Pela

Figura 20, conclui-se que o tempo de sedimentação influenciou na eficiência de remoção de cor aparente (a) e remoção de turbidez (b), apresentando maior eficiência nas remoções.

Figura 20 - Diagramas de coagulação com dosagem de HC variando de 0,5 a 4 ppm no tempo de sedimentação de 30 minutos



Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.
Nota: percentual de Remoção de cor aparente (a) e de Turbidez (b).

5.9 Estabelecimento de análises estatísticas dos resultados de tratabilidade

Com dosagem de 3,0 ppm de HC foram obtidas as melhores remoções de cor aparente e de turbidez, conforme apresentado na Tabela 21.

Tabela 21 - Melhores pontos experimentais de remoção de turbidez e de cor aparente obtidos neste estudo na dosagem de 3,0 ppm

Tempo (minutos)	pH	% Remoção	% Remoção
	coagulação	Turbidez	Cor Aparente
20	9,16	89,2	66,3
30	9,16	89,6	65,3
20	10,06	89,7	64,4

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

O teste estatístico de análise de variância para as variáveis cor aparente e turbidez indicaram diferenças significativas entre dosagem, pH e tempo de sedimentação (p-valor < 0,05).

O resultado do teste de Scott-Knott mostra que não há diferença estatística entre as médias de Cor Aparente e médias de Turbidez no tempo de sedimentação de 20 e 30 minutos, na dosagem de 3,0 ppm HC e pH de coagulação de 9,16.

Na Tabela 22 (dosagem de 3,0 ppm de HC e pH de 9,16) o Tratamento 1 refere-se ao tempo de sedimentação de 20 minutos e o Tratamento 2 refere-se ao tempo de sedimentação de 30 minutos.

Tabela 22 - Análise do desdobramento de tempo em cada nível de dosagem de 3,0 ppm de HC e pH 9,16* para Cor Aparente e Turbidez

Cor Aparente			Turbidez		
Tratamentos	Médias	Resultado do teste	Tratamentos	Médias	Resultado do teste
1	13,666667	a1	2	0,886667	a1
2	14,066667	a1	1	0,923333	a1

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Nota: *Teste de Scott-Knott.

Na Tabela 23, o Tratamento 4 refere-se ao pH de 9,16 e o tratamento 5 ao pH de 10,06, para dosagem de 3,0 ppm de HC, com tempo de sedimentação de 20 minutos. O resultado do teste de Scott-Knott mostra que não há diferença estatística entre as médias de Cor Aparente e Turbidez para os pH de coagulação de 9,16 e 10,06, na dosagem de 3,0 ppm HC e no tempo de sedimentação de 20 minutos.

Tabela 23 - Análise do desdobramento de pH dentro de cada nível de dosagem de 3,0 ppm HC e tempo de 20 minutos* para Cor Aparente e Turbidez

Cor Aparente			Turbidez		
Tratamentos	Médias	Resultado do teste	Tratamentos	Médias	Resultado do teste
4	13,666667	a1	5	0,088000	a1
5	14,433333	a1	4	0,923333	a1
3	14,633333	a1	6	1,426667	a2
2	16,300000	a2	3	1,500000	a2
6	18,133333	a3	2	1,780000	a3
1	21,300000	a4	1	2,820000	a4
7	36,900000	a5	7	7,066667	a5

Fonte: Elaborada pela Pesquisadora, 2024.

Nota: *Teste de Scott-Knott.

Com base no teste de Scott-Knott, considerando os pH 9,16 e 10,06, bem como dosagem de 3,0 ppm HC, verificou-se que Cor Aparente e Turbidez não apresentam diferenças estatísticas significativas nos tempos 20 e 30 minutos, como pode ser observado nos resultados das Tabelas 22 e 23, em relação as médias de Cor Aparente e de Turbidez.

Dessa forma, a melhor combinação foi no pH 9,16 e no tempo de 20 minutos com dosagem de 3,0 ppm – em razão de se utilizar menos alcalinizante e ocorrer em menor tempo de sedimentação, em destaque na Tabela 21 – já que, estatisticamente, não houve diferença na Cor Aparente e Turbidez nos pHs de 9,16 e 10,06, nos tempos de sedimentação de 20 e 30 minutos e na dosagem de 3,0 ppm de HC, para os valores experimentais encontrados. Nessas condições, a turbidez de 8,5 uT diminuiu para 0,9 uT com remoção de turbidez de 89,2%. A cor aparente inicial de 40,5 uH diminuiu para 13,7 uH, com remoção de cor aparente de 66,3%. Os valores encontrados para Turbidez (0,9 uT) e Cor Aparente (13,7 uH) atendem ao Anexo 11 da Portaria GM/MS 888/2021 (Ministério da Saúde, 2021), de acordo com a Tabela 7, e o valor de turbidez de 0,9 uT atende também o Anexo 2 da Portaria GM/MS 888/2021 (Ministério da Saúde, 2021), no qual o VMP para turbidez pós-filtração lenta é 1,0 uT; lembrando que os valores encontrados neste estudo não consideram filtração (pela qual a água não passou), que é uma etapa do tratamento convencional de água para abastecimento. Valores baixos de

Turbidez na água favorece a ação dos agentes de desinfecção utilizados na água de abastecimento, tornando-os mais eficazes e eficientes.

6 CONCLUSÕES

A análise de FTIR mostrou o aparecimento da banda 1476 cm^{-1} de agrupamento metila ($-\text{CH}_3$), a qual não estava presente no espectro das hemiceluloses, demonstrando a ação do agente cationizante ETA na estrutura das hemiceluloses. A análise elementar indicou $2,21 (\pm 0,14)\%$ de Nitrogênio nas HC, com GS de $0,413 (\pm 0,001)$, evidenciando a inserção do agrupamento amina na molécula, apontando indícios de que houve a cationização. O pH_{PCZ} das hemiceluloses foi influenciado pelo método de deslignificação *Oxiorganosolv* (meio básico) quando comparado aos pH_{PCZ} de hemiceluloses obtido pelo método clorito (meio ácido). Já após cationização das hemiceluloses, o pH_{PCZ} torna-se próximo do pH neutro. Além disso, o pH_{PCZ} das hemiceluloses foi de 10,62 e de 7,76 para as HC. As hemiceluloses apresentaram potencial *zeta* negativos ($-19,18 \pm 0,97\text{ mV}$), enquanto as HC apresentaram potencial *zeta* positivos ($+31,65 \pm 0,89\text{ mV}$), sendo indicativo que a cadeia lateral catiônica ($-\text{CH}_2-\text{CHOH}-\text{CH}_2-\text{N}^+(\text{CH}_3)_3\text{Cl}^-$) foi ligada na estrutura química das hemiceluloses.

