

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

JANAÍNA SILVA DE MATTOS

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE FÓSFORO DE ESGOTO SANITÁRIO
UTILIZANDO *Cereus jamacaru*

PORTO ALEGRE

2019

JANAÍNA SILVA DE MATTOS

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE FÓSFORO DE ESGOTO SANITÁRIO
UTILIZANDO *Cereus jamacaru*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Orientador: Dieter Wartchow

PORTO ALEGRE

2019

CIP - Catalogação na Publicação

Silva de Mattos, Janaína
Avaliação da eficiência de remoção de fósforo de
esgoto sanitário utilizando Cereus jamacaru / Janaína
Silva de Mattos. -- 2019.
71 f.
Orientador: Dieter Wartchow.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. Cereus jamacaru. 2. Mandacaru. 3. Coagulação. 4.
Fósforo. 5. Esgoto sanitário. I. Wartchow, Dieter,
orient. II. Título.

JANAÍNA SILVA DE MATTOS
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE FÓSFORO DE ESGOTO SANITÁRIO
UTILIZANDO *Cereus jamacaru*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de mestre.

Aprovado em: Porto Alegre, 13 de setembro de 2019.

Prof. Dr Dieter Wartchow – UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Antônio Domingues Benetti – UFRGS
Examinador

Prof^a. Dr^a. Lúcia Helena Ribeiro Rodrigues – UFRGS
Examinador

Prof^a. Dr^a. Viviane Trevisan – UDESC
Examinador

Dedico este trabalho a minha família que me incentiva, apoia e acolhe, aos meus amigos que estiverem ao meu lado e me ajudaram da melhor forma que puderam e foram essenciais, ao meu amado e paciente companheiro Diego.

AGRADECIMENTOS

E chega ao fim mais um capítulo da história da minha vida. Sinceramente, por razões diversas e apesar de não me sentir confortável, pensei em não finalizar este capítulo, mas eu não escrevo a minha história sozinha. Eu conto com muitos colaboradores e sou grata a todos eles que não deixaram eu desistir e me auxiliaram a seguir.

Agradeço a colega Regina Cadore (aquela conversa informal no “branquinho” mudou tudo) e ao professor Juan Martin Bravo, que me incentivaram a seguir.

Agradeço ao professor Dieter Wartchow, meu orientador, que me acompanha desde a graduação. Obrigada professor pelas oportunidades, pelo apoio, pela paciência e me atrevo a dizer pela amizade.

À minha amiga Alice Maestri agradeço não somente pela ajuda no laboratório e pelo cafezinho e chimarrão que levava tão gentilmente para mim naqueles dias frios (que aqueciam o meu coração), mas também por nossa parceria nestes últimos quatro anos. Também agradeço ao meu amigo Felipe Teske. Que trio!

Agradeço ao meu colega Carlos Fagundes sempre tão atencioso, disponível e prestativo. Obrigada amigo pelo trabalho e pela agradável companhia.

Agradeço a toda equipe do LADETEC/IPH, em especial ao Loudi Lauer Albornoz, Jéssica Sindiana Pletsch, Mara e Vera Regina Cougo de Freitas. Obrigada por todo apoio, disponibilidade e atenção.

Agradeço a toda minha família, aos que ainda estão aqui e aos que já partiram, em especial a minha mãe Vera Lúcia Ferreira da Silva, aos meus avós (*in memoriam*) Adão Ferreira da Silva, Antônia da Silva Ferreira e Vanir da Conceição Rosa de Mattos, aos meus irmãos Lauren Silva Costa e Giovani Silva de Mattos e aos meus tios Maria Helena, Jussara e Júlio César.

Agradeço ao meu amado e paciencioso companheiro Diego Dias (acabou amor), aos meus sogros e a minha cunhada (valeu pelos lanchinhos, carinhos e orações) e a minha amiga de todas as horas Daiane Silva da Cruz.

A gratidão é a maior medida do caráter de uma pessoa. Uma pessoa grata é uma pessoa fiel, não te abandona, está sempre contigo. Nela você pode sempre confiar.
Augusto Branco

RESUMO

O uso de sais inorgânico e de polímeros sintéticos como coagulante no tratamento de efluentes líquidos pode causar danos ambientais. Os polímeros naturais, apesar de serem menos eficientes, causam menor impacto ambiental e a matéria-prima pode ser mais facilmente obtida. Algumas pesquisas foram realizadas utilizando o cacto *Cereus jamacaru* (mandacaru), espécie nativa do Brasil, e foram registrados bons resultados na remoção da turbidez da água. As plantas da família das cactáceas contém ácido galacturônico que geralmente é um agente coagulante e um dos constituintes principais da pectina. Considerando a presença de pectina no mandacaru, foi testada a eficiência dele como coagulante principal no processo de remoção de fósforo de esgoto sanitário. Para extrair esse polímero, foram utilizados quatro métodos (M1, M2, M3 e M4), que resultaram em quatro soluções coagulantes (S1, S2, S3 e S4). Para testar a eficiência das soluções coagulantes foram realizados teste de jarros utilizando amostras de esgoto bruto para as quais foram determinados previamente os seguintes parâmetros: pH, temperatura, turbidez e fósforo total. Ao fim de cada ensaio foram determinados novamente os valores de pH, temperatura, turbidez e fósforo total do líquido sobrenadante. Utilizando água deionizada e as soluções coagulantes, também foram realizados testes para verificar se as soluções agregariam fósforo ao efluente em tratamento. A eficiência média da solução coagulante S3 e S4 para remover a turbidez do esgoto sanitário bruto foi negativa (respectivamente -1.42% e -3.72%); porém, apesar de baixa, a eficiência média da solução S1 e S2 (respectivamente 0.73% e 0.76%) foi positiva, o que não a qualifica para ser utilizada como coagulante principal, mas pode vir a ser utilizada como coagulante auxiliar. O coagulante de *Cereus jamacau*, além de não ser eficiente na remoção de fósforo do esgoto sanitário, agregou fósforo nas amostras testadas. O acréscimo de fósforo é atribuído a liberação de fósforo presente na planta durante o processo de extração da pectina.

Palavras-chave: *Cereus jamacaru*. Mandacaru. Coagulação. Fósforo. Esgoto sanitário.

ABSTRACT

The use of inorganic salts and synthetic polymers as coagulants in wastewater treatment may cause environmental damage. Although natural polymers are less efficient, they have less environmental impact and the raw material can be more easily obtained. Some research was carried out using the *Cereus jamacaru* (mandacaru) cactus, native species from Brazil, and good results have been reported in the removal of water turbidity. Cactaceae plants contain galacturonic acid which is generally a coagulant and one of the major constituents of pectin. Considering the presence of pectin in mandacaru, its efficiency was tested as the main coagulant in the sanitary sewage phosphorus removal process. To extract this polymer, four methods (M1, M2, M3 and M4) were used, which resulted in four coagulant solutions (S1, S2, S3 and S4). To test the efficiency of coagulant solutions, jar tests were performed using raw sewage samples for which the following parameters were previously determined: pH, temperature, turbidity and total phosphorus. At the end of each test the pH, temperature, turbidity and total phosphorus values of the supernatant liquid were determined again. Using deionized water and coagulant solutions, tests were also performed to verify if the solutions would add phosphorus to the effluent under treatment. The average efficiency of coagulant solution S3 and S4 to remove turbidity from the raw sewage was negative (-1.42% and -3.72% respectively); However, although low, the average efficiency of solution S1 and S2 (0.73% and 0.76% respectively) was positive, which does not qualify it to be used as the main coagulant, but may be used as an auxiliary coagulant. The *Cereus jamacaru* coagulant, besides not being efficient in the removal of phosphorus from the sanitary sewage, added phosphorus in the tested samples. Phosphorus addition is attributed to the release of phosphorus present in the plant during the pectin extraction process.

Keywords: *Cereus jamacaru*. Mandacaru. Coagulation. Phosphorus. Sanitary sewage.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3-1 - Modelo da camada dupla elétrica de Stern.....	28
Figura 3-2 - Estrutura da parede celular vegetal.....	32
Figura 3-3 - Configuração real e estrutura do ácido α -D-galacturônico	32
Figura 3-4 - Estrutura do ácido poligalacturônico.....	33
Figura 3-5 - Estrutura das substâncias pécnicas: (a) Pectina de alto teor de metoxila; (b) Pectina de baixo teor de metoxila	34
Figura 3-6 - Esquema de formação de pontes entre partículas com polímeros orgânicos	36
Figura 3-7 - Cactaceae. Relações filogenéticas presumidas dentro da família, o tamanho e disposição dos compartimentos refletindo o número de espécies e relações dos grupos.....	38
Figura 3-8 -Planta de mandacaru (<i>Cereus jamacaru</i>) com espinhos (A) e sem espinhos (B).....	40
Figura 4-1 - Processos do experimento.....	43
Figura 4-2 - Etapas para obtenção das soluções coagulante	45
Figura 4-3 - Cacto <i>Cereus jamacaru</i> sem espinho utilizado no experimento	46
Figura 4-4 - Corte (A) e (B) e limpeza dos cladódios (C).....	47
Figura 4-5 - Trituração.....	48
Figura 4-6 - Processo de agitação da solução	49
Figura 4-7 - Solução em processo de filtração	50
Figura 4-8 - Equipamento de Jar Test preparado para o ensaio.....	51
Figura 4-9 - Amostras de esgoto coletadas após o ensaio que utilizou sulfato de alumínio como coagulante principal.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Concentração de fósforo e nitrogênio amoniacal permitida nos efluentes líquidos sanitários	24
Tabela 5-1 - Valores medidos de Turbidez.....	55
Tabela 5-2 - Valores medidos de fósforo total.....	55
Tabela 5-3 - Percentual de remoção de turbidez utilizando a solução S1 como coagulante	56
Tabela 5-4 - Percentual de remoção de turbidez utilizando a solução S2 como coagulante	56
Tabela 5-5 - Percentual de remoção de turbidez utilizando a solução S3 como coagulante	56
Tabela 5-6 - Percentual de remoção de turbidez utilizando a solução S4 como coagulante	56
Tabela 5-7 - Eficiência de remoção de turbidez de água bruta.....	57
Tabela 5-8 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S1 (turbidez)	58
Tabela 5-9 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S2 (turbidez)	58
Tabela 5-10 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S3 (turbidez)	58
Tabela 5-11 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S4 (turbidez)	58
Tabela 5-12 - Experimento em blocos ao acaso com repetições (turbidez)	59
Tabela 5-13 - ANOVA em blocos ao acaso com repetições (turbidez).....	59
Tabela 5-14 - Valores medidos de Turbidez.....	60
Tabela 5-15 - Percentual de remoção de turbidez utilizando sulfato de alumínio como coagulante ..	60
Tabela 5-16 - Percentual de remoção de fósforo total utilizando a solução S1 como coagulante.....	61
Tabela 5-17 - Percentual de remoção de fósforo total utilizando a solução S2 como coagulante.....	61
Tabela 5-18 - Percentual de remoção de fósforo total utilizando a solução S3 como coagulante.....	61
Tabela 5-19 - Percentual de remoção de fósforo total utilizando a solução S4 como coagulante.....	62
Tabela 5-20 - Valores medidos de fósforo total.....	62
Tabela 5-21 - Valores medidos de fósforo total.....	62
Tabela 5-22 - Percentual de remoção de fósforo total utilizando sulfato de alumínio como coagulante	63
Tabela 5-23 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S1 (fósforo total)	63
Tabela 5-24 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S2 (fósforo total)	63
Tabela 5-25 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S3 (fósforo total)	63
Tabela 5-26 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S4 (fósforo total)	63
Tabela 5-27 - Experimento em blocos ao acaso com repetições (fósforo total)	64
Tabela 5-28 - ANOVA em blocos ao acaso com repetições (fósforo total)	64
Tabela 5-29 - pH do esgoto após o ensaio com o Jar Test	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 3-1 - Substância pécticas.....	31
Quadro 3-2 - Exemplos de pesquisas científicas.....	35
Quadro 4-1 - Operações realizadas na hidrólise do polímero	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

CDTA - ÁCIDO CICLO-HEXANODIAMINOTETRAACÉTICO

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE

CONSEMA – CONSELHO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE

DNA – ÁCIDO DESOXIRRIBONUCLEICOS

EDTA - ETILENODIAMINOTETRACÉTICO

IPH – INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

LADETEC – LABORATÓRIO DE APOIO AO DESENVOLVIMENTO
TECNOLÓGICO

RNA – ÁCIDO RIBONUCLEICOS

UFRGS – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

SUMÁRIO

1	Introdução	16
2	Objetivos	19
2.1	Objetivo geral	19
2.2	Objetivos específicos.....	19
3	Revisão bibliográfica	20
3.1	O fósforo.....	20
3.1.1	Fósforo no esgoto sanitário	21
3.1.2	Eutrofização.....	23
3.1.3	Remoção de fósforo do esgoto sanitário	24
3.1.4	Remoção química de fósforo do esgoto sanitário	25
3.2	Precipitação química	25
3.2.1	Coloides	26
3.2.2	Estabilidade dos coloides	26
3.2.3	Coagulantes e floculantes	28
3.2.3.1	Sais de Metais.....	29
3.2.3.2	Polímeros.....	29
3.3	Pectina.....	30
3.3.1	Uso de polímeros vegetais como coagulante ou floculante	35
3.4	<i>Cereus jamacaru</i> (mandacaru)	38
3.4.1	Uso de mandacaru como coagulante e como floculante.....	40
4	Materias e métodos	43
4.1	Extração do polímero coagulante	43
4.1.1	Limpeza	45
4.1.2	Trituração	47
4.1.3	Extração.....	48
4.1.4	Filtração.....	49
4.2	Teste de jarros.....	50
4.3	Análises físico-químicas.....	52
4.3.1	pH e temperatura.....	52
4.3.2	Turbidez.....	53
4.3.3	Fósforo total.....	53
4.4	Análise estatística.....	53
4.4.1	Experimentos inteiramente ao acaso com igual número de repetições	54
4.4.2	Experimentos em blocos ao acaso com repetição.....	54
5	Resultados e discussões	55

6	Conclusões.....	66
7	Referências bibliográficas	67

1 INTRODUÇÃO

Os efluentes líquidos gerados pelas atividades humanas (esgotos domésticos e esgotos industriais) têm o poder de deteriorar a qualidade dos corpos d'água receptores (DEZOTTI, 2008, p. 53). Entre os principais constituintes do esgoto que podem deteriorar a qualidade dos corpos d'água temos os sólidos suspensos, os orgânicos biodegradáveis, os patogênicos, os poluentes prioritários, os orgânicos refratários, os metais pesados, os orgânicos dissolvidos e os nutrientes (METCALF; EDDY, 2016, p. 63).

Nutrientes ou bioestimulantes, como são conhecidos os elementos nitrogênio e fósforo, são essenciais para o crescimento de microrganismos, plantas e animais (METCALF; EDDY, 2016, p. 92). Todavia, segundo Braga; Hespanhol; Conejo *et al.* (2005, p. 85), “o excesso de nutrientes nos corpos d'água pode levar ao crescimento excessivo de alguns organismos aquáticos, acarretando prejuízo a determinados usos dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos”.

“O fósforo é essencial para o crescimento de organismos e pode ser o nutriente que limita a produtividade primária de um corpo de água” APHA, AWWA, WEF (1998). Em águas limpas e cristalinas, segundo Bratby (2006, p. 120), as concentrações de fósforo são geralmente muito baixas. No entanto, os influxos de fósforo nos rios e lagos, por exemplo por meio de águas residuárias, podem estimular artificialmente a produção dos habitats aquáticos, que podem perturbar o equilíbrio do ecossistema e alterar a qualidade desses habitats (RICKLEFS, 2010, p. 441). O fósforo contido no esgoto pode ser tanto incorporado em sólidos biológicos (remoção biológica) como ser removido com adição de produtos químicos (remoção química) (METCALF; EDDY, 2016, p. 466).

A remoção química do fósforo do esgoto é realizada através do processo de precipitação química que envolve a adição de produtos químicos que modificam o estado físico de sólidos dissolvidos e suspensos e facilitam a remoção por sedimentação ou por filtração. No processo de remoção química do fósforo de correntes líquidas, os principais produtos utilizados como coagulante são os sais de metais, a cal hidratada e os polímeros naturais ou sintéticos (utilizados efetivamente em conjunto com sais de metais e cal hidratada como auxiliares de floculação) (METCALF; EDDY, 2016, p. 459-466).