Nos testes de tratabilidade utilizando as HC como coagulante primário no tratamento de água de abastecimento, os melhores resultados obtidos foram em dosagem de 3,0 ppm de HC com pH de coagulação de 9,16 e tempo de sedimentação de 20 minutos. Houve remoção de turbidez em 89,2%. A turbidez passou de 8,5 uT para 0,9 uT e houve remoção de cor aparente em 66,3%, passando de 40,5 uH para 13,7 uH.

Turbidez de 0,9 uT e Cor Aparente de 13,7 uH atendem o Anexo 11 da Portaria GM/MS 888/2021 (Ministério da Saúde, 2021). Vale considerar, os valores encontrados neste estudo referem-se a água que não passou pela filtração, que é uma etapa do tratamento convencional de água para abastecimento.

Pelos resultados dos ensaios obtidos neste trabalho, as HC extraídas da PM são promissoras para aplicação como coagulante primário no tratamento de água, visto que apresentaram eficiência na remoção de cor aparente e de turbidez da água bruta de abastecimento em substituição aos coagulantes inorgânicos comumente usados.

Assim sendo, no tratamento de água, as HC podem ser consideradas alternativas mais ecológicas que os compostos inorgânicos, pois são provenientes de fontes renováveis, são biodegradáveis e de baixo impacto ambiental. A PM, estando relacionada, também, aos ODS 2, ODS 3 e ODS 6, tornam o tratamento de água mais sustentável.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando todo o percurso da pesquisa e questões que surgiram ao longo do desenvolvimento do estudo, ficam como sugestões para trabalhos futuros: utilizar outras fontes de matérias-primas para a extração das hemiceluloses e posterior síntese das HC; investigar outros agentes cationizantes e métodos de síntese da HC, a fim de otimizar o processo de síntese utilizado neste estudo; realizar mais estudos, de forma a caracterizar por completo as HC e sua aplicação na água de abastecimento para consumo humano, considerando as vantagens apresentadas – como ausência de metais em sua composição, por exemplo; identificar o mecanismo de coagulação das HC e desenvolver métodos viáveis para o uso das HC como alternativa sustentável em substituição aos coagulantes inorgânicos comumente usados; realizar ensaios de tratabilidade com água bruta de turbidez mais alta; avaliar a viabilidade econômica da HC como coagulante.

REFERÊNCIAS

ABDULSALAM, S.; GITAL, A. A.; MISAU, I.; SHUWA, S. M.; RASTILANTIE, M. Water clarification using *Moringa oleifera* seed coagulant: maiduguri raw water as a case study. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, Helsinki, Finlândia, v. 5, n. 1, p. 302-306, jan./2007. DOI: <https://doi.org/10.1234/4.2007.778>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/294086169_Water_clarification_using_Moringa_oleifera_seed_coagulant_Maiduguri_raw_water_as_a_case_study_WFL_Publisher_Science_and_Technology. Acesso em: 12 jan. 2023.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12216**: saneamento básico: projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público: procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/5609/nbr12216-projeto-de-estacao-de-tratamento-de-agua-para-abastecimento-publico-procedimento>. Acesso em: 20 out. 2023.

ALMEIDA, F. J. A. **Otimização da produção de bioetanol a partir da palha de milho cultivado para fitorremediação de solos contaminados com metais pesados**. 2021. 104 f. Dissertação (Mestrado em Energias Sustentáveis) – Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2021. Disponível em: https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/19367/1/DM_FranciscoAlmeida_2021_MES.pdf. Acesso em: 13 fev. 2024.

ALVES, A. G. T. **Investigação de hemicelulose catiônica - sintetizada a partir do resíduo agroindustrial casca de amendoim - como coagulante natural no tratamento de efluente industrial de laticínio**. 2021. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/36126/1/InvestigaçãoHemiceluloseCatiônica.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2023.

ALVES, A. G. T.; PACHECO, I. S.; FREITAS, A. B.; RIBEIRO, E. A. M.; CANOBRE, S. C.; AMARAL, F. A. Investigation of new natural coagulant - cationic hemicellulose associated with cationic tannin - for coagulation/dissolved air flotation (C/DAF) in the treatment of industrial effluent. **Ver. Ambient. Água**, Taubaté, SP, v. 17, n. 4, e2824, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2824>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/RhDbX4q66syLRDy5NTmGy3g/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 29 nov. 2023.

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **ODS 6 no Brasil**: visão da ANA sobre os indicadores. 2019. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/aceso-a-informacao/institucional/publicacoes/ods6/ods6.pdf>. Acesso em: 20 mar.2024

BARTIKO, D.; JULIO, M. Construção e emprego de diagramas de coagulação como ferramenta para o monitoramento contínuo da floculação em águas de abastecimento. **Ver. Ambient. Água**, Taubaté, SP, v. 10, n. 1, p. 71-81, jan./mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1239>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/ScdmFbTv4RZb3KrbC3YDzRf/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 23 out. 2023.

BONGIOVANI, M. C.; KONRADT-MORAES, L. C.; BERGAMASCO, R.; LOURENÇO, B. S. S.; TAVARES, C. R. G. Os benefícios da utilização de coagulantes naturais para a obtenção de água potável. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, PR, v. 32, n. 2, p. 167-170, 2010. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v32i2.8238>. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/8238/8238>. Acesso em: 12 jan. 2023.

BRASIL. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 142, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf. Acesso em: 13 dez. 2023.

BRASIL. SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico temático Serviços de água e esgoto: gestão técnica de esgoto ano de referência 2021. Brasília: SNSA, 2023. Disponível em: https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/Snis/AGUA_E_ESGOTO/DIAGNOSTICO_TEMATICO_GESTAO_TECNICA_DE_ESGOTO_AE_SNIS_AGO_2023.pdf. Acesso em: 01 jun. 2024.

CASTRO, J. N. S. **Síntese de Hemiceluloses catiônicas por indução de micro-ondas para utilização como coagulante em tratamento de efluentes industriais**. 2020. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/30605/5/SínteseDeHemiceluloses.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2023.

CASTRO, J. N. S.; RIBEIRO, E. A. M.; ALVES, A. G. T.; RODRIGUES FILHO, G.; CANOBRE, S. C.; AMARAL, F. A. Aplicação de coagulantes orgânicos catiônicos sintetizados por indução de micro-ondas para o tratamento de efluentes industriais. *In*: Editora Poisson (Org.). **Recursos Hídricos em Foco**. Belo Horizonte: Poisson, 2019. cap. 3, p. 22-28. (Volume 1). DOI: <https://doi.org/10.36229/978-85-7042-188-3.CAP.03>. Disponível em: https://www.poisson.com.br/livros/recursos_hidricos/volume1/recursos_hidricos_em_foco_volume1.pdf. Acesso em: 22 jan. 2024.

JACOBI, P. R.; FREY, K.; RAMOS, R. F.; CÔRTEZ, P. L. ODS 6 - água potável e saneamento. *In*: FREY, K.; TORRES, P. H. C.; JACOBI, P. R.; RAMOS, R. F. (Orgs.). **Objetivos do Desenvolvimento Sustentável: desafios para o planejamento e a governança ambiental na macrometrópole paulista**. Santo André: EdUFABC, 2020. p. 117-132. Acesso em: 20 nov. 2023.

JIANG, D.; WANG, Y.; LI, B.; SUN, C.; GUO, Z. Environmentally friendly alternative to polyester polyol by corn straw on preparation of rigid polyurethane composite. **Composites Communications**, Londres, v. 17, p. 109-114, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2019.11.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2452213919301640?via%3Dihub>. Acesso em: 29 out. 2022.

JIANG, H.; CHEN, Q.; GE, J.; ZHANG, Y. Efficient extraction and characterization of polymeric hemicelluloses from hybrid poplar. **Carbohydrate Polymers**, [S. l.], v. 101, p. 1005-1012, jan./2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.10.030>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861713010515?via%3Dihub>. Acesso em: 13 dez. 2023.

KRUPÍŇSKA, I. Aluminium Drinking Water Treatment Residuals and Their Toxic Impact on Human Health. **Molecules**, Basel, Suíça, v. 25, n. 3, 2020. [13] p. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules25030641>. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7037863/>. Acesso em: 10 mar. 2024.

KURNIAWAN, S. B.; ABDULLAH, S. R. S.; IMRON, M. F.; SAID, N. S. M. ISMAIL, N. 'I. HASAN, H. A.; OTHMAN, A. R. PURWANTI, I. F. Challenges and opportunities of biocoagulant/bioflocculant application for drinking water and wastewater treatment and its potential for sludge recovery. **Int. J. Environ. Res. Public Health**, Basel, Suíça, v. 17, n. 24, p. 9312-9344, dez./2020. (Seção Environmental Science and Engineering). DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17249312>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1660-4601/17/24/9312>. Acesso em: 09 dez. 2023.

LANDIM, A. S. **Investigação da utilização dos polímeros reciclados quimicamente poliestireno sulfonado, de copos plásticos, e hemicelulose catiônica, de palha de milho, como auxiliares de coagulação no tratamento do esgoto industrial**. 2013. 121 f. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/17511/1/Alan%20Soares.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2022.

LANDIM, A. S.; RODRIGUES FILHO, G.; SOUSA, R. M. F.; RIBEIRO, E. A. M.; SOUZA, F. R. B.; VIEIRA, J. G.; ASSUNÇÃO, R. M. N.; CERQUEIRA, D. A. Application of cationic hemicelluloses produced from corn husk as polyelectrolytes in sewage treatment. **Polímeros**, São Carlos, SP, v. 23, n. 4, p.468-472, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4322/polimeros.2013.054>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/po/a/tn8wHPBRMVP9tvGfNpXNBgJ/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 27 nov. 2023.

LIMA JÚNIOR, R.N.; ABREU, F. O. M. S. Produtos naturais utilizados como coagulantes e floculantes para tratamento de águas: uma revisão sobre benefícios e potencialidades. **Revista Virtual Química**, Niterói, RJ, v. 10, n. 3, p. 709-735, mai./jun. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20180052>. Disponível em: <https://rvq.sbq.org.br/pdf/v10n3a20>. Acesso em: 04 jan. 2024.

LIMA, P. R.; DE ALMEIDA, I. V.; VICENTINI, V. E. P. Os diferentes tipos de coagulantes naturais para o tratamento de água: uma revisão. **Evidência: biociências, saúde e inovação**, Joaçaba, v. 20, n. 1, p. 9-22, jan./jun. 2020. DOI: <https://doi.org/10.18593/eba.24704>. Disponível em: <https://periodicos.unoesc.edu.br/evidencia/article/view/24704/14834>. Acesso em: 10 jan. 2024.

MANGRICH, A. S.; DOUMER, M. E.; MALLMANN, A. S.; WOLF, C. R. Química verde no tratamento de águas: uso de coagulante derivado de tanino de *acacia mearnsii*. **Revista Virtual de Química**, Niterói, RJ, v. 6, n. 1, p. 2-15, 2014. (Química Verde). DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/1984-6835.20140002>. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/425/338>. Acesso em: 10 nov. 2023.

MESQUITA, F. O. **Aplicação de hemiceluloses catiônicas sintetizadas a partir de hemiceluloses extraídas de holoceluloses obtidas por diferentes métodos de deslignificação da palha de milho, como coagulante em tratamento de efluente de laticínio**. 2023. 60 f. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.7112>. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/41059>. Acesso em: 12 fev. 2024.

MS – Ministério da Saúde. Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 159, n. 85, p. 126-136, 07 mai. 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 12 out. 2023.

MIRANDA, R. A.; DUARTE, J. O.; GARCIA, J. C.; DURÃES, F. O. M. **Sustentabilidade da cadeia produtiva do milho**. Sete Lagoas, MG: Embrapa Milho e Sorgo, 2021, 27 p. (Documentos 261). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1132079/1/Doc-261.pdf>. Acesso em: 10 out. 2023.

MOHITE, A. S.; JAGTAP, A.; R.; AVHAD, M. S.; MORE, A. P. Recycling of major agriculture crop residues and its application in polymer industry: a review in the context of waste to energy nexus. **Energy Nexus**, [S. l.], v. 7, n. 5, p. 100134-100153, ago./2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100134>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/362792374_Recycling_of_major_agriculture_crop_residues_and_its_application_in_polymer_industry_A_Review_in_the_context_of_waste_to_energy_nexus. Acesso em: 30 out. 2022.

MONACO, P. A. V. L.; MATOS, A. T.; RIBEIRO, I. C. A.; NASCIMENTO, F. S.; SARMENTO, A. P. Utilização de extrato de sementes de moringa como agente coagulante no tratamento de água para abastecimento e águas residuárias. **Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, SP, v. 5, n. 3, p. 222-231, 2010. DOI: <https://doi:10.4136/ambi-agua.164>. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/928/92815711014.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2023.

ONU (Brasil) – NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6: Água potável e saneamento**, 2019. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6>. Acesso em: 20 nov. 2023.

ONU (Brasil) – NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 19 fev. 2024.