O uso de sais inorgânicos (baseados em alumínio e baseado em ferro) como coagulante é popular devido a sua eficácia, disponibilidade e custo relativamente baixo (BRATBY, 2006, p. 32). Todavia, os coagulantes de sais inorgânicos têm suas deficiências como a toxicidade e a geração de grandes volumes de lodo (VIJAYARAGHAVAN; SIVAKUMAR; KUMAR, 2011).

Em relação ao uso dos polímeros sintéticos como floculante, apesar de ser mais eficiente do que os polímeros naturais, há ressalvas devido à presença de contaminantes que podem surgir de monômeros residuais e produtos químicos, usados para produzir as unidades de monômeros, que não reagiram ou de subprodutos da reação dos polímeros na água (BRATBY, 2006, p. 67). A presença de monômeros residuais é indesejável devido a sua neurotoxicidade e fortes propriedades carcinogênicas (VIJAYARAGHAVAN; SIVAKUMAR; KUMAR, 2011).

Já os polímeros naturais, em geral, têm como vantagens serem praticamente livres de toxicidade; serem biodegradáveis; terem, geralmente, matéria-prima disponível localmente (BRATBY, 2006, p. 50). Além dessas vantagens, Narasiah; Vogel; Kramadhai (2002), quando utilizaram sementes de *Moringa oleifera* de Burundi como coagulante e floculante, obtiveram aproximadamente 30% do volume de lodo que é produzido quando é utilizado coagulantes convencionais como o alumínio.

Choy; Prasad; Wu *et al.* (2014) identificaram e apresentaram uma pesquisa resumida de vinte e um coagulantes naturais, para remoção da turbidez da água, provenientes de resíduos de frutas e de outros (cactos, cereais, fungos, nozes, arbustos e especiarias).

No Brasil, alguns pesquisadores avaliaram a eficiência do cacto *Cereus jamacaru* (mandacaru) como coagulante natural para remover a turbidez da água. Zara; Thomazini; Lenz (2012) testaram o *Cereus jamacaru* como auxiliar do sulfato de alumínio nos processos de coagulação e floculação para remoção de turbidez da água e observaram que o percentual de remoção de turbidez utilizando os polímeros, associado ao sulfato de alumínio foi superior ao percentual obtido quando foi utilizado somente o sal. Ostrowski (2014) testou a eficiência do *Cereus jamacaru* como coagulante auxiliar associado ao sulfato de alumínio na remoção de turbidez sintética da água e observou que quando utilizou o extrato do cacto com solução ácida, básica e salina obteve respectivamente redução de turbidez na ordem de 2,27; 2,01 e 1,6 vezes mais quando comparados ao teste utilizando apenas o sulfato de alumínio. Melo (2017) analisou a eficiência do *Cereus jamacaru* como coagulante principal e como

coagulante auxiliar associado ao sulfato de alumínio na remoção dos parâmetros turbidez, cor aparente e série de sólidos da água oriunda de um sistema lântico. Melo (2017) concluiu que utilizando extrato orgânico do *Cereus jamacaru* como coagulante alternativo ou como auxiliar do sulfato de alumínio pós-filtração direta pode-se obter água clarificada. A mucilagem das plantas da família das cactáceas consiste em ácido galacturônico, independente das espécies, e geralmente é o agente de coagulação ativo predominante segundo Choy; Prasad; Wu *et al.* (2014). A ocorrência mais importante do ácido galacturônico está na substância péctica e as melhores fontes são os ácidos pectínicos e os pécticos (KERTESZ, 1951, p. 14).

Vistos os possíveis problemas ambientais decorrentes do uso de coagulantes a base de sais inorgânico (toxicidade e geração de grandes volumes de lodo) ou a base de polímeros sintéticos (neurotoxicidade e propriedades carcinogênica) e levando em consideração os bons resultados obtidos por Zara; Thomazini; Lenz (2012), Ostrowski (2014) e Melo (2017) com o *Cereus jamacaru* como coagulante natural na remoção da turbidez da água, o objetivo deste estudo experimental é verificar se esse cacto é eficiente na remoção de fósforo do esgoto sanitário e se o uso seria uma alternativa sustentável e economicamente viável. Assim, considerando a hipótese da presença de pectina nos cladódios do *Cereus jamacaru*, foram definidos quatro métodos para extração desse polímero natural e realizados testes de jarros com cada um dos extratos a fim de testar a eficiência dele como coagulante principal no processo de remoção de fósforo de esgoto doméstico.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Verificar a eficiência de remoção de fósforo de esgoto sanitário utilizando como coagulante natural os cladódios do *Cereus jamacaru*.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Extrair o polímero coagulante do *Cereus jamacaru* e determinar o método mais eficiente de extração.
- Comparar a eficiência entre o coagulante natural extraído do *Cereus jamacaru* e o coagulante de sulfato de alumínio na remoção de fósforo de esgoto sanitário.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O FÓSFORO

O fósforo é um mineral que se apresenta abundantemente distribuído no globo terrestre (ocorre sob a única forma estável, como íon ortofosfato $(\text{PO}_4)^{3-}$, com oxidação mais estável, o “pentavalente”), através de seus diversos compostos, mais comumente na forma de sais, denominados fosfatos, sendo esses compostos muito ativos, mesmo a baixas temperaturas, propriedade que faz o elemento não ser encontrado livre na natureza (DNPM, 2009, p. 546). O fósforo é crucial para a fotossíntese (meio de produção de energia de muitos seres autotróficos) e para a reprodução (é constituinte dos ácidos ribonucleicos (RNA) e desoxirribonucleicos (DNA)) além de participar ativamente do processo de crescimento e sustentação corporal dos vegetais e animais, não tem sucedâneo e nem reposição para ele (DNPM, 2009, p. 546).

O ciclo do fósforo é do tipo sedimentar, sendo o seu grande reservatório a litosfera, mais precisamente as rochas fosfatadas e alguns depósitos formados ao longo de milênios. Por meio de processos erosivos, ocorre a liberação do fósforo na forma de fosfatos, que serão utilizados pelos produtores (BRAGA; HESPANHOL; CONEJO *et al.*, 2005, p. 31). Importante ressaltar que o fósforo não entra na atmosfera sob qualquer forma que não seja poeira, por isso circula pouco entre a atmosfera e outros compartimentos dos ecossistemas. Do ponto de vista de estrutura trófica, um ecossistema possui dois estratos: o primeiro é o autótrofo, do qual fazem parte os produtores, onde predominam a fixação de energia luminosa, a utilização de substâncias inorgânicas simples, a síntese de substâncias orgânicas complexas; o segundo estrato é o heterótrofo, que utiliza, rearranja e decompõe os materiais complexos e é constituído pelos organismos consumidores e decompositores (CALIJURI; CUNHA, 2013). Os produtores assimilam o fósforo do solo ou da água na forma de fosfato e o incorporam diretamente em seus vários compostos orgânicos; por sua vez, os consumidores eliminam o excesso de fósforo excretando íons fosfatos na urina no caso dos animais, ou convertendo o fósforo dos detritos em íons fosfatos no caso das bactérias fosfatadoras (RICKLEFS, 2010, p. 441).

Parte do fósforo liberado em forma de fosfatos nos processos erosivos é carregado para os oceanos, onde se perde em depósitos a grandes profundidades, ou é consumida pelo fitoplâncton. Em decorrência de movimentos tectônicos, existe a possibilidade de que levantamentos geológicos tragam de volta o fósforo perdido para os depósitos de sedimentos profundos no oceano, e, por meio da reciclagem, o fósforo (em compostos orgânicos) é quebrado pelos decompositores e transformado em fosfatos, sendo novamente utilizado pelos produtores (BRAGA; HESPANHOL; CONEJO *et al.*, 2005, p. 31-32).

O minério de fósforo é a principal fonte de fósforo para as práticas agrícolas modernas (METCALF; EDDY, 2016, p. 1642). Segundo Cordell; Drangert; White (2009), as reservas globais atuais de rocha fosfática podem se esgotar em 50 a 100 anos. Já Van Kauwenbergh; Stewart; Mikkelsen (2013) fizeram um cálculo da longevidade da reserva de rocha fosfática usando números atuais de reserva e produção e estimaram que o mundo possui mais de 300 anos de reservas (rocha fosfática que pode ser produzido economicamente no momento da determinação usando a tecnologia existente) e mais de 1400 anos de recursos (rocha fosfática de qualquer classe, incluindo reservas, que podem ser produzidas em algum momento no futuro). Para Van Kauwenbergh; Stewart; Mikkelsen (2013), as alterações nas estimativas são decorrentes da descoberta e atualização de informações de novas reservas de rocha fosfática e das mudanças na economia e na tecnologia de mineração e processamento. “No entanto, a rocha fosfática é um recurso natural não renovável e, da produção ao uso final, deve ser administrado da maneira mais eficiente possível” (VAN KAUWENBERGH; STEWART; MIKKELSEN, 2013) e “reutilizado dentro de limites econômicos e técnicos” (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009). O fósforo presente no lodo e nas correntes secundárias das estações de tratamento de esgoto, por exemplo, poderá ser visto como um recurso que deve ser recuperado e reutilizado como fertilizante em vez de um nutriente que deve ser removido e disposto como resíduo (METCALF; EDDY, 2016, p. 1642).

3.1.1 FÓSFORO NO ESGOTO SANITÁRIO

Esgoto é, essencialmente, a água de abastecimento de uma comunidade após o seu uso em uma variedade de aplicações, contendo constituintes que, sem

tratamento, a tornam imprópria para a maioria dos usos (METCALF; EDDY, 2016, p. 3). O esgoto sanitário, também conhecido como esgoto doméstico, é o oriundo de residências e de instalações comerciais, institucionais e públicas (METCALF; EDDY, 2016, p. 9). Os principais constituintes do esgoto sanitário são: excreta humana, águas de banho, de processamento de alimentos e de produtos de manutenção pessoais e domésticos, juntos a uma grande variedade de traços de outros compostos orgânicos e inorgânicos. É comum caracterizar o esgoto segundo suas propriedades físicas e seus constituintes químicos e biológicos (METCALF; EDDY, 2016, p. 60).

O esgoto sanitário, entre outros constituintes químicos, contém nutrientes como nitrogênio e fósforo (METCALF; EDDY, 2016, p. 11). A matéria orgânica fecal e os detergentes em pó empregados em larga escala domesticamente constituem a principal fonte de fósforo do esgoto sanitário (CETESB, 2018, p. 25).

De acordo com APHA, AWWA, WEF (1998), “o fósforo ocorre em águas naturais e em águas residuais quase exclusivamente como fosfatos”.

O fósforo total no esgoto sanitário apresenta-se como fosfatos na forma inorgânica (polifosfatos e ortofosfatos) e na forma orgânica (quando ligado a compostos orgânicos), conforme Von Sperling; Andrade Neto; Volschan Júnior *et al.* (2009, p. 30).

Os polifosfatos são moléculas mais complexas com dois ou mais átomos de fósforo. Os polifosfatos se transformam em ortofosfatos pelo mecanismo de hidrólise. Os ortofosfatos são diretamente disponíveis para o metabolismo sem necessidade de conversões a formas mais simples. A forma na qual os ortofosfatos se apresentam na água depende do pH, e incluem PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, H_3PO_4 . Em esgoto doméstico típico, a forma predominante é o HPO_4^{2-} (VON SPERLING; ANDRADE NETO; VOLSCHAN JÚNIOR *et al.*, 2009, p. 30).

Em relação a sua forma como sólido, o fósforo presente no esgoto sanitário distribui-se na forma solúvel e na forma particulada. O fósforo solúvel é predominantemente inorgânico (polifosfatos e ortofosfatos) e uma pequena fração é orgânico (corresponde ao fósforo ligado à matéria orgânica solúvel do esgoto). O fósforo particulado é orgânico e corresponde ao fósforo ligado à matéria orgânica particulada do esgoto (VON SPERLING; ANDRADE NETO; VOLSCHAN JÚNIOR *et al.*, 2009, p. 30).

3.1.2 EUTROFIZAÇÃO

De acordo com Braga; Hespanhol; Conejo *et al.* (2005, p. 96), a eutrofização é um processo de enriquecimento das águas com nutrientes necessários ao crescimento da vida aquática. Braga; Hespanhol; Conejo *et al.* (2005, p. 96) definem o processo de eutrofização como natural dentro da sucessão ecológica dos ecossistemas, quando o ecossistema lacustre tende a se transformar em um ecossistema terrestre utilizando a interação do lago com o meio terrestre que o circunda. A eutrofização natural é um processo bastante demorado, associado ao tempo de evolução dos ecossistemas (BRAGA; HESPANHOL; CONEJO *et al.*, 2005, p. 97). A eutrofização manifesta-se por meio do aumento da produtividade biológica do lago, sendo observada a proliferação de algas e outros vegetais aquáticos por causa da maior quantidade de nutrientes disponível (BRAGA; HESPANHOL; CONEJO *et al.*, 2005, p. 97).

Os organismos fotossintetizantes aquáticos dependem da disponibilidade de diversos nutrientes (carbono, oxigênio, enxofre, potássio, cálcio, nitrogênio, fósforo e outros) para seu crescimento e proliferação, mas o oxigênio, o carbono, o nitrogênio e o fósforo são utilizados em maior quantidade. O crescimento dos organismos fotossintetizantes aquáticos pode ser limitado pela insuficiência de qualquer um desses elementos, no entanto, na maioria dos ecossistemas aquáticos, o fósforo é o nutriente limitante. Apesar de a maior parte dos seres fotossintetizantes aquáticos necessitarem de nitrogênio sob a forma de nitrato dissolvido na água, na escassez, há seres fotossintetizantes que o utilizam na forma gasosa, enquanto que a única fonte natural de fósforo vem do desgaste de rochas que contêm fosfato provocado pelas intempéries naturais (BRAGA; HESPANHOL; CONEJO *et al.*, 2005, p. 97).

Braga; Hespanhol; Conejo *et al.* (2005, p. 96) definem como eutrofização cultural ou acelerada o processo de eutrofização natural acelerado pela intervenção humana. A eutrofização cultural ou acelerada é proveniente dos despejos de esgoto domésticos e industriais e da descarga de fertilizantes aplicados na agricultura, que geralmente acelera o processo de enriquecimento das águas superficiais (TUNDISI; MATSMURA-TUNDISI, 2011). No caso de lagos, represas e rios, o processo de eutrofização cultural consiste no rápido desenvolvimento de plantas aquáticas, inicialmente cianobactérias (as quais podem produzir substâncias tóxicas que podem afetar a saúde do homem e causar a mortalidade de animais e intoxicações) e em seus estágios mais avançados

resulta em crescimento excessivo de aguapé (*Eichhornia crassipes*) ou alface-d'água (*Pistia stratiotes*), que são plantas aquáticas superiores mais comuns nesse processo (TUNDISI; MATSMURA-TUNDISI, 2011).

3.1.3 REMOÇÃO DE FÓSFORO DO ESGOTO SANITÁRIO

Os esgotos sanitários no Brasil apresentam, tipicamente, concentração de fósforo total na faixa de 6 a 10 mg/L CETESB (2018, p. 25).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), na Resolução nº 357/2005, definiu a cianobactérias como microrganismos procarióticos autotróficos que são capazes de ocorrer em qualquer manancial superficial especialmente naqueles com elevados níveis de nutrientes (nitrogênio e fósforo), podendo produzir toxinas com efeitos adversos a saúde. Todavia, a Resolução CONAMA nº 357/2005 não estabelece concentrações máximas de nitrogênio e fósforo permitidas nos efluentes líquidos sanitários para lançamento em águas superficiais, mas sim dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para fazer o enquadramento deles (CONAMA, 2005).

A Secretaria do Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Estado do Rio Grande do Sul através da Resolução CONSEMA nº 355/2017 estabelece que o órgão ambiental competente poderá exigir padrões para os parâmetros de fósforo e nitrogênio amoniacal em corpos receptores com registro de floração de cianobactérias, em trechos onde ocorra a captação para abastecimento público, devendo atender aos valores de concentração estabelecidos ou a eficiência apresentados na Tabela 3-1, (CONSEMA, 2017).