PACHECO, I. S. **Investigação de hemiceluloses catiônicas obtidas de cascas de amendoim como coagulante primário no tratamento físico-químico de efluente sintético de laticínio**. 2021. 174 f. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021 DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.5007>. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/34030/4/InvestigaçãoHemicelulosesCatiônicas.pdf>. Acesso em: 07 jun. 2022.

PACHECO, I. S. ALVES, A. G. T.; SANTANA, L. C.; RIBEIRO, E. A. M. CANOBRE, S. C.; AMARAL, F. A. Performance of cationic hemicelluloses arising from peanut shell residue from agroindustry in application as primary coagulant in physical-chemical treatment of dairy wastewater. **Journal of Water Process Engineering**, [S. l.], v. 47, [n. p.], jun./2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102661>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714422001040>. Acesso em: 30 out. 2023.

PAES, M. C. D.; TEIXEIRA, F. F.; MARTINS, I. S. Composição química da palha de milho com qualidade para artesanato. CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 27., 2008. Londrina, PR. **Anais [...]**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2008. Resumo Expandido. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/30082/1/Composicao-quimica.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2024.

PANDOCHI, Luciano. **Estudo do comportamento coloidal de suspensão de fibra de celulose, carbonato de cálcio, amido catiônico**: variação da força iônica e do pH. 2009. 57 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, SP, 2009. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/a35c5182-20a2-4429-8b0e-a91b9a7093eb/content>. Acesso em: 19 out. 2023.

PMU – Prefeitura Municipal de Uberlândia. Secretaria do Meio Ambiente e Sustentabilidade. **Rio Uberabinha**, 2021. Disponível em: <https://www.uberlandia.mg.gov.br/prefeitura/secretarias/meio-ambiente/rio-uberabinha/#:~:text=O%20rio%20Uberabinha%20%C3%A9%20o,pr%C3%B3ximo%20ao%20distrito%20de%20Tapuirma>. Acesso em: 06 out. 2023.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing: Viena, Áustria, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 23 nov. 2023.

REN, J. L.; SUN, R. C.; LIU, C. F.; CHAO, Z. Y.; LUO, W. Two-step preparation and thermal characterization of cationic 2-hydroxypropyltrimethylammonium chloride hemicellulose polymers from sugarcane bagasse. **Polymer Degradation and Stability**, [S. l.], v. 91, n. 11, p. 2579-2587, nov./2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.05.008>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141391006001789>. Acesso em: 27 nov. 2022.

REN, J. L.; SUN, R. C.; LIU, C. F.; LIN, L.; HE, B. H. Synthesis and characterization of novel cationic SCB hemicelluloses with a low degree of substitution. **Carbohydrate Polymers**, [S. l.], v. 67, n. 3, p. 347-357, 2007b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.06.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0144861706002803>. Acesso em: 27 nov. 2022.

REN, J. L., PENG, F., SUN R. C., LIU C. F., CAO Z. N., LUO, W., TANG, J. N. Synthesis of cationic hemicellulosic derivatives with a low degree of substitution in dimethyl sulfoxide media. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, EUA, v. 109, n. 4, p. 2111-2117, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.28256>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/app.28256>. Acesso em: 27 nov. 2022.

RESENDE, M. A. **Uso do tanino associado ao sulfato de alumínio como coagulantes para o tratamento de efluente de lavanderia industrial**. 2018. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/22069/5/UsoTaninoAssociado.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2024.

RIBEIRO, E. A. M. **Lignocelulósicos nos processos de purificação de biodiesel por via úmida utilizando flocculantes de fontes renováveis e processo de separação com membranas de celulose regenerada**. 2017. 147 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Biocombustíveis) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri; Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. DOI: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2017.105>. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/18660/1/LignocelulosicosProcessosPurificacao.pdf>. Acesso em: 11 jul. 2022.

RIBEIRO, E. A. M. **Síntese, caracterização e aplicação de membranas de acetato de celulose a partir da reciclagem da palha de milho em processo de ultrafiltração**. 2013. 79 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2013.148>. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/17389/1/Elaine%20Angelica.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2024.

RIBEIRO, E. A. M.; RODRIGUES FILHO, G.; ROZENO, N. S.; NOGUEIRA, J. M. B. A.; RESENDE, M. A.; THOMPSON JUNIOR, J. P.; VIEIRA, J. G.; CANOBRE, S. C.; AMARAL, F. A. Polymeric polyelectrolytes obtained from renewable sources for biodiesel wastewater treatment by dual-flocculation. **Express Polymer Letters**, Budapeste, Hungria, v. 11, n. 6, p. 504-517, jun./2017b. DOI: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2017.47>. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/8d7a81e86315d4773ddc74f546fd3917/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2044900>. Acesso em: 11 jul. 2022.

RIBEIRO, E. A. M.; SOUZA, F. R. B.; AMARAL, F. A.; RODRIGUES FILHO, G.; SOUSA, R. M. F.; VIEIRA, J. G.; COSTA, T. F. R.; THOMPSON JUNIOR, J. P.; ASSUNÇÃO, R. M. N.; CANOBRE, S. C. Utilization of cationic hemicelluloses, obtained from the corn husk, in association with tannin for use in wastewater treatment of industrial laundry. **Química Nova**, São Paulo, SP, v. 40, n. 1, p. 17-24, jan./2017a. DOI: <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20160147>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/TvPNHvQgbZHjYsTxB9VqLPk/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 11 jul. 2022.

ROSA, M. F.; SOUZA FILHO, M. S. M.; FIGUEIREDO, M. C. B.; MORAIS, J. P. S.; SANTAELLA, S.T., LEITÃO, R.C. Valorização de resíduos da agroindústria. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS E AGROINDUSTRIAIS, 2., Foz do Iguaçu, PR, 2011. **Anais [...]**. Brasília, DF: Embrapa, 2011, p. 98–105. (Volume 1 – Palestras). Disponível em: <https://www.sbera.org.br/2sigera/obras/p12.pdf>. Acesso em: 10 set. 2022.

ROZENO, N. S. **Investigação do uso de flocculantes de fontes renováveis para o tratamento físico-químico de efluente industrial de processamento de milho**. 2019. 77 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/29103/4/InvestigaçãoUsoDe.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2024.

SAHA, B. C. Hemicellulose bioconversion. **Journal of industrial microbiology and biotechnology**, Oxford, Inglaterra, v. 30, n. 5, p. 279-291, mai./2003. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10295-003-0049-x>. Disponível em: <https://academic.oup.com/jimb/article/30/5/279/5992143>. Acesso em: 20 nov. 2023.