Tabela 3-1 - Concentração de fósforo e nitrogênio amoniacal permitida nos efluentes líquidos sanitários

Faixa de vazão do efluente (m ³ /d)	Nitrogênio Amoniacal	Fósforo Total	
	mg/L	mg/L	Eficiência
Q < 1000	20	4	75%
1000 ≤ Q < 2000	20	3	75%
2000 ≤ Q < 10000	20	2	75%
10000 ≤ Q	20	1	75%

Fonte: adaptada de CONSEMA (2017)

A remoção de fósforo de efluentes de esgoto tratado é efetuada para controle de eutrofização, uma vez que o fósforo é um nutriente limitante na maioria dos sistemas de água doce. O fósforo pode ser removido do esgoto por tratamento químico, remoção biológica ou por uma combinação de ambos (METCALF; EDDY, 2016, p. 626).

A melhoria da remoção biológica de fósforo envolve a incorporação do elemento na biomassa produzida no sistema de tratamento e subsequente remoção da biomassa através do descarte do lodo (METCALF; EDDY, 2016, p.626). O tratamento do lodo ativado remove cerca de 20% do fósforo presente no esgoto, no entanto sob certas condições de operação algumas estações de tratamento de esgoto (caracterizadas por altos valores de Oxigênio Dissolvido e altos níveis de pH), índices de remoção de fósforo muito acima do normal (entre 60 e 90%) foram observados (MANAHAN, 2016, p. 258).

Em termos de reações químicas, o método mais comum para remover o fosfato do esgoto sanitário é a precipitação cujos processos são capazes de remover entre 90 e 95% do fósforo, a custos razoáveis (MANAHAN, 2016, p. 258).

3.1.4 REMOÇÃO QUÍMICA DE FÓSFORO DO ESGOTO SANITÁRIO

Em geral, fósforo existe na forma solúvel (menor que 0.45 μm) ou particulada (BRATBY, 2006, p. 124). Partículas de dimensões coloidais ou menores são capazes de reter um estado disperso devido a certas características inerentes que promovem sua estabilidade (BRATBY, 2006, p. 3). Como partículas coloidais não podem ser removidas por sedimentação em um período de tempo razoável, os métodos químicos (isto é, o uso de coagulantes e de auxiliares de floculação) devem ser usados para efetuar a remoção dessas partículas (METCALF; EDDY, 2016, p.447).

3.2 PRECIPITAÇÃO QUÍMICA

“A precipitação química envolve a adição de produtos químicos para modificar o estado físico de sólidos dissolvidos e suspensos e para facilitar a remoção por sedimentação” (METCALF; EDDY, 2016, p. 459).

3.2.1 COLOIDES

Um coloide, ou fase dispersa, é uma dispersão de pequenas partículas (de dimensão menor do que cerca de $0.50 \mu\text{m}$) de um material em outro material (ATKINS; DE PAULA, 2008, p. 115). “Em geral, as partículas coloidais são agregados de numerosos átomos, ou moléculas, mas muito pequenas para serem vistas aos microscópios óticos comuns” (ATKINS; DE PAULA, 2008, p. 115). Sistemas coloidais cujas partículas são formadas por moléculas individuais recebem o nome de coloides propriamente ditos, enquanto que partículas coloidais formadas pela associação ou agregação de moléculas ou íons de dimensões subcoloidais são ditos coloides por associação (NETZ; ORTEGA, 2014, p. 266).

De acordo com Atkins; De Paula (2008, p. 115), o nome dado a um coloide depende das duas fases presentes, assim:

- Sol é uma dispersão de um sólido num líquido ou de um sólido num sólido;
- Aerosol é uma dispersão de um líquido num gás;
- Emulsão é uma dispersão de um líquido num líquido.

Os coloides, segundo Atkins; De Paula (2008, p. 115), são divididos em coloides liófilos, que atraem solventes, e coloides liófilos, que repelem o solvente. Se o solvente for a água, em vez dos termos anteriores, diz-se que os coloides são hidrófilos ou hidrófobos respectivamente” (ATKINS; DE PAULA, 2008, p. 115).

3.2.2 ESTABILIDADE DOS COLOIDES

Em uma dispersão coloidal, segundo Netz; Ortega (2014, p. 276), existem basicamente dois mecanismos que a mantém estável: o coloide carregado eletricamente, de modo a ocorrer repulsão mútua entre as partículas; a formação de um invólucro de solvatação com carga elétrica, o que se observa mais frequentemente em coloides liofílicos. Já um sol liofóbico é um sistema tipicamente instável (NETZ; ORTEGA, 2014, p. 267).

A fonte mais importante da estabilidade cinética dos coloides é a carga elétrica na superfície das partículas (ATKINS; DE PAULA, 2008, p. 117). De acordo com Bratby (2006, p. 13), a carga superficial pode se originar de reações químicas na

superfície, por imperfeições na estrutura da superfície sólida e pela adsorção de íons, que pode se originar das forças de London-van der Waals e da ligação de hidrogênio.

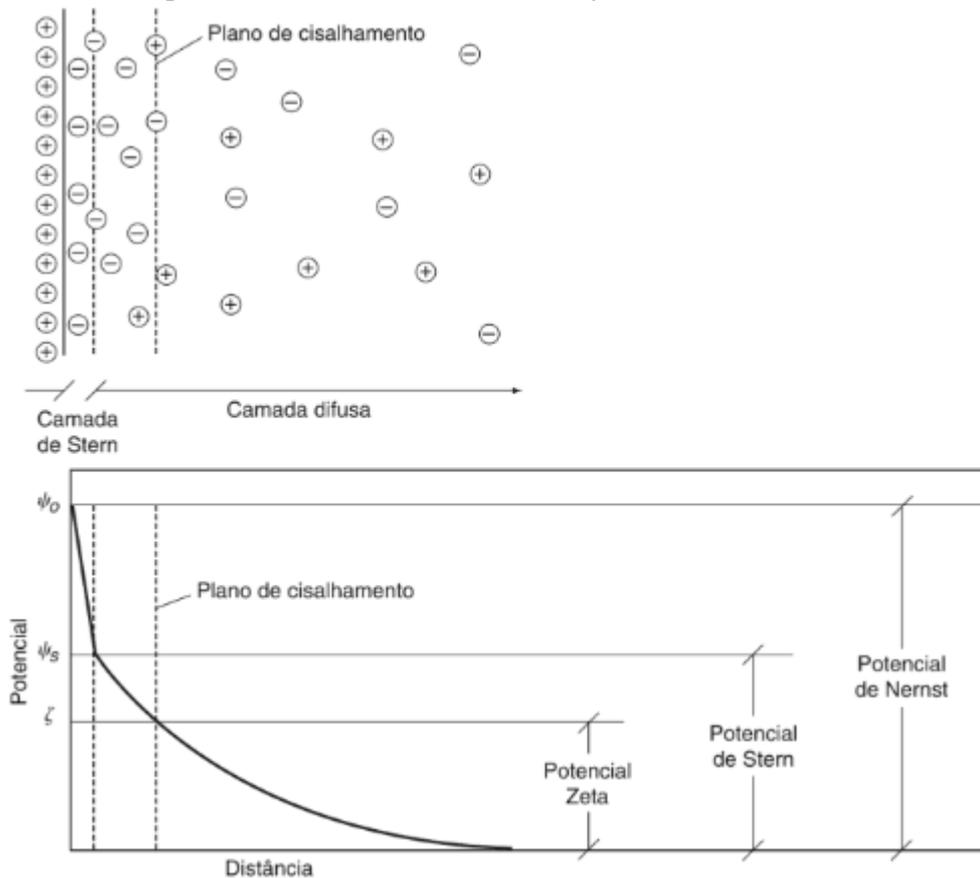
Muitas superfícies sólidas contêm grupos funcionais que são facilmente ionizáveis (como hidroxilas, carboxilas e fosfatos) e a carga de partículas com essas superfícies torna-se dependente do grau de ionização (transferência de prótons) e, conseqüentemente, do pH do líquido circundante. Em valores baixos de pH, prevalece uma superfície positivamente carregada, em pH mais alto prevalece uma superfície carregada negativamente e, em algum pH intermediário (o ponto isoelétrico, ou o ponto zero de carga, pH_{zpc}) a carga será zero (BRATBY, 2006, p. 13).

Quando o coloide ou a superfície fica carregada, alguns íons de carga contrária aderem à superfície. Os íons são mantidos na superfície dos coloides por força de atração eletrostáticas e de van der Waals, forte o suficiente para sobrepor-se à agitação térmica, e envolvendo essa camada fixa de íons se forma uma camada difusa de íons que é incapaz de formar uma dupla camada compacta devido à agitação térmica. A camada elétrica dupla é uma camada compacta (Stern) na qual o potencial decresce de Ψ_0 a Ψ_s , e de uma camada difusa na qual o potencial decresce de Ψ_s a 0 no corpo da solução (Figura 3-1) (METCALF; EDDY, 2016, p. 449).

Como apresentado na Figura 3-1, o potencial elétrico na região do plano de cisalhamento, medido em relação a um ponto distante, no seio do meio contínuo, é chamado de potencial zeta, (ζ), ou potencial eletrocinético (ATKINS; DE PAULA, 2008, p. 117).

A carga da partícula coloidal é uma carga efetiva determinada pelo balanço de íons e contra-íons, isto é, depende do potencial zeta. A neutralização dessas cargas ou a adição de eletrólito em excesso provoca a diminuição do potencial zeta abaixo do denominado ponto crítico, o que tem por conseqüência a formação de agregados, isto é, a coagulação do coloide (NETZ; ORTEGA, 2014, p. 277).

Figura 3-1 - Modelo da camada dupla elétrica de Stern



Fonte: Shaw (1996) apud Metcalf; Eddy (2016, p. 449)

3.2.3 COAGULANTES E FLOCULANTES

A coagulação é o processo pelo qual a desestabilização de uma dada suspensão ou solução é efetuada, ou seja, a função da coagulação é superar os fatores que promovem a estabilidade de um dado sistema. O produto químico ou substância que é adicionada a uma dada suspensão ou solução para efetuar desestabilização é denominado coagulante primário (BRATBY, 2006, p. 5).

Já a “floculação é o processo pelo qual as partículas desestabilizadas, ou partículas formadas como resultado da desestabilização, são induzidas a se unirem, fazer contato e, assim, formar grandes aglomerados” (BRATBY, 2006, p. 5). Para acelerar a taxa de floculação, ou para fortalecer os flocos formados durante a floculação são adicionados produtos químicos ou substâncias os quais são chamados de floculantes auxiliares (BRATBY, 2006, p. 5).

3.2.3.1 SAIS DE METAIS

Bratby (2006, p. 32) divide o coagulante de metal em duas categorias gerais: aquelas baseadas em alumínio (sulfato de alumínio, cloreto de alumínio, aluminato de sódio, cloridrato de alumínio, cloreto de polialumínio, cloreto de sulfato de polialumínio, cloreto de silicato de polialumínio e formas de cloreto de polialumínio com polímeros orgânicos) e aquelas baseadas em ferro (sulfato férrico, sulfato ferroso, cloreto férrico, sulfato de cloreto férrico, sulfato poliférrico e sais férricos com polímeros orgânicos). Outros produtos químicos usados como coagulantes incluem cal hidratada e carbonato de magnésio (BRATBY, 2006, P.32).

A eficácia dos coagulantes é devida, principalmente, a capacidade deles formarem complexos polinucleares e multicargas em solução com características de adsorção melhoradas, sendo que a natureza dos complexos formados pode ser controlada pelo pH do sistema (BRATBY, 2006, P.32).

A ação de íons hidrolisados de metais, que causam a desestabilização e a remoção de partículas coloidais, conforme Metcalf; Eddy (2016, p. 455), pode ser dividida nas três categorias seguintes:

- Adsorção e neutralização de cargas: envolve a adsorção de espécies hidrolisadas de metais mononucleares e polinucleares às partículas coloidais;
- Adsorção e formação de pontes interpartículas: envolve a adsorção de espécies hidrolisadas de metais polinucleares e espécies de polímeros, os quais formarão pontes entre as partículas;
- Emaranhamento em floco formado por varredura: envolve a varredura da água contendo partículas coloidais (onde foi adicionado sal de metal para adsorção e neutralização da carga de superfície) à medida que grandes quantidades de flocos de hidróxido de metal, formados logo após a macrofoculação, sedimentam e são removidos do meio líquido.

3.2.3.2 POLÍMEROS

Os polímeros referem-se a uma grande quantidade de compostos macromoleculares naturais ou sintéticos, solúveis em água, que têm a capacidade de

desestabilizar ou reforçar a floculação dos constituintes de um corpo de água (BRATBY, 2006, p. 50).

Uma molécula de polímero pode ser descrita como uma série de unidades químicas repetidas (monômeros) mantidas juntas por ligação covalente. Compostos cujas unidades de repetição forem da mesma estrutura molecular são denominados homopolímeros e compostos formados por mais de um tipo de unidade química repetida são denominados copolímeros, sendo o número total de unidades monoméricas chamado de grau de polimerização (BRATBY, 2006, p. 50).

Os polieletrólitos são classes especiais de polímeros contendo certos grupos funcionais ao longo da estrutura do polímero que podem ser ionizáveis. Quando os grupos ionizáveis se dissociam, as moléculas de polímero ficam carregadas positiva ou negativamente, dependendo dos grupos funcionais específicos presentes, e são chamadas de polieletrólitos catiônicos ou aniônicos, respectivamente. Já polímeros que possuem sítios carregados positiva e negativamente são referidos como anfóliticos, enquanto aqueles que não possuem grupos funcionais ionizáveis são denominados polímeros não iônicos. Todos os polieletrólitos são coloides hidrofílicos típicos. Eles têm pesos moleculares geralmente na faixa de 10^4 a 10^7 e são solúveis em água devido à hidratação dos grupos funcionais (BRATBY, 2006, p. 50).

De acordo com Metcalf; Eddy (2016, p. 452), a ação de polieletrólitos pode ser dividida em três categorias:

- Neutralização de cargas: os polieletrólitos atuam como coagulantes que neutralizam ou reduzem a carga das partículas;
- Formação de pontes de polímeros: é formada quando duas ou mais partículas são adsorvidas ao longo do comprimento do polímero;
- Neutralização de cargas e formação de pontes de polímeros: esse processo é caracterizado por utilizar polieletrólitos com elevado peso molecular e por reduzir a carga superficial da partícula e formar pontes.

3.3 PECTINA

“Os seres vivos são constituídos fundamentalmente por polissacarídeos, nos vegetais, e por proteínas, nos animais” (MANO; MENDES, 2013, p. 34). Entre os

polímeros naturais de origem vegetal destacam-se o amido, a celulose, a pectina e guar (MANO; MENDES, 2013, p. 34).

A pectina faz parte de uma classe de substâncias denominada substâncias pécticas (ver Quadro 3-1) que é a designação de um complexo grupo derivado de carboidratos coloidais que ocorrem em plantas e contém uma grande proporção de unidades de ácido anidro galacturônico em forma de cadeia. Os grupos carboxilo dos ácidos poligalacturônicos das substâncias pécticas podem ser parcialmente esterificados por grupos metilo e parcialmente ou completamente neutralizados por uma ou mais bases (KERTESZ, 1951, p. 7).

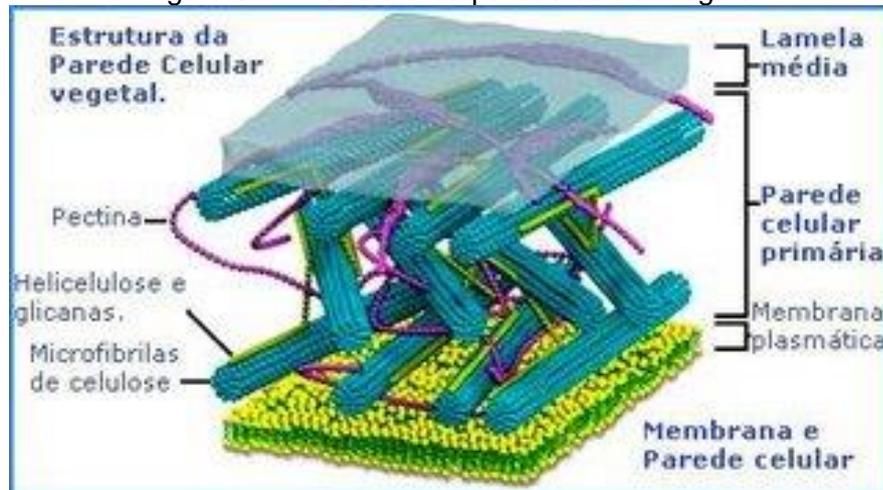
Quadro 3-1 - Substância pécticas

Classificação	Descrição
Protopectina:	Substância péctica insolúvel em água que ocorre nas plantas e que, após hidrólise restrita, origina ácidos pectínicos.
Ácidos pectínicos	Ácidos poligalacturônicos coloidais contendo mais do que uma insignificante proporção de grupos metil éster. Sob condições adequadas, são capazes de formar géis com açúcar e ácido ou, se o teor de metolixa for adequadamente baixo, com certos íons metálicos. Os sais dos ácidos pectínicos são pectinatos normais ou ácidos.
Pectina	Ácidos pectínicos solúveis em água de teor variável de éster metílico e grau de neutralização que são capazes de formar géis com açúcar e ácido sob condições adequadas.

Fonte: adaptada de kertesZ (1951, p. 6-7)

“As pectinas compreendem o componente mais abundante da maior parte das paredes celulares primárias, formando uma fase de gel hidratado, onde celulose e hemiceluloses são incorporadas. Elas atuam como material de preenchimento hidrofílico que evita a agregação e o colapso da rede de celulose, e também determinam a porosidade da parede celular a macromoléculas. Elas são concentradas particularmente na lamela média, em especial nas zonas de junção tricelulares, sendo importante para a adesão celular” (TAIZ; ZEIGER; MØLLER; *et al.*, 2017, p. 388).

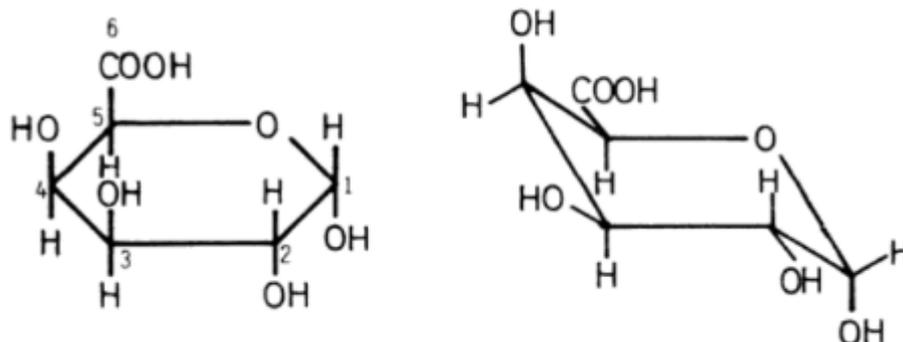
Figura 3-2 - Estrutura da parede celular vegetal



Fonte: Virtuoso Tecnologia da Informação (2008-2019)

Conforme Taiz; Zeiger; Møller *et al.* (2017, p. 388-389) as pectinas constituem um grupo heterogêneo de polissacarídeos, caracteristicamente contendo ácidos galacturônicos e açúcares neutros, como ramnose, galactose e arabinose; sendo que esses diferentes polissacarídeos com frequência são covalentemente ligados uns aos outros, formando grandes estruturas macromoleculares (cerca de 10^6 uma).

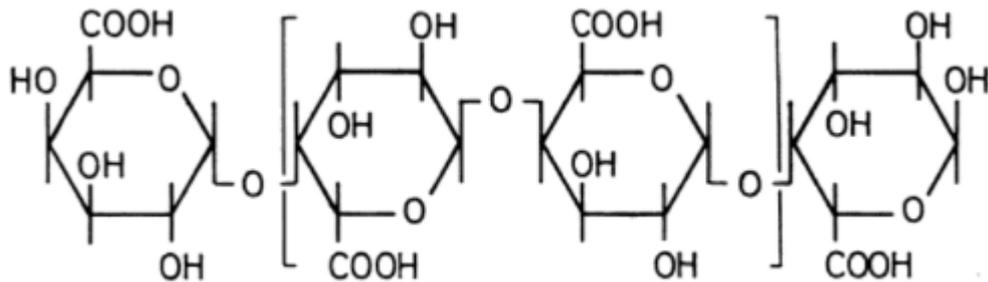
A molécula base da cadeia principal é o ácido α -D-galacturônico em sua configuração C1, a mais estável, posto que a maioria dos grupos estericamente importante (a função carboxila e as hidroxilas C2 e C3) estão em posição equilíbrio, como apresentado na Figura 3-3 (GARCÍA; GARCÍA, 1985, p. 13).

Figura 3-3 - Configuração real e estrutura do ácido α -D-galacturônico

Fonte García; García (1985, p. 13)

As hidroxilas em C1 e C4, situadas em posição axial, são as de união; portanto, a estrutura principal de todas as substâncias pécticas é formada por moléculas de α -D-galacturônico unidas por enlaces $\alpha(1\rightarrow4)$ e esta cadeia constitui o ácido poligalacturônico ou ácido péctico (GARCÍA; GARCÍA, 1985, p. 14).

Figura 3-4 - Estrutura do ácido poligalacturônico

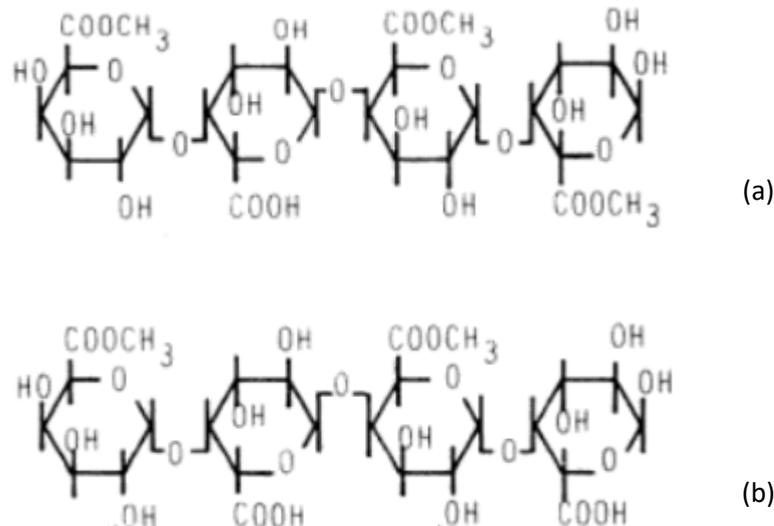


Fonte: García; García (1985, p. 14)

A medida de esterificação dos ácidos poligalacturônicos é expressa pelo seu teor de metoxila ou grau de esterificação (base da classificação de substâncias pécticas), que é definido como o número de funções ácidas esterificadas por cem monômeros de ácido galacturônico (GARCÍA; GARCÍA, 1985, p. 16).

Se o componente tiver um grau de esterificação inferior a 3.5%, será considerado ácido péctico e, se exceder essa porcentagem, pectinas (GARCÍA; GARCÍA, 1985, p. 16-17). As pectinas, por sua vez, são classificadas como de baixo teor de metoxila (grau de esterificação inferior a 50%) e de alto teor metoxila (grau de esterificação superior a 50%) (GARCÍA; GARCÍA, 1985, p. 17).

Figura 3-5 - Estrutura das substâncias pécicas: (a) Pectina de alto teor de metoxila; (b) Pectina de baixo teor de metoxila



Fonte: Adaptada de García; García (1985, p. 16)

Segundo Van Buren (1991), as pectinas são frequentemente classificadas pelos procedimentos utilizados para extraí-las da parede celular. Em geral, três tipos foram distinguidos:

- Pectinas solúveis em água - extraíveis com água ou soluções salinas diluídas;
- Pectinas solúveis em quelante - extraíveis com soluções de agentes quelantes de cálcio, como etilenodiaminotetracético (EDTA), ácido ciclohexanodiaminotetraacético (CDTA) ou hexametáfosfato; e
- Protopectinas - que são levadas à solução com soluções alcalinas ou ácidas diluídas quentes.

As pectinas solúveis em água e solúveis em quelantes são compostas principalmente por resíduos de ácido galacturônico com cerca de 2% de ramnose e 10-20% de açúcar neutro. Além disso, outra característica destacada por Van Buren (1991) é a distribuição e o número de grupos carboxila livres, os quais podem ser importantes para determinar se uma pectina é solúvel em água ou em quelante. Já as protopectinas, principalmente se extraídas com álcalis, segundo Van Buren (1991), têm alto teor de açúcar neutro, principalmente galactose e arabinose.

Van Buren (1991) também coloca que as proporções desses tipos de pectina variam consideravelmente entre os diferentes tecidos vegetais. Em decorrência disso, encontramos muitas pesquisas científicas (alguns exemplos são apresentados no

Quadro 3-2) para caracterizar pectinas extraídas de diferentes matérias-primas, testar novas técnicas de extração e otimizar as condições ou parâmetros de extração, principalmente na área de ciência e tecnologia de alimentos, já que a pectina é amplamente utilizada como geleificante e estabilizante na indústria de alimentos (CANTERI; MORENO; WOSIACKI *et al.*, 2012)

Quadro 3-2 - Exemplos de pesquisas científicas

Matéria-prima	Técnica de extração	Referência
Polpa e polpa e casca da goiaba	Solução acidificada e aquecida	(MUNHOZ; SANJINEZ-ARGANDOÑA; SOARES-JÚNIOR, 2010)
Bagaço de pêssego	Solução acidificada e aquecida	(PAGÁN; IBARZ, LLORCA <i>et al.</i> , 2001)
Casca de cacau	Solução acidificada e aquecida	(CHAN; CHOO, 2013)
Casca de toranja	Solução acidificada com aquecimento assistido por ultrassom	(XU; ZHANG; BAILINA <i>et al.</i> , 2014)
Bagaço de laranja	Solução acidificada com aquecimento Extração enzimática	(CALLIARI, 2004)

Fonte: própria do autor

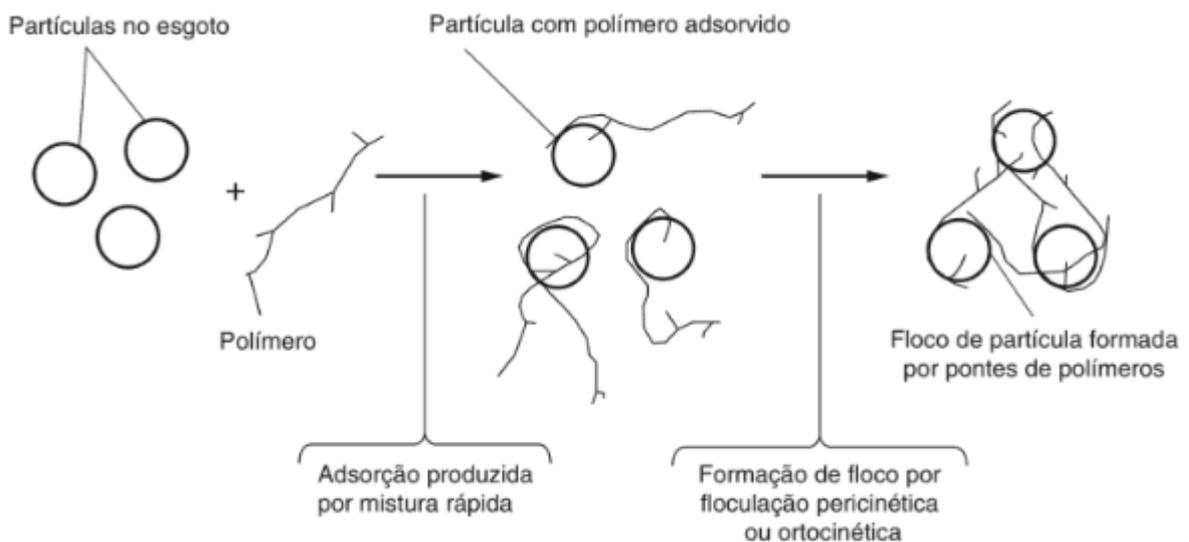
3.3.1 USO DE POLÍMEROS VEGETAIS COMO COAGULANTE OU FLOCULANTE

A redução da turbidez da água, em pelo menos 80%, foi relatada quando utilizados coagulantes à base de plantas usados em condições de trabalho otimizadas, embora existam poucos casos excepcionais. A presença de agentes ativos como carboidratos e proteínas tem sido associada aos efeitos de purificação observados (CHOY; PRASAD; WU *et al.*, 2014).

No caso das plantas pertencentes a família das cactáceas, independente das espécies, a mucilagem que consiste em ácidos galacturônicos é geralmente o agente de coagulação ativo predominante (CHOY; PRASAD; WU *et al.*, 2014). A maior remoção de turbidez para as cactáceas do gênero *Opuntia*, por exemplo, é atribuída ao ácido galacturônico contido na mucilagem de seus cladódios (MILLER; FUGATE; CRAVER *et al.*, 2008). Segundo Miller; Fugate; Craver *et al.* (2008), somente a arabinose, galactose e ramnose não apresentaram atividade de coagulação; no

entanto, a combinação desses açúcares com o ácido galacturônico foi capaz de reduzir a turbidez entre 30% e 50%; enquanto que apenas a adição do ácido galacturônico foi capaz de reduzir a turbidez em mais de 50%. Com base nas características da mucilagem da cactácea, Choy; Prasad; Wu *et al* (2014) deduziram que a adsorção e a formação de pontes são os mecanismos de coagulação. De acordo com Metcalf; Eddy (2016, p. 452), uma ponte é formada quando duas ou mais partículas coloidais são adsorvidas ao longo do comprimento do polímero (aniônico ou não iônico), conforme representado na Figura 3-6. Para tanto, deve ser realizada uma mistura inicial rápida (de intensidade suficiente para permitir a adsorção do polímero às partículas coloidais) do polímero e da solução contendo as partículas a serem removidas. Na sequência, através do processo de floculação pericínética ou ortocínética, as diversas partículas que integram o sistema de pontes se entrelaçam com outras pontes de partículas, então o tamanho das partículas em três dimensões cresce até que sejam facilmente removidas por sedimentação.

Figura 3-6 - Esquema de formação de pontes entre partículas com polímeros orgânicos



Fonte: Metcalf; Eddy (2016, p. 453)

De acordo com Ortiz; Astudillo; García (2013), a aplicação artesanal do cacto *Opuntia ficus-indica* como coagulante é uma prática tradicional nas comunidades rurais dos municípios da costa atlântica colombiana que não possuem fornecimento de água potável. Ortiz; Astudillo; García (2013) realizaram a caracterização do caule (cladódios, cladófilos ou filocládios) da *Opuntia ficus-indica* e os resultados os fizeram concluir que o poder coagulante para a remoção da turbidez e da cor das águas brutas

estão associados a presença de ácido poligalacturônico e de compostos algínicos. Utilizando o pó extraído do cladódio da planta, Ortiz; Astudillo; García (2013) também testaram a capacidade de remoção da cor e da turbidez das águas brutas e obtiveram respectivamente um percentual de remoção de 50% e 70%.

No município colombiano de Magangué, Lozano; Mendoza; Mendoza *et al.* (2015) avaliaram a eficiência da mucilagem extraída da *Opuntia ficus-indica* como coagulante auxiliar do sulfato de alumínio no processo de clarificação da água através de testes de jarros. Após testarem diferentes proporções (combinações) entre o coagulante extraído da *Opuntia ficus-indica* e o coagulante de sulfato de alumínio, Lozano; Mendoza; Mendoza *et al.* (2015), alcançaram eficiências superiores a 50% na remoção de turbidez, sendo as mais efetivas entre 96% e 98%, no entanto, esses resultados favoráveis foram alcançados em baixas proporções de mucilagem de *Opuntia ficus-indica*, o que indica que ainda existe grande dependência do coagulante inorgânico.