SALAZAR, R. F. S.; SILVA, G. L. P.; SILVA, M. L. C. P. Estudo da composição da palha de milho para posterior utilização como suporte na preparação de compósitos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 6., Campinas, SP, 2005. **Anais [...]**. Campinas: Sitta Gráfica, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/235645089_Estudo_da_composicao_da_palha_de_milho_para_posterior_utilizacao_como_suporte_na_preparacao_de_compositos. Acesso em: 20 nov. 2023.

SANTOS, M. S. R. **Estudo de pré-tratamentos de palha e sabugo de milho visando a produção de etanol 2G**. 2014. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2014. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/bitstream/riufal/1204/1/Estudo%20de%20pré%20-%20tratamentos%20de%20palha%20e%20sabugo%20de%20milho%20visando%20a%20produção%20de%20etanol%202G.pdf>. Acesso em: 13 fev. 2024.

SCHWIKAL, K.; HEINZE, T.; EBRINGEROVÁ, A.; PETZOLD, K. Cationic Xylan Derivatives with High Degree of Functionalization. **Macromolecular Symposia**, Weinheim, Alemanha, v. 232, n. 1, p. 49-56 dez./2005. (Volume especial Hemiceluloses). DOI: <https://doi.org/10.1002/masy.200551406>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/masy.200551406>. Acesso em: 27 nov. 2023.

SILVEIRA, T. N.; BARBOSA, M. G. N.; PEQUENO, L. A. B.; SANTOS, W. B.; FERREIRA, W. B. Performance de coagulantes orgânicos e inorgânicos por meio de diagrama de coagulação em águas naturais. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, Salvador, BA, v. 7, n. 1, p. 16-25, 2019. (Edição Especial referente ao V COBESA). DOI: <https://doi.org/10.9771/gesta.v7i1.28068>. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/28068/17949>. Acesso em: 12 jan. 2023.

SMEWW. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for examination of water and wastewater**. 23 rd ed. Washington: ALPA, 2017.

SOUZA, F. R. B. **Síntese e caracterização de hemiceluloses catiônicas, a partir do reaproveitamento da palha de milho**. 2012. 53 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. DOI: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2012.289>. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/17364/1/d.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2022.

THOMPSON JÚNIOR, J. P. **Investigação da flotação por ar dissolvido no tratamento de efluente de lavanderia industrial utilizando coagulante de fonte renovável tanino**. 2013. 122 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/17398/1/InvestigacaoFlotacaoAr.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024.

TOMÉ, A. G.; RIBEIRO, E. A.M.; LIMA, M.; BROCCENSCHI, R. F.; RIBEIRO, L. N. M.; AMARAL, F. A. Biorefinery of peanut shell agroindustrial lignocellulosic waste for synthesis of a natural coagulant applied in the treatment of dairy wastewater. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S. l.], v. 11, n. 6, p. 111535-111554, dez.2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111535>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343723022741>. Acesso em: 03 jan. 2024.

VAZ JUNIOR, S. **Aproveitamento de resíduos agroindustriais: uma abordagem sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2020, 26 p. (Documentos 31). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1126255/1/S-VAZ-Aproveitamento-de-resi769duos-agroindustriais.pdf>. Acesso em: 10 set. 2022.

VIANA, L. V. M. Determinação da densidade de carga superficial de nanopartículas $Zn_xCo_{1-x}Fe_2O_4@ \gamma -Fe_2O_3$ pelo método MPC. 2016. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciência de Materiais) – Universidade de Brasília, Planaltina, DF, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.26512/2016.06.D.21550>. Disponível em: http://icts.unb.br/jspui/bitstream/10482/21550/1/2016_LaudeniraVieiraMacielViana.pdf. Acesso em: 11 dez. 2023.

VIANNA, M. **Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água**. 6. ed. Belo Horizonte: 3i Editora Ltda, 2019, 754p. (Volume 1).

VOLTAN, P. E. N. **Avaliação da ruptura e do recrescimento de flocos na eficiência de sedimentação em água com turbidez elevada**. 2007. 135 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-10072007-202831/publico/VoltanDissertacaoMestrado2007.pdf>. Acesso em: 23 out. 2023.

APÊNDICE A

Tabela 1A - Dosagem 100 ppm HC com tempo de floculação de 15 minutos e repouso de 15 minutos.....	101
Tabela 2A - Dosagem de 400 ppm HC com tempo de floculação de 15 minutos e repouso de 15 minutos.....	102
Tabela 3A- Dosagem de 1,0 ppm HC com tempo de floculação de 15 minutos e repouso de 15 minutos.....	103
Tabela 4A - Dosagem de 1,0 ppm HC com tempo de floculação de 30 minutos e repouso de 30 minutos.....	104
Tabela 5A - Água do Experimento 1** + 0,5 ppm HC com tempo de floculação de 15 minutos e repouso de 15 minutos.....	105
Tabela 6A - Água do Experimento 2*** após tempo de sedimentação de 60 minutos.....	106
Tabela 7A - Dosagem de 1,0 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos.....	107
Tabela 8A - Dosagem de 2,0 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos.....	108
Tabela 9A - Dosagem de 3,0 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos.....	109
Tabela 10A - Dosagem 4,0 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos.....	110
Tabela 11A - Dosagem de 0,5 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos.....	111
Tabela 12A - Dosagem de 0,5 a 4,0 ppm HC com pH em torno de 5,0 e tempo de floculação de 28 minutos.....	112

APÊNDICE A – TABELAS

A cor nas Tabelas deste apêndice, referem-se à cor aparente da água.

Tabela 1A - Dosagem 100 ppm HC com tempo de floculação de 15 minutos e repouso de 15 minutos

Teste com água bruta		Data: 26/07/2023		Média								
Turbidez:	4,83	4,75	4,91	4,8		250 rpm: 30 seg						
Cor:	23,50	24,10	23,50	23,7		30 rpm: 15 mim						
Experimento: Água bruta + 100 ppm HC						0 rpm: 15 mim						
Após decantar por 15 minutos												
	1 pH =	6,04	2 pH =	6,99	3 pH =	8,14	4 pH =	9,12	5 pH =	9,92	6 pH =	10,93
	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
	4,79	24,60	4,52	24,20	4,82	25,10	4,43	24,80	4,63	25,30	4,72	25,70
	4,68	24,30	4,45	23,70	4,83	25,50	4,46	25,50	4,51	25,00	4,62	25,60
	4,66	24,60	4,50	24,20	4,84	25,80	4,47	24,80	4,42	24,90	4,49	25,50
Média	4,7	24,5	4,5	24,0	4,8	25,5	4,5	25,0	4,5	25,1	4,6	25,6
%Remoção	2,5	-3,4	7,0	-1,4	0,0	-7,5	7,8	-5,6	6,4	-5,8	4,6	-8,0

Fonte: Elaborada pela pesquisadora, 2024.