Sousa (2019) avaliou a capacidade coagulante dos cactos *Cereus jamacaru* (mandacaru), *Opuntia ficus-indica* (palma) e *Pilosocereus gounellei* (xiquexique). Para isso, Sousa (2019) preparou dois tipos de extratos para cada cacto com 0.10 mol/L de ácido clorídrico: em um foi utilizada a parcela viscosa (polpa) e no outro a matéria seca proveniente da casca dos cactos. Após foram realizados testes de jarros para determinar a eficiência dos extratos na remoção de turbidez e cor. De acordo com Sousa (2019) os extratos preparados com a matéria seca não foram eficientes como coagulante, por outro lado os extratos preparados com a polpa tiveram bom desempenho, alcançado respectivamente remoções de turbidez e cor de 98% e 92% com o extrato de mandacaru, 98% e 96% com o extrato de palma e 98% e 96% com o extrato de xiquexique.

Na cidade de Harare no Zimbábue, Nharingo; Zivurawa; Guyo (2015), analisaram a capacidade da pectina, extraída dos cladódios da *Opuntia ficus indica*, remover metais (chumbo (Pb), zinco (Zn), cádmio (Cd) e cobre (Cu)) de águas residuais. Nharingo; Zivurawa; Guyo (2015) obtiveram a remoção de 100% de Pb, 85.74% de Zn, 84.16% de Cd e 93.02% de Cu após o processo de coagulação e floculação.

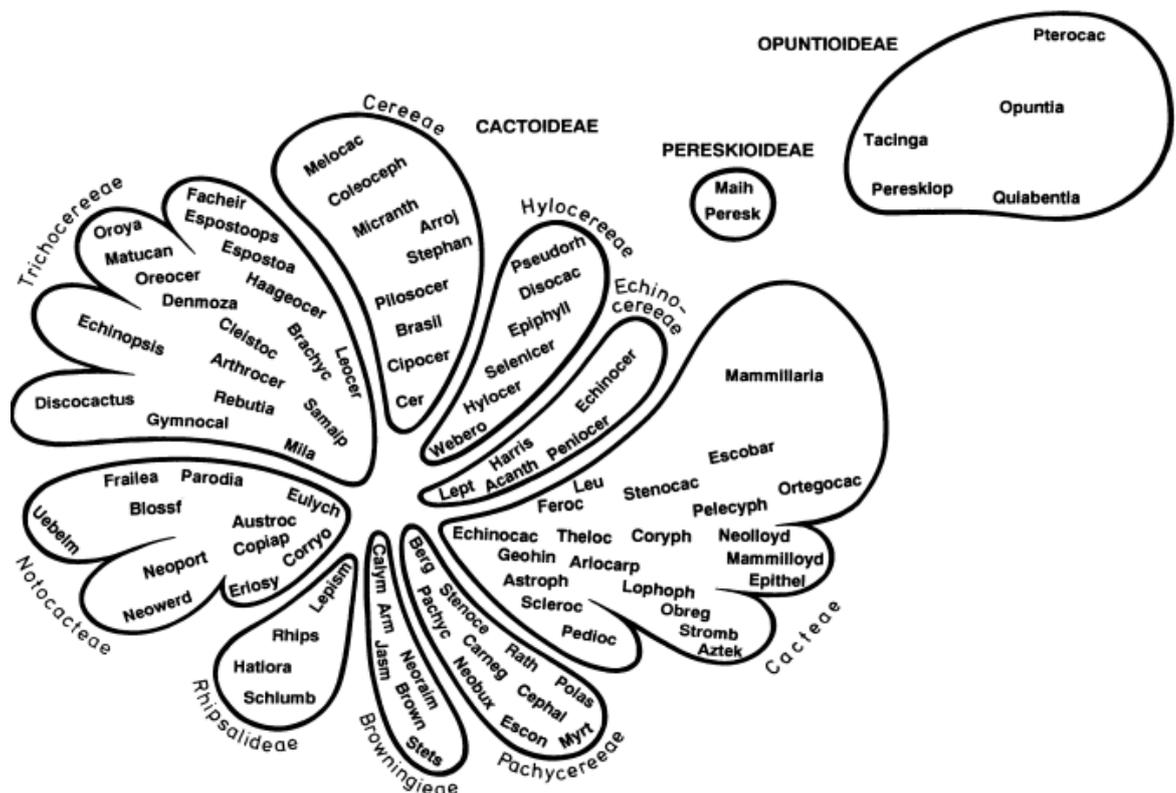
Nos Estados Unidos da América, Fox; Stebbins; Alcantar (2016) combinaram sal férrico (Fe(III)) e a mucilagem da *Opuntia ficus-indica* para remover arsênico (As) da água. De acordo com Fox; Stebbins; Alcantar (2016), após misturarem soluções de

As(V), nitrato férrico e suspensões de mucilagem do cacto, através de observações visual e por microscopia eletrônica de varredura confirmaram a ação de floculação da mucilagem à medida que os flocos visíveis se formavam e se depositavam no fundo dos tubos em 3 minutos, enquanto que as suspensões coloidais sem a mucilagem demoraram até 1 semana para estabilizar. Fox; Stebbins; Alcantar (2016) também verificaram que o percentual de remoção de As aumentou quando foi adicionada a mucilagem do cacto a solução de As (V) e nitrato férrico.

3.4 *Cereus jamacaru* (MANDACARU)

A família Cactaceae conta com cerca de 100 gêneros e 2000 espécies (KIESLING, 2001). De acordo com Barthlott; Hunt (1993, p. 169), a família Cactaceae é dividida em três grupos, como apresentado na Figura 3-7, tratados como subfamílias: Pereskioideae (2 gêneros), Opuntioideae (5 gêneros) e Cactoideae (91 gêneros).

Figura 3-7 - Cactaceae. Relações filogenéticas presumidas dentro da família, o tamanho e disposição dos compartimentos refletindo o número de espécies e relações dos grupos



Fonte: Barthlott; Hunt (1993, p. 170)

O *Cereus jamacaru* (mandacaru) é uma espécie nativa da vegetação da caatinga e junto com outras espécies de cactáceas formam a paisagem típica da região Semiárida do Nordeste, sendo encontrado nos Estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e norte de Minas Gerais (SILVA; ALVES, 2009).

Extremamente rústico, o *Cereus jamacaru* cresce nas catingueiras arbóreas e em locais quase desprovidos de solos, ele resiste a longos períodos de seca e sempre cresce e frutifica (CAVALCANTI; RIBEIRO FILHO; DIAS *et al.*, 2008).

Os ramos do mandacaru são irregulares dispostos em ângulo agudo com o eixo principal levemente curvado, dando a planta um aspecto de um candelabro, e exatamente por essa forma que pertence ao gênero *Cereus* (Cereeae), palavra de origem latina que significa círio, vela (CAVALCANTI; RIBEIRO FILHO; DIAS *et al.*, 2008).

O mandacaru perde pouca água para a atmosfera devido a forma do seu caule (grosso e elipsóide) desprovido de folhas, o que reduz a superfície de evaporação do vegetal e por causa da presença de uma espessa cutícula que reveste os ramos, possuindo, no seu interior, tecidos mucilaginosos que podem absorver e armazenar grande quantidade de água (CAVALCANTI; RIBEIRO FILHO; DIAS *et al.*, 2008). O mandacaru, conforme a Figura 3-8, pode apresentar espinhos que variam de tamanho em função do genótipo e alguns podem apresentar espinhos reduzidos ou mesmo a sua ausência (CORREIA; COELHO; NASCIMENTO *et al.*, 2010). Seu espesso caule colunar, com tonalidade que varia de verde a azulada torna essa espécie bastante atrativa para o mercado de plantas ornamentais (CORREIA; SILVA; MARQUES *et al.*, 2007).

Figura 3-8 -Planta de mandacaru (*Cereus jamacaru*) com espinhos (A) e sem espinhos (B)



Fonte: Correia; Silva; Nascimento *et al* (2012)

Morais (2013) analisou os componentes químicos de extratos aquosos dos cladódios do *Cereus jamacaru* e, nos diferentes tratamentos, verificou que são constituídos principalmente de polissacarídeos (89.42 a 95.76%) e ricos em galactose, glicose e manose.

O ponto de carga zero (pH_{zpc}) do polímero presente no extrato de *Cereus jamacaru* é de aproximadamente 7.79, conforme Ansilago; Silva; Pereira *et al.* (2018).

3.4.1 USO DE MANDACARU COMO COAGULANTE E COMO FLOCULANTE

Para avaliar a eficiência de remoção de turbidez utilizando o polímero natural extraído do *Cereus jamacaru* associado ao sulfato de alumínio, Zara; Thomazini; Lenz (2012) preparam e testaram cinco extratos de cacto distintos utilizando as seguintes soluções: água destilada; ácido clorídrico 0.01 mol/L; ácido clorídrico 0,10 mol/L; hidróxido de sódio 0.10 mol/L; cloreto de sódio 1%. Após ser higienizado, cortado e

macerado, o cacto foi colocado em um recipiente onde também foi adicionada uma das soluções para extração do polímero (para cada 1 g de cacto foi adicionada 2.5 mL de solução). Cada mistura foi homogeneizada em agitador magnético durante 40 minutos, sendo posteriormente filtrada com peneiras de plástico. O complexo viscoso resultante foi acondicionado em frasco âmbar, e armazenado sobre refrigeração à 5°C até a realização dos ensaios no equipamento *Jar-Test*. Zara; Thomazini; Lenz (2012) observaram melhor eficiência na remoção de turbidez da água bruta quando foi utilizada a solução de hidróxido de sódio 0.10 mol/L (93.5%) seguida da solução de ácido clorídrico 0.01 mol/L (91.1%), de cloreto de sódio 1% (90.7%), de ácido clorídrico 0.10 mol/L (88.2%) e de água destilada (28.1%).

Ostrowski (2014) testou a eficiência do *Cereus jamacaru* como coagulante auxiliar associado ao sulfato de alumínio na remoção de turbidez sintética da água. Ostrowski (2014) preparou e testou três extratos de cactos distintos: um com solução ácida (ácido clorídrico 0.10 M), outro com solução básica (hidróxido de sódio 0.01 M) e por fim um com solução salina (cloreto de sódio 1%). A metodologia utilizada por Ostrowski (2014) no preparo dos três extratos de cactos foi similar a utilizada por Zara; Thomazini; Lenz (2012), onde os cactos foram higienizados, cortados, macerados e colocados em um recipiente onde também foi adicionada uma das soluções para extração do polímero. Porém, para cada 1 g de cacto macerado foram adicionados 3 mL de solução por Ostrowski (2014) e a mistura foi homogeneizada por 30 minutos em um agitador magnético. O extrato obtido foi filtrado com peneiras e armazenado sob refrigeração em frasco de vidro até o uso nos ensaios no equipamento Jar-test. Ostrowski (2014) observou que quando utilizou os extratos ácido, básico e salino obteve respectivamente redução de turbidez na ordem de 2.27; 2.01 e 1.6 vezes mais quando comparados ao teste do branco (utilizando apenas o sulfato de alumínio). Ostrowski (2014) também verificou que a velocidade de decantação aumentou em todos os testes, devido à formação de flocos maiores e mais pesados, e que houve pouca influência dos extratos nos parâmetros pH e alcalinidade.

Melo (2017) adaptou a metodologia de extração do polímero do *Cereus jamacaru* adotada por Zara; Thomazini; Lenz (2012) para verificar a eficiência do extrato orgânico do cacto como coagulante principal e como coagulante auxiliar associado ao sulfato de alumínio na remoção dos parâmetros turbidez, cor aparente e série de sólidos após o processo de coagulação, floculação, sedimentação e filtração da água oriunda de um sistema lântico. Após limpar o cacto, Melo (2017) adicionou 10 mL de

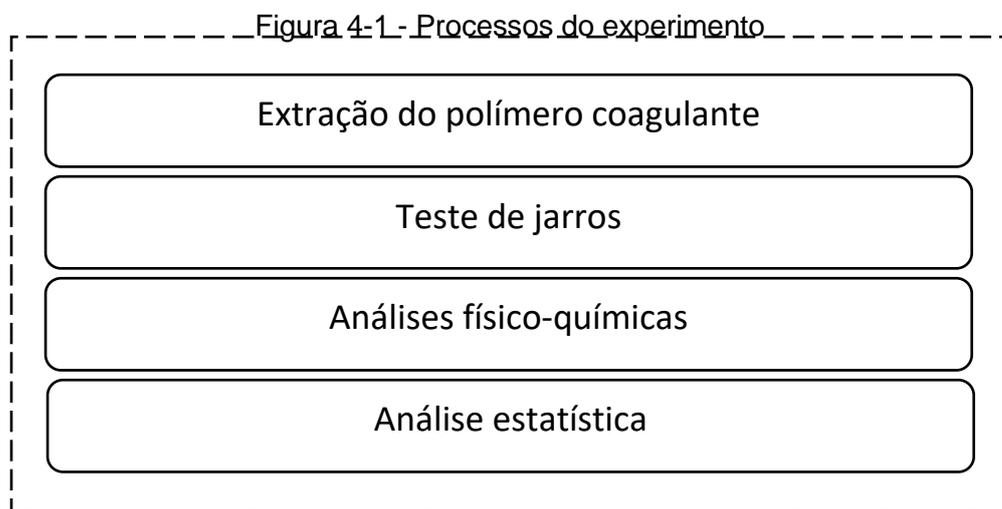
água deionizada para cada 75 g de mucilagem para facilitar a trituração, que foi realizada no liquidificador, e acondicionou o complexo resultante em frascos de vidro âmbar sob refrigeração por 24 horas. Após, Melo (2017) fez a extração do polímero orgânico utilizando uma solução de extração composta de uma mistura de solução de cloreto de sódio 1% com solução de hidróxido de sódio 0.10 mol/L adotando a relação de 1 mL do cacto triturado com água deionizada para 2.5 mL de solução de extração em temperatura ambiente. Utilizando o extrato orgânico do cacto como coagulante principal após a filtração, os melhores resultados obtidos por Melo (2017) foram remoção de cor (93.93%), remoção de turbidez (96.16%), remoção de sólidos totais (82.61%), remoção de sólidos fixos (100%) e remoção de sólidos voláteis (80%). E utilizando o extrato orgânico do cacto como coagulante auxiliar associado ao sulfato de alumínio após a filtração os melhores resultados encontrados por Melo (2017) foram remoção de cor (94.39%), remoção de turbidez (97.84%), remoção de sólidos totais (89.83%), remoção de sólidos fixos (94.12%) e remoções de sólidos voláteis (100%). Assim Melo (2017) concluiu que utilizando extrato orgânico do *Cereus jamacaru* como coagulante alternativo ou como auxiliar do sulfato de alumínio pós-filtração direta pode-se obter água clarificada.

4 MATERIAS E MÉTODOS

Para analisar se o *Cereus jamacaru* pode remover fósforo do esgoto sanitário quando utilizado como coagulante principal, foram realizados testes de jarros utilizando esgoto sanitário bruto. Como referência, também foi realizado teste de jarros utilizando o sulfato de alumínio como coagulante principal.

Utilizando água deionizada e o *Cereus jamacaru* como coagulante principal, também foram realizados testes de jarros para verificar se o cacto não agregaria fósforo no efluente em tratamento.

Na Figura 4-1, estão relacionados os processos ou etapas do experimento realizado para atingir os objetivos da pesquisa.



Fonte: própria do autor

4.1 EXTRAÇÃO DO POLÍMERO COAGULANTE

Conforme Van Buren (1991) as pectinas podem ser extraídas dos tecidos vegetais com água e soluções salinas (pectinas solúveis em água), com soluções de agentes quelantes de cálcio (pectinas solúveis em quelante), com soluções alcalinas ou soluções ácidas diluídas e aquecidas (protopectina).

Para realizar a extração do polímero coagulante do *Cereus jamacaru*, o qual foi utilizado para testes de coagulação e floculação no tratamento de água, Zara; Thomazini; Lenz (2012) testaram água, soluções ácidas sem aquecimento, solução

alcalina e solução salina, assim como Ostrowski (2014). Já Melo (2017) utilizou uma mistura de solução salina e solução alcalina para fazer a extração, enquanto que Sousa (2019) utilizou apenas solução ácida sem aquecimento.

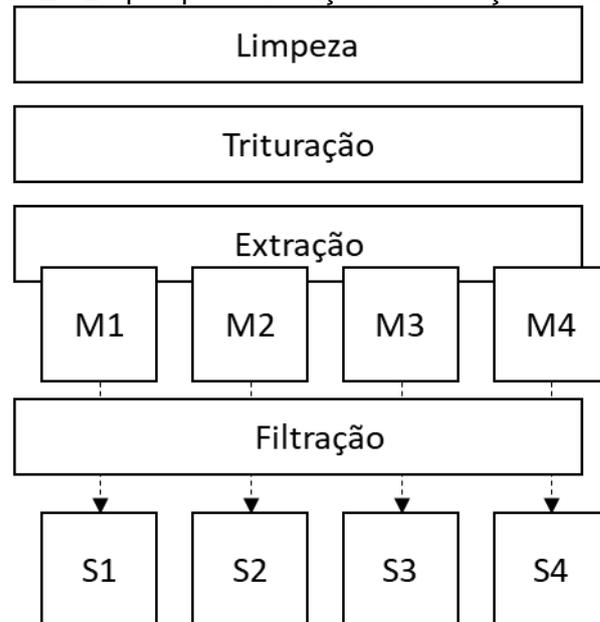
Não foram encontrados trabalhos científicos utilizando o mandacaru como coagulante para remover fósforo de esgoto sanitário, mas levando em consideração que os cladódios do mandacaru são constituídos principalmente por polissacarídeos (MORAIS, 2013) e tendo em vista os bons resultados obtidos nos testes de coagulação e floculação no tratamento de água utilizando esse cacto como coagulante auxiliar e como coagulante principal, motivou-se testá-lo para esse fim.

Por não terem sido encontrados estudos que apresentem a caracterização da pectina presente no mandacaru, para extrair o coagulante foram utilizados quatro métodos distintos:

- Primeiro método de extração (M1) – foi considerada a presença de protopectina e utilizada uma solução ácida e aquecida para fazer a extração;
- Segundo método de extração (M2) – foi considerada a presença de pectina solúvel em água e foi utilizada apenas água para fazer a extração, porém a água foi aquecida;
- Terceiro método de extração (M3) – foi adaptada a metodologia utilizada por Zara; Thomazini; Lenz (2012) para fazer a extração com solução ácida em temperatura ambiente;
- Quarto método de extração (M4) – foi considerada a presença de pectina solúvel em água e foi utilizada apenas água em temperatura ambiente para fazer a extração.

Na Figura 4-2, estão relacionados os processos realizados para extrair o polímero coagulante dos tecidos do cladódio do cacto *Cereus jamacaru*, os quais serão detalhados no item 4.1.1, item 4.1.2, item 4.1.3 e item 4.1.4.

Figura 4-2 - Etapas para obtenção das soluções coagulante



Fonte: própria do autor

Nota: M1 - primeiro método de extração; M2 - segundo método de extração; M3 - terceiro método de extração; M4 - quarto método de extração; S1 - solução resultante do método de extração M1; S2 - solução resultante do método de extração M2; S3 - solução resultante do método de extração M3; S4 - solução resultante do método de extração M4

4.1.1 LIMPEZA

O polímero coagulante foi extraído dos cladódios de um cacto da espécie *Cereus jamacaru* (mandacaru) sem espinho, o qual foi adquirido em uma floricultura localizada na cidade de Porto Alegre no Estado do Rio Grande do Sul. Na Figura 4-3, são apresentadas as plantas, que foram armazenadas no Laboratório de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico (LADETEC) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), utilizadas no experimento.

Figura 4-3 - Cacto *Cereus jamacaru* sem espinho utilizado no experimento

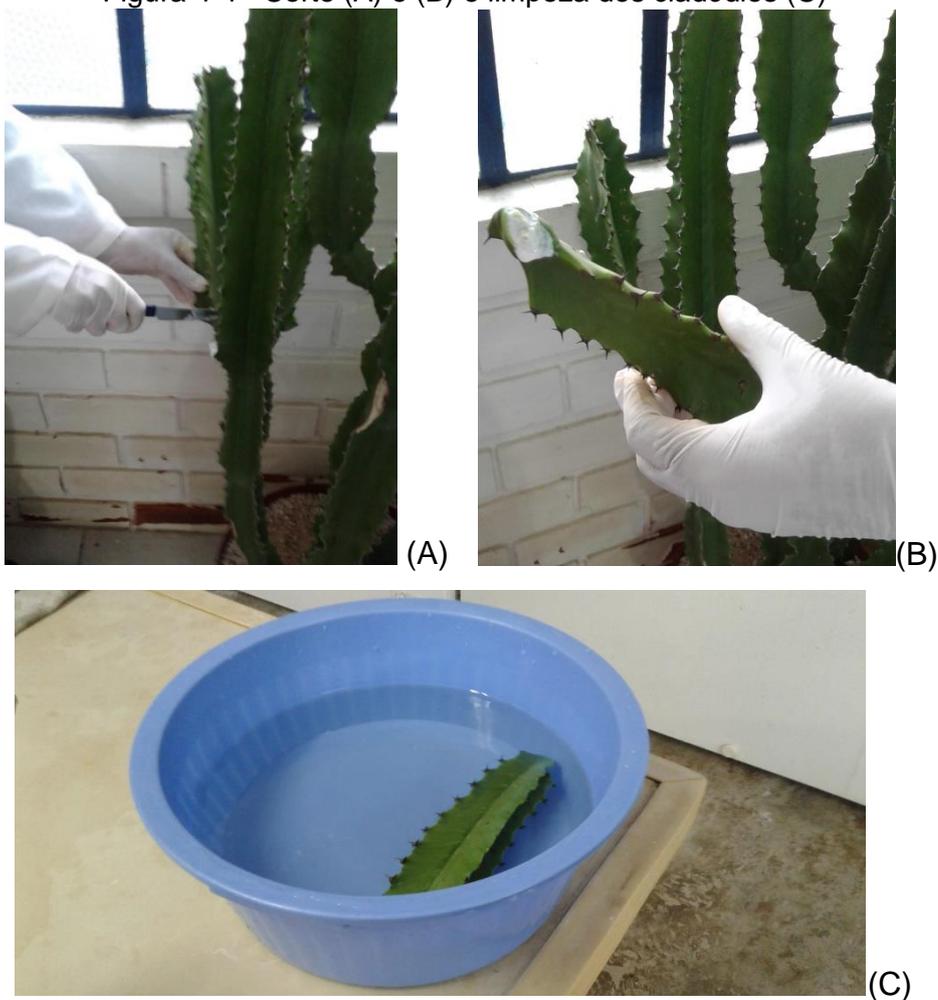


Fonte: própria do autor

Para fazer a limpeza dos cladódios do *Cereus jamacaru* foram utilizados os seguintes materiais: faca, escova com cerdas macias; água corrente; bacia; hipoclorito de sódio.

Com o auxílio de uma faca os cladódios foram cortados, Figura 4-4 (A) e (B), após foram cuidadosamente escovados sob água corrente e na sequência submergidos em uma solução de hipoclorito de sódio de concentração igual a 200 mg/L onde permaneceram durante 3 minutos, Figura 4-4 (C).

Figura 4-4 - Corte (A) e (B) e limpeza dos cladódios (C)



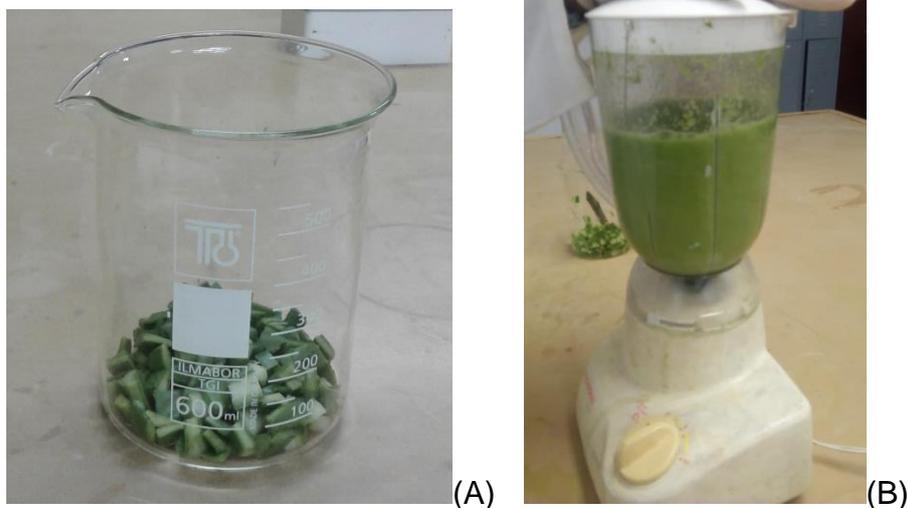
Fonte: própria do autor

4.1.2 TRITURAÇÃO

Com a finalidade de aumentar a superfície de contato e facilitar a extração do polímero, os cladódios foram cortados em pedaços de aproximadamente 1 cm², Figura 4-5 (A), e após triturados em um liquidificador, Figura 4-5 (B). Conforme García, García (1985, p. 60-61), geralmente é utilizada uma relação polpa / água = 1 / 10, neste trabalho foi adotada a relação 1 / 8, ou seja, a cada 1 grama de cacto foram adicionados 8 mL de água deionizada.

Nesta etapa foram utilizados os materiais a seguir relacionados: tábua de corte de vidro, faca, espátula, becker, balança analítica, proveta graduada, liquidificador doméstico, cladódios limpos e desinfetados e água deionizada.

Figura 4-5 - Trituração



Fonte: própria do autor

4.1.3 EXTRAÇÃO

No Quadro 4-1, são apresentadas as operações realizadas em cada método de extração do polímero.

Quadro 4-1 - Operações realizadas na hidrólise do polímero

Método	Operações
M1	<ul style="list-style-type: none"> Ajustar o pH da solução de cacto triturado (pH=2.5); Agitar a solução (440 rpm) por 1 hora em temperatura constante (80 °C).
M2	<ul style="list-style-type: none"> Agitar a solução (440 rpm) por 1 hora em temperatura constante (80 °C).
M3	<ul style="list-style-type: none"> Ajustar o pH da solução de cacto triturado (pH=2.5); Agitar a solução (440 rpm) por 1 hora em temperatura ambiente.
M4	<ul style="list-style-type: none"> Agitar a solução (440 rpm) por 1 hora em temperatura ambiente.

Fonte: própria do autor

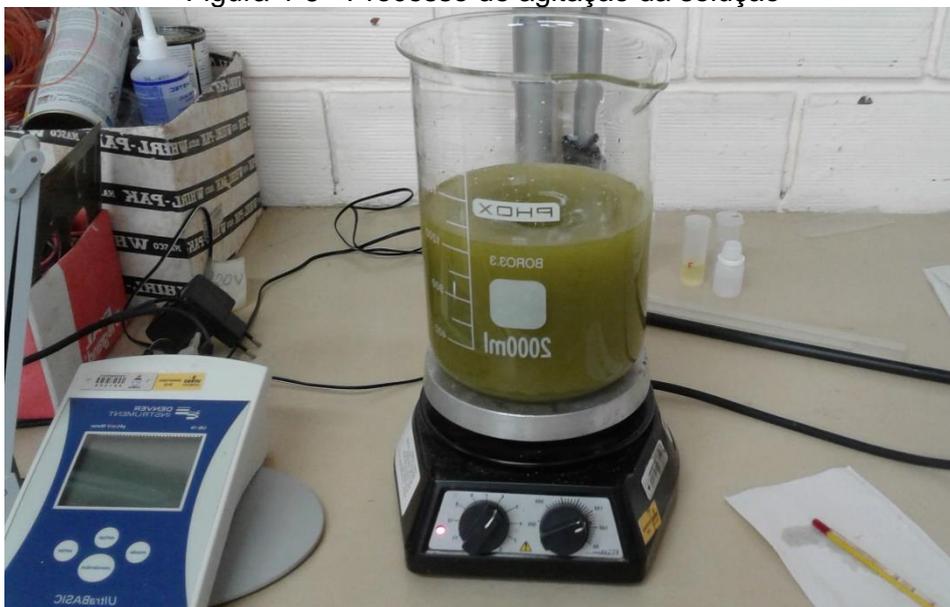
Os parâmetros pH, velocidade de agitação, temperatura e tempo de aquecimento utilizados no método (M1) foram baseados nos valores utilizados por El-Nawawi; Shehata (1987) para extrair pectina da casca de laranja. Os valores dos parâmetros tempo e a velocidade de agitação foram replicados para os demais

métodos (M2, M3 e M4), assim como o parâmetro pH para o método (M3) e o temperatura para o método (M2).

O ajuste do pH foi feito utilizando uma solução de ácido cítrico anidro P.A. (a fim de reduzir o impacto ambiental optou-se por um ácido orgânico) de concentração igual a 3 M. O pH foi medido com um pHmetro (marca Denver, modelo UB-10).

Para agitar e aquecer a solução de cacto foi utilizado um agitador magnético com aquecimento (marca Fitasom, modelo 752A) conforme apresentado na Figura 4-6. A temperatura foi medida com um termômetro químico para laboratório (escala de -10 a +110°C).

Figura 4-6 - Processo de agitação da solução



Fonte: própria do autor

4.1.4 FILTRAÇÃO

Cada uma das quatro soluções S1, S2, S3 e S4 obtidas respectivamente pelo método de extração M1, M2, M3 e M4, foram filtradas. Para realizar a filtração foi utilizado funil de haste longa, Erlenmeyer, filtro de papel para café tamanho 104, papel alumínio (para proteger a solução da incidência da luz). A fase sólida retida no filtro de papel foi descartada e a líquida mantida sob refrigeração por no máximo 24 horas até o uso.

Figura 4-7 - Solução em processo de filtração



Fonte: própria do autor

4.2 TESTE DE JARROS

Utilizando o equipamento Jar Test (modelo FlocControl III, marca PoliControl, com 6 jarros) foram realizados testes de jarros em três momentos distintos.

No primeiro momento, foi testada a eficiência de cada solução coagulante preparada com o cacto *Cereus jamacaru* (S1, S2, S3 e S4) quando utilizado como coagulante para tratar esgoto sanitário bruto. Cada solução foi testada três vezes separadamente, sendo que em cada teste foram utilizados 5 volumes diferentes de solução coagulante. A seguir é apresentado o roteiro adotado em cada um dos testes:

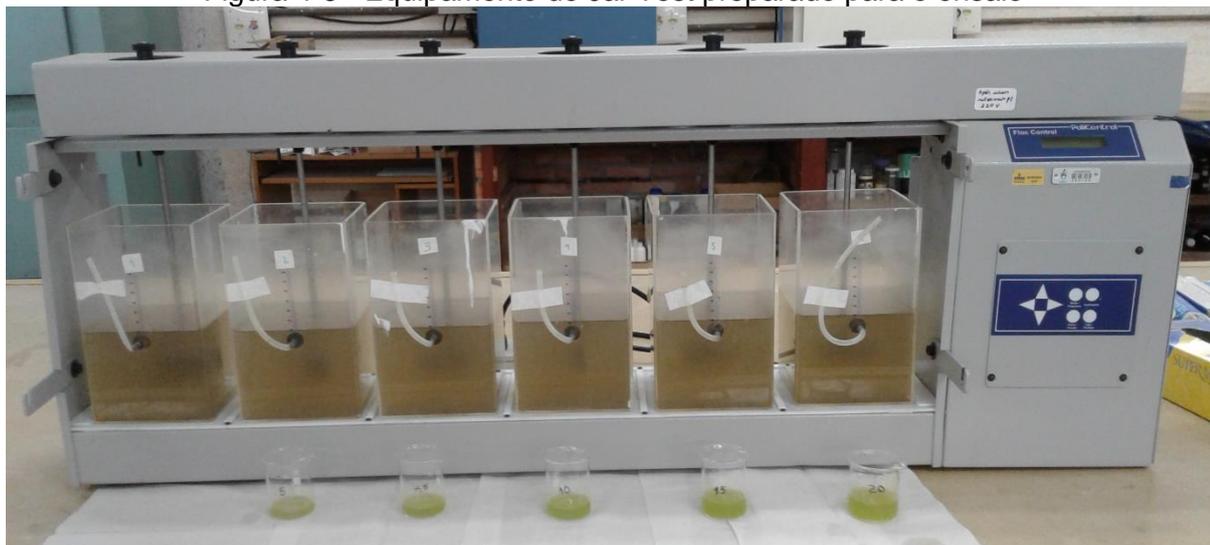
- Programação do equipamento Jar Test: mistura rápida (150 rpm por 2 minutos), mistura lenta (30 rpm por 15 minutos) e sedimentação (0 rpm por 30 minutos);
- Adição de 1200 mL de esgoto bruto em cada um dos seis jarros do equipamento Jar Test.
- Adição simultânea de solução coagulante em cada jarro (C0=0, C1=5 mL, C2=7.5 mL, C3=10 mL, C4=15 mL e C5=20 mL), onde C0 corresponde ao volume de coagulante adicionado no jarro 1, C2 o volume de coagulante adicionado no jarro 1 e assim sucessivamente;
- Início do teste.