Tabela 2A - Dosagem de 400 ppm HC com tempo de floculação de 15 minutos e repouso de 15 minutos

Teste com água bruta		Data: 28/07/2023		Média
Turbidez:	3,57	3,57	3,46	3,5
Cor:	21,70	21,90	22,00	21,9

250 rpm: 30 seg**30 rpm:15 mim****0 rpm: 15 mim****Experimento:** Água bruta + 400 ppm HC

Após decantar por 15 minutos

	1 pH =	6,05	2 pH =	7,06	3 pH =	8,14	4 pH =	8,94	5 pH =	9,96	6 pH =	11,03
	Turbidez	Cor										
	5,49	28,80	5,74	28,90	5,53	29,50	5,84	29,10	5,55	29,30	5,46	30,30
	5,60	29,20	5,68	29,10	5,74	29,80	5,72	30,20	5,74	28,50	5,45	30,40
	5,68	28,60	5,60	29,40	5,69	29,40	5,78	29,60	5,72	28,70	5,43	30,00
Média	5,6	28,9	5,7	29,1	5,7	29,6	5,8	29,6	5,7	28,8	5,4	30,2
%Remoção	-58,2	-32,0	-60,6	-33,2	-60,0	-35,2	-63,6	-35,5	-60,5	-31,9	-54,2	-38,3

Fonte: Elaborada pela pesquisadora, 2024.

Tabela 3A- Dosagem de 1,0 ppm HC com tempo de floculação de 15 minutos e repouso de 15 minutos

Teste com água bruta		Data: 14/09/23		Média
Turbidez:	3,98	3,99	3,93	4,0
Cor:	28,40	28,70	28,60	28,6

250 rpm: 30 seg**30 rpm: 15 mim****0 rpm: 15 mim****Experimento 1:** Água bruta + 1,0 ppm HC

Após decantar por 15 minutos

	1 pH =	5,82	2 pH =	6,94	3 pH =	7,90	4 pH =	8,91	5 pH =	9,98	6 pH =	11,04
	Turbidez	Cor										
	4,42	29,10	4,33	28,60	4,36	29,30	4,45	29,00	4,43	29,40	4,27	29,50
	4,40	29,10	4,37	28,70	4,36	29,30	4,41	29,40	4,35	29,70	4,25	29,60
	4,43	29,00	4,40	28,90	4,35	29,50	4,33	28,80	4,44	29,50	4,16	29,60
Média	4,4	29,1	4,4	28,7	4,4	29,4	4,4	29,1	4,4	29,5	4,2	29,6
%Remoção	-11,3	-1,8	-10,1	-0,6	-9,8	-2,8	-10,8	-1,8	-11,1	-3,4	-6,6	-3,5

Fonte: Elaborada pela pesquisadora, 2024.

Tabela 4A - Dosagem de 1,0 ppm HC com tempo de floculação de 30 minutos e repouso de 30 minutos

Teste com água bruta	Data: 14/09/2023			Média
Turbidez:	4,27	4,23	4,25	4,3
Cor:	28,90	28,70	28,50	28,7

250 rpm: 30 seg**30 rpm:30 mim****0 rpm: 30 mim****Experimento 1:** Água bruta + 1,0 ppm HC

Após decantar por 30 minutos

	1 pH =	6,10	2 pH =	6,98	3 pH =	7,84	4 pH =	8,83	5 pH =	9,85	6 pH =	10,93
	Turbidez	Cor										
	3,88	26,60	3,27	23,50	3,22	21,50	3,06	22,90	3,11	23,10	2,95	23,30
	3,86	26,70	3,29	22,70	3,14	23,00	3,13	22,80	2,99	23,50	2,90	23,30
	3,83	26,60	3,26	23,10	3,14	22,50	3,09	23,10	3,02	23,90	2,87	23,10
Média	3,9	26,6	3,3	23,1	3,2	22,3	3,1	22,9	3,0	23,5	2,9	23,2
%Remoção	9,3	7,2	23,0	19,5	25,5	22,2	27,2	20,1	28,5	18,1	31,6	19,0

Fonte: Elaborada pela pesquisadora, 2024.

Tabela 5A - Água do Experimento 1** + 0,5 ppm HC com tempo de floculação de 15 minutos e repouso de 15 minutos

Experimento 2: Água do experimento 1 + 0,5 ppm HC**30 rpm:15 mim**

Após decantar por mais 15 minutos (total 30 minutos)

0 rpm: 15 mim

	1 pH =	5,82	2 pH =	6,94	3 pH =	7,90	4 pH =	8,91	5 pH =	9,98	6 pH =	11,04
	Turbidez	Cor										
	4,16	26,80	3,14	21,40	3,15	22,30	3,18	18,80	2,74	20,10	2,48	19,80
	4,08	27,10	3,15	22,40	3,10	21,80	3,28	19,70	2,50	20,20	2,47	19,80
	4,13	27,60	3,30	22,80	3,13	20,30	3,18	22,10	2,76	20,60	2,52	19,80
Média	4,1	27,2	3,2	22,2	3,1	21,5	3,2	20,2	2,7	20,3	2,5	22,2
%Remoção	-3,9	4,9	19,4	22,3	21,2	24,9	19,0	29,3	32,8	28,9	37,2	22,3

Fonte: Elaborada pela pesquisadora, 2024.

Nota: ver Tabela 3A.

Tabela 6A - Água do Experimento 2*** após tempo de sedimentação de 60 minutos

Experimento 3: Água do experimento 2

Após decantar por mais 30 minutos (total 60 minutos)

0 rpm: 30 mim

	1 pH =	5,82	2 pH =	6,94	3 pH =	7,90	4 pH =	8,91	5 pH =	9,98	6 pH =	11,04
	Turbidez	Cor										
	3,95	27,20	2,91	21,90	2,50	19,40	1,63	16,10	1,59	16,20	2,29	19,70
	3,86	27,70	3,15	21,80	2,42	19,10	1,67	15,50	1,55	16,70	2,21	20,20
	3,98	27,70	3,18	22,00	2,53	19,40	1,50	15,70	1,49	16,20	2,20	20,10
Média	3,9	27,5	3,1	21,9	2,5	19,3	1,6	15,8	1,5	16,4	2,2	20,0
%Remoção	0,9	3,6	22,4	23,3	37,4	32,4	59,7	44,8	61,1	42,7	43,7	30,0

Fonte: Elaborada pela pesquisadora, 2024.