A velocidade de mistura (rápida e lenta), assim como o tempo de duração das misturas, com exceção do tempo de sedimentação o qual foi duplicado, adotados nos testes de jarros seguiram os utilizados por Zara; Thomazini; Lenz (2012).

Os volumes de solução coagulantes utilizados nos testes de jarros foram definidos após a realização de testes preliminares que avaliaram a relação entre o volume de solução coagulante utilizado e a turbidez medida. Observou-se que próximo a 20 mL, conforme era aumentado o volume de coagulante utilizado, a variação entre os valores de turbidez medida diminuía mais, então fixou-se arbitrariamente 5 volumes variando entre 5 e 20 mL (C0=0, C1=5 mL, C2=7.5 mL, C3=10 mL, C4=15 mL e C5=20 mL).

As amostras de esgoto sanitário bruto foram coletadas na Estação Recuperadora da Qualidade da Água (ERQA) da UFRGS, Campus do Vale da UFRGS.

Figura 4-8 - Equipamento de Jar Test preparado para o ensaio



Fonte: própria do autor

Em um segundo momento foi realizado um teste de jarros utilizando água deionizada em substituição ao esgoto sanitário bruto. Novamente foram testadas cada solução coagulante preparada com o cacto *Cereus jamacaru* (S1, S2, S3 e S4) separadamente utilizando 5 volumes diferentes (C0=0, C1=5 mL, C2=7.5 mL, C3=10 mL, C4=15 mL e C5=20 mL). O objetivo deste teste foi verificar se as soluções coagulantes agregariam fósforo no efluente em tratamento.

Também foi realizado um teste de jarros utilizando uma solução de 4% de sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$) como coagulante principal. Foram testados 5 volumes diferentes do coagulante (0 mL, 2 mL, 2.6 mL, 3.2 mL, 3.6 mL e 4 mL), os quais foram adicionados simultaneamente em jarros contendo 1600 mL de esgoto sanitário bruto. Assim a concentração de coagulante em cada jarro foi de: C0=0 mg/L, C1=50 mg/L, C2=65 mg/L, C3=80 mg/L, C4=90 mg/L e C5=100 mg/L. O objetivo deste teste foi verificar a eficiência do sulfato de alumínio quando utilizado como coagulante para tratar esgoto sanitário.

Figura 4-9 - Amostras de esgoto coletadas após o ensaio que utilizou sulfato de alumínio como coagulante principal



Fonte: próprio do autor

4.3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Os parâmetros físico-químicos analisados nas amostras de esgoto sanitário bruto, antes e após o teste de jarros, foram o pH, a temperatura, a turbidez e o fósforo total.

4.3.1 pH E TEMPERATURA

Para determinar o potencial hidrogeniônico (pH) e a temperatura das amostras foi utilizado um pHmetro calibrado da marca Denver e modelo UB-10.

4.3.2 TURBIDEZ

Para determinar a turbidez foi utilizado um turbidímetro calibrado da marca Hach e modelo 2100N.

4.3.3 FÓSFORO TOTAL

Para determinar o fósforo total foram seguidos os seguintes métodos do Standard Methods APHA, AWWA, WEF (1998): 4500-P.B.5 e 4500-P.D.

Reagentes utilizados: fenolftaleína, solução de ácido sulfúrico, solução de solução de persulfato de potássio, água deionizada, solução de 6N de hidróxido de sódio, solução ácida de molibdato de amônio, solução de cloreto estanoso.

Equipamentos: autoclave e espectrofotômetro (marca Pró-Análise, modelo: UV-1600)

4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os experimentos foram organizados em blocos os quais foram agrupados conforme a solução coagulante utilizada no teste de jarros (S1, S2, S3 e S4). Cada bloco foi composto por cinco grupos, 15 unidades experimentais (cinco tratamentos e três repetições) e para fins de comparação foi utilizado um grupo controle o qual não recebeu tratamento (C1=0). Os tratamentos referem-se aos diferentes volumes de solução coagulante utilizados (C2, C3, C4, C5 e C6), enquanto que as variáveis respostas correspondem ao percentual de remoção de turbidez e ao percentual de remoção de fósforo total obtidos após os testes.

O percentual de remoção dos parâmetros (turbidez e fósforo total) foram determinados através da equação (1).

$$E = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (1)$$

Onde

E = Eficiência de remoção do parâmetro (%)

P1 = Valor do parâmetro medido na amostra bruta

P2 = Valor do parâmetro medido no ensaio após tratamento

A fim de avaliar a variação das médias das variáveis respostas e identificar se ela é significativa foi feita a análise da variância (ANOVA).

4.4.1 EXPERIMENTOS INTEIRAMENTE AO ACASO COM IGUAL NÚMERO DE REPETIÇÕES

Utilizando a estatística F a um nível de significância $\alpha=0.05$ foi testada a seguinte hipótese:

H_0 : Não existe diferença significativa entre as médias dos tratamentos;

Se $F_{calc.} > F_{tab.}$, então H_0 é rejeitada

Se $F_{calc} < F_{tab.}$, então H_0 não é rejeitada

Onde:

$F_{calc.}$ – F calculada para um nível α de significância, para $k - 1$ e para $k(r - 1)$

$F_{tab.}$ – F tabelada para um nível α de significância, para $k - 1$ e para $k(r - 1)$

4.4.2 EXPERIMENTOS EM BLOCOS AO ACASO COM REPETIÇÃO

Utilizando a estatística F a um nível de significância $\alpha=0.05$ foram testadas as seguintes hipóteses:

H_1 : Não existe diferença significativa entre as médias dos tratamentos;

Se $F_{calc.} > F_{tab.}$, então H_1 é rejeitada

Se $F_{calc} < F_{tab.}$, então H_1 não é rejeitada

Onde:

$F_{calc.}$ – F calculada para um nível α de significância, para $k - 1$ e para $n - k - r + 1$

$F_{tab.}$ – F tabelada para um nível α de significância, para $k - 1$ e para $n - k - r + 1$

H_2 : Não existe diferença significativa entre as médias dos blocos;

Se $F_{calc.} > F_{tab.}$, então H_2 é rejeitada

Se $F_{calc.} < F_{tab.}$, então H_2 não é rejeitada

Onde:

$F_{calc.}$ – F calculada para um nível α de significância, para $r - 1$ e para $n - k - r + 1$

$F_{tab.}$ – F tabelada para um nível α de significância, para $r - 1$ e para $n - k - r + 1$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Tabela 5-1 são apresentados os valores de turbidez e na Tabela 5-2 os valores de fósforo total medidos em amostras coletadas do sobrenadante do esgoto bruto após cada um dos três testes de jarros feitos com cada uma das quatro soluções coagulantes.

Tabela 5-1 - Valores medidos de Turbidez

Teste	Volume de Coagulante, mL	Turbidez, NTU					
		C0	C1	C2	C3	C4	C5
		0	5	7.5	10	15	20
1	S1	64.3	65.8	64.9	67.8	67.8	70.1
	S2	27.3	24.6	25.6	23.7	25.4	24.9
	S3	54.3	49.0	49.8	50.0	50.3	51.1
	S4	53.9	52.9	57.8	54.4	55.8	57.5
2	S1	83.5	80.8	77.3	78.3	78.5	75.7
	S2	98.9	95.8	101.0	94.2	92.7	95.4
	S3	74.9	77.5	75.3	73.3	81.6	78.1
	S4	111.0	117.0	121.0	120.0	119.0	121.0
3	S1	80.8	79.7	82.5	81.1	79.3	79.8
	S2	84.4	95.0	92.8	93.1	90.8	91.8
	S3	94.6	97.0	101.0	103.0	106.0	109.0
	S4	98.8	96.6	98.7	100.0	97.2	102.0

Fonte: própria do autor

Tabela 5-2 - Valores medidos de fósforo total

Teste	Coagulante, mL	Concentração de fósforo total, mg/L					
		C0	C1	C2	C3	C4	C5
		0	5	7.5	10	15	20
1	S1	20.80	22.48	22.10	23.32	23.79	23.03
	S2	20.53	20.60	20.17	21.04	22.06	21.20
	S3	24.25	23.65	24.36	25.12	25.30	24.38
	S4	24.15	23.90	23.95	24.59	20.38	20.79
2	S1	12.68	12.30	12.52	12.43	12.75	12.72
	S2	17.20	17.28	17.76	17.09	17.14	16.29
	S3	15.93	16.04	15.76	16.00	14.62	15.71
	S4	14.22	14.02	14.07	14.40	14.62	14.50
3	S1	14.08	14.12	14.15	14.18	14.13	14.53
	S2	16.84	17.76	18.29	18.26	18.25	18.94
	S3	15.63	16.24	16.67	16.68	16.56	16.12
	S4	13.86	13.65	13.91	14.19	14.29	14.10

Fonte: própria do autor

A partir dos dados obtidos na Tabela 5-1 foi calculado o percentual de remoção de turbidez, e os valores resultantes foram organizados por tipo de solução utilizada nos testes e apresentados na Tabela 5-3, Tabela 5-4, Tabela 5-5 e Tabela 5-6.

Tabela 5-3 - Percentual de remoção de turbidez utilizando a solução S1 como coagulante

Coagulante	Remoção de turbidez (%)					Total
	C1	C2	C3	C4	C5	
S1	-2.33	-0.93	-5.44	-5.44	-9.02	
	3.23	7.43	6.23	5.99	9.34	
	1.36	-2.10	-0.37	1.86	1.24	
Média	0.75	1.46	0.14	0.80	0.52	0.73

Fonte: própria do autor

Tabela 5-4 - Percentual de remoção de turbidez utilizando a solução S2 como coagulante

Coagulante	Remoção de turbidez (%)					Total
	C1	C2	C3	C4	C5	
S2	9.89	6.23	13.19	6.96	8.79	
	3.13	-2.12	4.75	6.27	3.54	
	-12.56	-9.95	-10.31	-7.58	-8.77	
Média	0.16	-1.95	2.54	1.88	1.19	0.76

Fonte: própria do autor

Tabela 5-5 - Percentual de remoção de turbidez utilizando a solução S3 como coagulante

Coagulante	Remoção de turbidez (%)					Total
	C1	C2	C3	C4	C5	
S3	9.76	8.29	7.92	7.37	5.89	
	-3.47	-0.53	2.14	-8.95	-4.27	
	-2.54	-6.77	-8.88	-12.05	-15.22	
Média	1.25	0.33	0.39	-4.54	-4.53	-1.42

Fonte: própria do autor

Tabela 5-6 - Percentual de remoção de turbidez utilizando a solução S4 como coagulante

Coagulante	Remoção de turbidez (%)					Total
	C1	C2	C3	C4	C5	
S4	1.86	-7.24	-0.93	-3.53	-6.68	
	-5.41	-9.01	-8.11	-7.21	-9.01	
	2.23	0.10	-1.21	1.62	-3.24	
Média	-0.44	-5.38	-3.42	-3.04	-6.31	-3.72

Fonte: própria do autor

Analisando os dados da Tabela 5-3, Tabela 5-4, Tabela 5-5 e Tabela 5-6 observa-se que a eficiência média de remoção da turbidez do esgoto sanitário bruto,

quando utilizadas as soluções de *Cereus jamacaru* como coagulante principal, foi muito baixa e em alguns ela foi negativa.

Os melhores desempenhos foram observados quando foi utilizada a solução S1 (0.73%) e S2 (0.76%), as quais a extração do polímero coagulante foi realizada com solução aquecida, sendo que a solução S1 é ácida. De acordo com Van Buren (1991), as pectinas que são extraídas com soluções alcalinas ou com soluções ácidas aquecidas são classificadas como originária de protopectinas.

Analisando os resultados obtidos por Zara; Thomazini; Lenz (2012) no tratamento de água (ver Tabela 5-7), ao testarem a eficiência do polímero coagulante extraído do *Cereus jamacaru* associado ao sulfato de alumínio, verifica-se que os melhores resultados foram alcançados quando foi utilizada solução alcalina que também é recomendada para fazer a extração de pectina da protopectina. Na Tabela 5-7, todavia vê-se que a diferença percentual entre o valor obtido entre a eficiência de remoção de turbidez utilizando apenas o coagulante de sulfato de alumínio (88%) e o coagulante de sulfato de alumínio associado as soluções de *Cereus jamacaru* (com os diferentes tipos de solução extratora utilizada) é muito baixa, resultados estes que vão ao encontro dos que foram obtidos neste trabalho.

Em alguns volumes (C1, C2 e C3) a solução coagulante S3 (que usou uma solução extratora ácida e não aquecida) apresentou uma eficiência de remoção de turbidez baixa, porém positiva, enquanto que a solução S4 (que utilizou apenas água no processo de extração da pectina) teve eficiência de remoção de turbidez negativa, acompanhando os resultados encontrados por Zara; Thomazini; Lenz (2012).

Tabela 5-7 - Eficiência de remoção de turbidez de água bruta

Matéria-prima	Solução extratora	Coagulante principal	Eficiência (%)
-	-		88
<i>Cereus jamacaru</i>	0.10 mol/L NaOH	1% sulfato de alumínio	93.5
	0.01 mol/L HCl (não aquecida)		91.1
	1 % NaCl		90.7
	0.10 mol/L HCl (não aquecida)		88.2
	Água destilada		28.1

Fonte: Adaptado de Zara; Thomazini; Lenz (2012)

Utilizando a estatística F a um nível de significância $\alpha=0.05$, foi analisado se não existe diferença significativa entre as médias dos tratamentos, ou seja, se o percentual médio de remoção de turbidez do esgoto é considerado estatisticamente igual para os diferentes tratamentos aplicados (C1, C2, C3, C4 e C5). Como pode ser observado na Tabela 5-8, Tabela 5-9, Tabela 5-10 e Tabela 5-11, essa hipótese não foi rejeitada em nenhuma das análises de variância, visto que $F_{calc.} < F_{tab.}$. Assim sendo, o percentual médio de remoção de turbidez do esgoto obtido entre os diferentes tratamentos aplicados com a mesma solução pode ser considerado estatisticamente igual, o que mostra que para esses casos estudados os diferentes volumes utilizados não interferiram na variável resposta.

Tabela 5-8 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S1 (turbidez)

Fontes de variação	S.Q.	G.L.	Q.M.	$F_{calc.}$	$F_{tab.}$
Tratamentos	2.81	4	0.70	0.02	3.48
Resíduo	374.91	10	37.49		
Total	377.72	14			

Fonte: própria do autor

Tabela 5-9 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S2 (turbidez)

Fontes de variação	S.Q.	G.L.	Q.M.	$F_{calc.}$	$F_{tab.}$
Tratamentos	36.99	4	9.25	0.09	3.48
Resíduo	976.63	10	97.66		
Total	1013.62	14			

Fonte: própria do autor

Tabela 5-10 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S3 (turbidez)

Fontes de variação	S.Q.	G.L.	Q.M.	$F_{calc.}$	$F_{tab.}$
Tratamentos	98.78	4	24.69	0.30	3.48
Resíduo	809.74	10	80.97		
Total	908.51	14			

Fonte: própria do autor

Tabela 5-11 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S4 (turbidez)

Fontes de variação	S.Q.	G.L.	Q.M.	$F_{calc.}$	$F_{tab.}$
Tratamentos	62.31	4	15.58	0.90	3.48
Resíduo	172.91	10	17.29		
Total	235.22	14			

Fonte: própria do autor

Para verificar se o método de extração da pectina foi relevante para o desempenho da solução de mandacaru quando utilizada como coagulante principal para remover a turbidez do esgoto sanitário, o experimento foi organizado em blocos (Tabela 5-12) e foi feita a análise de variância simultânea do efeito causado pelo método de extração da pectina e do volume utilizado (Tabela 5-13).