Nota: *** ver Tabela 5A

Tabela 7A - Dosagem de 1,0 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos

Teste com água bruta		Data: 04/10/2023		Média	Gr (s⁻¹)		Tempo (min)					
Turbidez:	8,53	8,47	8,45	8,5	1.000	1						
Cor Ap:	41,30	41,30	41,40	41,3	60	7						
pH:	6,53	T (°C)	26,20		45	7						
					30	7						
					20	7						
					0	20						
Experimento 1: Água bruta + 1,0 ppm HC												
Após decantar por 20 minutos												
	1 pH =	5,87	2 pH =	7,10	3 pH =	7,92	4 pH =	8,80	5 pH =	9,85	6 pH =	11,00
	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
	2,70	18,30	3,61	21,70	4,89	25,80	4,97	30,40	5,66	33,70	3,86	28,50
	2,58	16,40	3,59	22,30	5,12	26,40	5,01	30,20	5,78	33,70	3,45	27,50
	2,52	17,50	3,62	22,60	5,24	25,40	5,10	30,60	5,68	33,20	3,56	27,40
Média	2,6	17,4	3,6	22,2	5,1	25,9	5,0	30,4	5,7	33,5	3,6	27,8
%Remoção	69,4	57,9	57,5	46,3	40,1	37,4	40,7	26,5	32,7	18,9	57,3	32,7
Experimento 2: Água do experimento 1 após decantar por mais 10 minutos												
	1 pH =	5,87	2 pH =	7,10	3 pH =	7,92	4 pH =	8,80	5 pH =	9,85	6 pH =	11,00
	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
	2,50	16,60	3,12	20,30	3,66	23,80	4,57	28,50	5,19	31,90	3,71	24,90
	2,46	18,10	3,17	20,70	3,76	22,50	4,80	28,80	5,16	31,00	3,42	24,50
	2,53	16,50	3,00	20,70	3,74	22,90	4,58	28,80	5,20	31,20	3,83	25,10
Média	2,5	16,6	3,1	20,7	3,7	22,9	4,6	28,8	5,2	31,2	3,7	24,9
%Remoção	70,5	59,8	63,2	49,9	55,9	44,6	46,0	30,3	38,8	24,5	56,3	39,8

Fonte: Elaborada pela pesquisadora, 2024.

Tabela 8A - Dosagem de 2,0 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos

Teste com água bruta		Data: 04/10/2023		Média		Gr (s⁻¹)		Tempo (min)				
Turbidez:	8,61	8,61	8,60	8,6		1.000	1					
Cor Ap:	40,70	40,90	41,00	40,9		60	7					
pH:	6,50	T (°C)	26,20			45	7					
						30	7					
						20	7					
Experimento 1: Água bruta + 2,0 ppm HC						0	20					
Após decantar por 20 minutos												
	1 pH =	6,04	2 pH =	7,25	3 pH =	8,08	4 pH =	8,96	5 pH =	9,94	6 pH =	10,80
	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
	2,48	16,50	1,90	15,00	2,55	16,60	2,35	19,40	2,33	17,70	1,61	19,50
	2,18	15,80	1,80	15,20	2,22	15,90	2,36	18,20	2,61	18,60	1,72	20,00
	2,24	15,60	1,85	16,50	2,36	15,20	2,22	18,30	2,49	18,30	1,64	19,40
Média	2,3	16,0	1,9	15,6	2,4	15,9	2,3	18,6	2,5	18,2	1,7	19,6
%Remoção	73,3	60,9	78,5	61,9	72,4	61,1	73,2	54,4	71,2	55,5	80,8	52,0
Experimento 2: Água do experimento 1												
Após decantar por mais 10 min												
	1 pH =	6,04	2 pH =	7,25	3 pH =	8,08	4 pH =	8,96	5 pH =	9,94	6 pH =	10,80
	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
	1,65	13,30	1,37	14,30	1,26	14,00	2,38	17,20	1,64	15,10	3,72	17,90
	1,54	14,70	1,33	13,40	1,51	15,10	2,36	17,50	1,51	15,80	3,51	18,30
	1,49	13,40	1,20	12,60	1,76	14,70	1,95	17,90	1,72	16,50	3,45	18,10
Média	1,5	13,4	1,3	13,4	1,5	14,7	2,4	17,5	1,6	15,8	3,5	18,1
%Remoção	82,1	67,2	84,5	67,2	82,5	64,0	72,6	57,2	80,9	61,3	59,2	55,7

Fonte: Elaborada pela pesquisadora, 2024.

Tabela 9A - Dosagem de 3,0 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos

Teste com água bruta		Data: 04/10/2023		Média		Gr (s⁻¹)		Tempo (min)				
Turbidez:	8,52	8,54	8,51	8,5		1.000	1					
Cor Ap:	40,50	40,60	40,50	40,5		60	7					
pH:	6,45	T (°C)	26,10			45	7					
						30	7					
Experimento 1: Água bruta +3,0 ppm HC						20	7					
Após decantar por 20 minutos						0	20					
	1 pH =	6,05	2 pH =	7,22	3 pH =	8,19	4 pH =	9,16	5 pH =	10,06	6 pH =	11,12
	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
	2,98	22,20	1,63	16,20	1,51	15,10	0,80	14,10	0,92	15,10	1,48	17,60
	2,63	20,00	1,88	15,80	1,57	14,30	0,92	13,80	0,91	13,80	1,43	18,50
	2,85	21,70	1,83	16,90	1,42	14,50	1,05	13,10	0,81	14,40	1,37	18,30
Média	2,8	21,3	1,8	16,3	1,5	14,6	0,9	13,7	0,9	14,4	1,4	18,1
%Remoção	66,9	47,5	79,1	59,8	82,4	63,9	89,2	66,3	89,7	64,4	83,3	55,3
Experimento 2: Água do experimento 1												
Após decantar por mais 10 min												
	1 pH =	6,05	2 pH =	7,22	3 pH =	8,19	4 pH =	9,16	5 pH =	10,06	83,30	11,12
	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
	2,38	17,00	1,30	13,70	1,20	15,20	0,88	13,90	1,25	16,20	1,11	17,60
	2,57	17,10	1,38	14,60	0,93	15,30	0,94	13,70	1,04	15,10	1,17	16,20
	2,47	18,30	1,30	14,20	1,00	15,20	0,84	14,60	1,11	15,20	1,18	17,10
Média	2,5	17,5	1,3	14,2	1,0	15,2	0,9	14,1	1,1	15,5	1,2	17,0
%Remoção	71,0	56,9	84,4	65,0	87,8	62,4	89,6	65,3	86,7	61,8	86,5	58,1

Fonte: Elaborada pela pesquisadora, 2024.

Tabela 10A - Dosagem 4,0 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos

Teste com água bruta		Data: 04/10/2023		Média	Gr (s⁻¹)		Tempo (min)					
Turbidez:	8,50	8,55	8,58	8,5	1.000		1					
Cor Ap:	40,80	40,70	40,50	40,7	60		7					
pH:	6,49	T (°C)	26,50		45		7					
					30		7					
					20		7					
					0		20					
Experimento 1: Água bruta + 4,0 ppm HC												
Após decantar por 20 minutos												
	1 pH =	6,00	2 pH =	7,26	3 pH =	8,01	4 pH =	8,86	5 pH =	9,80	6 pH =	10,99
	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
	5,58	28,90	2,05	17,80	1,63	15,60	1,34	16,60	1,35	18,60	1,35	16,90
	5,79	27,70	2,04	16,70	1,55	16,30	1,41	14,70	1,50	17,40	1,39	16,30
	5,57	28,80	1,90	17,10	1,65	15,80	1,55	14,50	1,41	17,30	1,35	17,00
Média	5,6	28,5	2,0	17,2	1,6	15,9	1,4	15,3	1,4	17,8	1,4	16,7
%Remoção	33,9	30,0	76,6	57,7	81,2	60,9	83,2	62,5	83,4	56,3	84,0	58,9
Experimento 2: Água do experimento 1 após decantar por mais 10 minutos												
	1 pH =	6,00	2 pH =	7,26	3 pH =	8,01	4 pH =	8,86	5 pH =	9,80	6 pH =	10,99
	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
	4,81	26,80	1,65	15,90	1,42	15,20	1,30	14,20	1,17	14,50	1,23	15,80
	4,67	27,30	1,72	15,90	1,54	15,10	1,08	14,70	1,11	15,40	1,31	17,30
	4,86	26,60	1,74	16,50	1,49	14,50	1,17	15,80	1,07	14,50	1,28	16,70
Média	4,8	26,8	1,7	15,9	1,5	15,1	1,2	14,7	1,1	14,5	1,3	16,7
%Remoção	43,7	34,1	79,9	60,9	82,6	62,9	86,3	63,9	87,0	64,3	85,0	58,9

Fonte: Elaborada pela pesquisadora, 2024.

Tabela 11A - Dosagem de 0,5 ppm HC com tempo de floculação de 28 minutos

Teste com água bruta		Data: 06/10/2023		Média		Gr (s⁻¹)		Tempo (min)					
Turbidez:	8,50	8,37	8,41	8,4		1.000	1						
Cor Ap:	40,80	39,50	40,50	40,3		60	7						
pH:	6,53	T (°C)	26,10			45	7						
						30	7						
Experimento 1: Água bruta + 0,5 ppm HC						20	7						
Após decantar por 20 minutos						0	20						
	1 pH =	6,00	2 pH =	7,05	3 pH =	8,12	4 pH =	9,13	5 pH =	10,08	6 pH =	11,15	
	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	
	3,99	23,40	5,77	31,50	7,49	37,50	6,96	35,20	7,81	40,00	7,03	38,90	
	3,92	22,60	6,00	32,30	7,46	36,00	7,03	35,70	7,65	40,50	6,95	38,70	
	4,16	23,70	5,61	31,70	7,32	36,10	6,98	34,40	7,63	39,80	6,90	38,91	
Média	4,0	23,2	5,8	31,8	7,4	36,5	7,0	35,1	7,7	40,1	7,0	38,8	
%Remoção	52,3	42,3	31,3	20,9	11,9	9,3	17,0	12,8	8,7	0,4	17,4	3,6	
Experimento 2: Água do experimento 1													
Após decantar por mais 10 min													
	1 pH =	6,00	2 pH =	7,05	3 pH =	8,12	4 pH =	9,13	5 pH =	10,08	6 pH =	11,15	
	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	
	3,54	22,50	4,56	27,30	6,71	35,90	6,54	34,90	7,11	39,10	6,83	38,90	
	3,46	22,60	4,59	26,50	6,75	35,40	6,57	35,00	7,28	38,90	6,79	38,30	
	3,56	23,30	4,40	27,60	6,85	35,50	6,50	35,70	7,24	38,80	6,89	38,10	
Média	3,5	22,6	4,6	27,3	6,8	35,5	6,5	35,0	7,2	38,9	6,8	38,3	
%Remoção	58,0	43,9	45,9	32,2	19,9	11,8	22,4	13,1	14,1	3,4	18,9	4,9	

Fonte: Elaborada pela pesquisadora, 2024.

Tabela 12A - Dosagem de 0,5 a 4,0 ppm HC com pH em torno de 5,0 e tempo de floculação de 28 minutos

Teste com água bruta		Data: 06/10/2023		Média	Gr (s⁻¹)	Tempo (min)				
Turbidez:	8,47	8,35	8,39	8,4	1.000	1				
Cor Ap:	40,50	39,80	40,70	40,3	60	7				
pH:	6,53	T (°C)	26,10		45	7				
					30	7				
					20	7				
					0	20				
Experimento 1: Água bruta + x ppm HC										
Após decantar por 20 minutos										
	Dosagem	0,5	Dosagem	1,0	Dosagem	2,0	Dosagem	3,0	Dosagem	4,0
	1 pH =	5,04	2 pH =	5,05	3 pH =	5,03	4 pH =	5,14	5 pH =	5,07
	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
	2,89	18,40	2,68	16,60	3,60	23,30	7,03	37,20	8,08	39,30
	2,67	19,70	2,79	16,50	3,63	22,60	7,19	36,80	7,96	39,50
	3,05	20,10	2,66	15,40	3,72	22,10	6,98	36,70	8,02	39,70
Média	2,9	19,4	2,7	16,2	3,7	22,7	7,1	36,9	8,0	39,5
%Remoção	65,8	51,9	67,8	59,9	56,6	43,8	15,9	8,5	4,6	2,1
Experimento 2: Água do experimento 1										
Após decantar por mais 10 minutos										
	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
	2,41	18,30	3,00	15,70	3,26	21,00	6,72	34,20	7,66	36,60
	2,38	18,60	2,65	16,10	3,20	21,80	6,56	33,70	7,51	36,90
	2,46	19,00	2,94	16,50	3,23	21,60	6,67	33,30	7,51	36,90
Média	2,4	18,6	2,9	16,1	3,2	21,6	6,7	33,7	7,5	36,9
%Remoção	71,3	53,9	65,0	60,1	61,6	46,4	20,6	16,4	10,6	8,5

Fonte: Elaborada pela pesquisadora, 2024.