Tabela 5-12 - Experimento em blocos ao acaso com repetições (turbidez)

Blocos	Remoção de turbidez (%)					Total
	C1	C2	C3	C4	C5	
1	-2.33	-0.93	-5.44	-5.44	-9.02	11.02
	3.23	7.43	6.23	5.99	9.34	
	1.36	-2.10	-0.37	1.86	1.24	
2	9.89	6.23	13.19	6.96	8.79	11.46
	3.13	-2.12	4.75	6.27	3.54	
	-12.56	-9.95	-10.31	-7.58	-8.77	
3	9.76	8.29	7.92	7.37	5.89	-21.31
	-3.47	-0.53	2.14	-8.95	-4.27	
	-2.54	-6.77	-8.88	-12.05	-15.22	
4	1.86	-7.24	-0.93	-3.53	-6.68	-55.76
	-5.41	-9.01	-8.11	-7.21	-9.01	
	2.23	0.10	-1.21	1.62	-3.24	
Total	5.16	-16.62	-1.03	-14.70	-27.41	-54.59
Média	0.43	-1.38	-0.09	-1.22	-2.28	-0.91

Fonte: própria do autor

Utilizando a estatística F a um nível de significância $\alpha=0.05$, o resultado da análise de variação ratifica que o volume de solução utilizado (C1, C2, C3, C4 e C5) não interferiu na variável resposta (percentual de remoção de turbidez) e mostrou que também não há diferença significativa ($p>0.05$) entre as médias dos blocos, ou seja, entre o percentual médio de remoção de turbidez do esgoto entre as diferentes soluções (S1, S2, S3 e S4).

Tabela 5-13 - ANOVA em blocos ao acaso com repetições (turbidez)

Fontes de variação	S.Q.	G.L.	Q.M.	$F_{calc.}$	$F_{tab.}$
Tratamentos	56.23	4	14.06	0.29	2.55
Blocos	204.72	3	68.24	1.43	2.78
Resíduos	2478.84	52	47.67		
Total	2739.79	59			

Fonte: própria do autor

Neste trabalho, não foram realizados testes de coagulação e floculação do esgoto sanitário bruto utilizando o polímero coagulante extraído do *Cereus jamacaru* associado ao sulfato de alumínio, mas foi realizado um teste utilizando apenas sulfato de alumínio (resultado da turbidez e da eficiência de remoção apresentados respectivamente na Tabela 5-14 e Tabela 5-15) com a finalidade de comparar a eficiência dele com as soluções coagulantes de *Cereus jamacaru*. A partir dos resultados obtidos quando utilizado apenas o sulfato de alumínio como coagulante principal, onde a eficiência mínima de remoção de turbidez foi de 51.39%, vemos como o uso das soluções coagulantes de *Cereus jamacaru* foram ineficazes, nas condições estudadas, como coagulante principal.

Tabela 5-14 - Valores medidos de Turbidez

Turbidez, NTU						
Coagulante, mg/L	C0	C1	C2	C3	C4	C5
	0	50	65	80	90	100
Sulfato de alumínio	47.6	26.2	18.6	12.2	9.0	7.2

Fonte: própria do autor

Tabela 5-15 - Percentual de remoção de turbidez utilizando sulfato de alumínio como coagulante

Coagulante	Remoção de turbidez (%)				
	C1	C2	C3	C4	C5
Sulfato de alumínio	51.39	65.49	77.37	83.36	86.73

Fonte: própria do autor

A partir dos dados obtidos na Tabela 5-2 foi calculado o percentual de remoção de fósforo total, e os valores resultantes foram organizados por tipo de solução utilizada nos testes e apresentados na Tabela 5-16, Tabela 5-17, Tabela 5-18 e Tabela 5-19. Analisando esses dados observa-se que a eficiência média de remoção de fósforo total do esgoto sanitário bruto, quando utilizadas as soluções de *Cereus jamacaru* como coagulante principal, com exceção da solução S4, foi negativa, ou seja, ocorreu um acréscimo de fósforo nas amostras de esgoto sanitário bruto. A não remoção do fósforo contido no esgoto sanitário bruto era esperada devido ao fato de que as soluções de *Cereus jamacaru* não foram eficazes na remoção de turbidez quando utilizadas como coagulante principal. Essa situação é explicada pelo fato de que a turbidez é devida à presença de matéria particulada em suspensão, tal como

matéria orgânica e inorgânica finamente dividida (HELLER; PADUA, 2006, p. 194) as quais o fósforo no esgoto sanitário, em forma de fosfatos, apresenta-se ligado, segundo Von Sperling; Andrade Neto; Volschan Júnior *et al.* (2009, p. 30). Todavia, não era esperado que houvesse um acréscimo de fósforo nas amostras de esgoto sanitário bruto. Esse acréscimo pode ser devido à liberação de fósforo presente na planta, (já que os produtores assimilam o fósforo do solo ou da água na forma de fosfato e o incorporam diretamente em seus vários compostos orgânicos (RICKLEFS, 2010, p. 441)), durante o processo de extração da pectina. Observa-se que a única amostra de esgoto que não apresentou eficiência média de remoção de fósforo negativa foi a que utilizou como coagulante a solução S4, que utilizou apenas água deionizada no processo de extração da pectina.

Tabela 5-16 - Percentual de remoção de fósforo total utilizando a solução S1 como coagulante

Coagulante	Remoção de fósforo total (%)					Total
	C1	C2	C3	C4	C5	
S1	-8.11	-6.25	-12.11	-14.39	-10.72	
	3.01	1.28	1.97	-0.59	-0.34	
	-0.28	-0.50	-0.71	-0.36	-3.20	
Média	-1.79	-1.82	-3.62	-5.11	-4.75	-3.42

Fonte: própria do autor

Tabela 5-17 - Percentual de remoção de fósforo total utilizando a solução S2 como coagulante

Coagulante	Remoção de fósforo total (%)					Total
	C1	C2	C3	C4	C5	
S2	-0.34	1.72	-2.48	-7.46	-3.30	
	-0.44	-3.26	0.64	0.34	5.29	
	-3.26	-6.33	-6.14	-6.06	-10.08	
Média	-1.35	-2.62	-2.66	-4.39	-2.70	-2.74

Fonte: própria do autor

Tabela 5-18 - Percentual de remoção de fósforo total utilizando a solução S3 como coagulante

Coagulante	Remoção de fósforo total (%)					Total
	C1	C2	C3	C4	C5	
S3	2.47	-0.44	-3.57	-4.33	-0.54	
	-0.71	1.07	-0.43	8.24	1.35	
	-3.90	-6.66	-6.72	-5.96	-3.18	
Média	-0.71	-2.01	-3.57	-0.68	-0.79	-1.55

Fonte: própria do autor

Tabela 5-19 - Percentual de remoção de fósforo total utilizando a solução S4 como coagulante

Coagulantes	Remoção de fósforo total (%)					Total
	C1	C2	C3	C4	C5	
S4	1.02	0.84	-1.83	15.62	13.91	
	1.38	0.99	-1.30	-2.84	-1.98	
	1.49	-0.39	-2.39	-3.10	-1.76	
Média	1.30	0.48	-1.84	3.22	3.39	1.31

Fonte: própria do autor

Para verificar se as soluções coagulantes de *Cereus jamacaru* agregaram fósforo nas amostras de esgoto bruto, foram realizados novos testes onde o esgoto foi substituído por água deionizada. Os resultados, apresentados na Tabela 5-20, mostram que há um acréscimo de fósforo nas amostras de água conforme é aumentado o volume de coagulante utilizado no teste, o que pode justificar o aumento de fósforo total no esgoto tratado com as soluções coagulante de *Cereus jamacaru* (S1, S2 e S3).

Tabela 5-20 - Valores medidos de fósforo total

Coagulante, mL	Concentração de fósforo total, mg/L				
	C1	C2	C3	C4	C5
	5	7.5	10	15	20
S1	0.30	0.31	0.34	1.40	0.57
S2	0.38	0.60	0.88	2.11	1.92
S3	0.48	0.68	0.88	1.27	1.49
S4	0.42	0.77	1.04	1.57	1.90

Fonte: própria do autor

A partir dos resultados obtidos quando utilizado apenas o sulfato de alumínio como coagulante principal (ver Tabela 5-22 e Tabela 5-23), onde a eficiência mínima de remoção de fósforo total foi de 17.07%, ratificamos como o uso das soluções coagulantes de *Cereus jamacaru* foram ineficazes, nas condições estudadas, como coagulante principal.

Tabela 5-21 - Valores medidos de fósforo total

Coagulante, mg/L	Concentração de fósforo total, mg/L					
	C0	C1	C2	C3	C4	C5
	0	50	65	80	90	100
Sulfato de alumínio	18.90	15.91	12.48	8.63	5.97	4.04

Fonte: própria do autor

Tabela 5-22 - Percentual de remoção de fósforo total utilizando sulfato de alumínio como coagulante

Coagulante	Tratamentos				
	C1	C2	C3	C4	C5
Sulfato de alumínio	17.07	34.94	54.99	68.89	78.92

Fonte: própria do autor

Como pode ser observado na Tabela 5-24, Tabela 5-25, Tabela 5-26 e Tabela 5-27, a hipótese nula (H_0) não foi rejeitada em nenhuma das análises de variância, visto que. $F_{calc} < F_{tab}$. Assim sendo, o percentual médio de remoção de fósforo total do esgoto obtido entre os diferentes tratamentos aplicados (C1, C2, C3, C4 e C5) com a mesma solução de mandacaru pode ser considerado estatisticamente igual.

Tabela 5-23 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S1 (fósforo total)

Fontes de variação	S.Q.	G.L.	Q.M.	$F_{calc.}$	$F_{tab.}$
Tratamentos	29.56	4	7.39	0.19	3.48
Resíduo	394.66	10	39.47		
Total	424.22	14			

Fonte: própria do autor

Tabela 5-24 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S2 (fósforo total)

Fontes de variação	S.Q.	G.L.	Q.M.	$F_{calc.}$	$F_{tab.}$
Tratamentos	14.10	4	3.52	0.16	3.48
Resíduo	214.87	10	21.49		
Total	228.97	14			

Fonte: própria do autor

Tabela 5-25 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S3 (fósforo total)

Fontes de variação	S.Q.	G.L.	Q.M.	$F_{calc.}$	$F_{tab.}$
Tratamentos	19.00	4	4.75	0.23	3.48
Resíduo	204.69	10	20.47		
Total	223.69	14			

Fonte: própria do autor

Tabela 5-26 - ANOVA dos diferentes tratamentos com a solução S4 (fósforo total)

Fontes de variação	S.Q.	G.L.	Q.M.	$F_{calc.}$	$F_{tab.}$
Tratamentos	55.73	4	13.93	0.35	3.48
Resíduo	398.11	10	39.81		
Total	453.84	14			

Fonte: própria do autor

O experimento também foi organizado em blocos (Tabela 5-28) para viabilizar a análise de variância simultânea do efeito causado pelo método de extração da pectina e do volume utilizado (Tabela 5-29) sobre o percentual de fósforo total removido do esgoto sanitário.

Tabela 5-27 - Experimento em blocos ao acaso com repetições (fósforo total)

Blocos	Remoção de fósforo total (%)					Total
	C1	C2	C3	C4	C5	
1	-8.11	-6.25	-12.11	-14.39	-10.72	-51.28
	3.01	1.28	1.97	-0.59	-0.34	
	-0.28	-0.50	-0.71	-0.36	-3.20	
2	-0.34	1.72	-2.48	-7.46	-3.30	-41.17
	-0.44	-3.26	0.64	0.34	5.29	
	-3.26	-6.33	-6.14	-6.06	-10.08	
3	2.47	-0.44	-3.57	-4.33	-0.54	-23.31
	-0.71	1.07	-0.43	8.24	1.35	
	-3.90	-6.66	-6.72	-5.96	-3.18	
4	1.02	0.84	-1.83	15.62	13.91	19.67
	1.38	0.99	-1.30	-2.84	-1.98	
	1.49	-0.39	-2.39	-3.10	-1.76	
Total	-7.67	-17.92	-35.07	-20.89	-14.54	-96.09
Média	-0.64	-1.49	-2.92	-1.74	-1.21	-1.60

Fonte: própria do autor

Utilizando a estatística F a um nível de significância $\alpha=0.05$, o resultado da análise de variação ratifica que o volume de solução utilizado como coagulante principal não interferiu na variável resposta (percentual de remoção de fósforo total) e mostrou que também não há diferença significativa entre as médias dos blocos, ou seja, entre o percentual médio de remoção de fósforo total do esgoto entre as diferentes soluções.

Tabela 5-28 - ANOVA em blocos ao acaso com repetições (fósforo total)

Fontes de variação	S.Q.	G.L.	Q.M.	$F_{calc.}$	$F_{tab.}$
Tratamentos	34.26	4	8.56	0.34	2.55
Blocos	196.43	3	65.48	2.63	2.78
Resíduos	1296.46	52	24.93		
Total	1527.15	59			

Fonte: própria do autor

Um outro parâmetro que afeta a eficiência da remoção de partículas coloidais é o potencial zeta delas. O potencial zeta ou ponto de carga zero (pH_{zpc}) do polímero presente no extrato de *Cereus jamacaru* foi determinado por Ansilago; Silva; Pereira *et al.* (2018), que encontraram um valor aproximado de 7.79, porém o polímero não foi identificado pelos autores e a técnica de extração utilizada por eles não é igual a nenhum dos métodos utilizados neste trabalho. Considerando que o potencial zeta do *Cereus jamacaru* seja igual a 7.79, verificou-se na Tabela 5-30 (na coluna denominada C0) que apenas o pH de três amostras de esgoto sanitário bruto utilizadas nos testes era aproximado a este valor. Analisando os resultados de eficiência de remoção de turbidez apresentados na Tabela 5-12 verifica-se que dessas três amostras (cujo C0 equivale a 7.80, 7.87 e 7.72), apenas a amostra cujo o pH era 7.80 e que foi tratada com solução coagulante S1 apresentou eficiência de remoção positiva. Porém, através deste parâmetro não foi possível chegar a nenhuma conclusão, pois há amostras com pH iguais (por exemplo o pH igual a 8.15), tratadas com a mesma solução coagulante e para uma a eficiência de remoção foi positiva e para outra não.

Tabela 5-29 - pH do esgoto após o ensaio com o Jar Test

Solução	pH					
	C0	C1	C2	C3	C4	C5
S1	8.15	7.21	6.98	6.75	6.45	6.10
	7.80	7.53	7.23	7.09	6.91	6.63
	8.10	7.59	7.42	7.25	6.98	6.74
S2	8.15	7.96	7.92	7.81	7.89	7.84
	8.15	8.03	7.99	7.87	7.84	7.87
	8.15	7.97	7.99	7.97	7.87	7.85
S3	8.15	6.99	6.95	6.73	6.51	6.21
	7.87	7.85	7.80	7.51	7.66	7.28
	7.72	7.82	7.78	7.53	7.38	7.30
S4	8.15	7.68	7.65	7.61	7.54	7.46
	8.83	8.81	8.82	8.83	8.82	8.82
	8.83	8.67	8.66	8.65	8.59	8.56

Fonte: própria do autor

6 CONCLUSÕES

Devido à baixa eficiência em remover a turbidez do esgoto sanitário bruto apresentada neste estudo pela cactácea *Cereus jamacaru*, não é recomendado que ela seja utilizada como coagulante principal.

A eficiência média da solução coagulante S3 e da S4 foi negativa (respectivamente -1.42% e -3.72%); porém, apesar de baixa, a eficiência média da solução S1 e S2 (respectivamente 0.73% e 0.76%) foi positiva, o que não a qualifica para ser utilizada como coagulante principal, mas pode vir a ser utilizada como coagulante auxiliar, assim como foi utilizada por Zara; Thomazini; Lenz (2012), com a finalidade de reduzir o uso de coagulantes inorgânicos ou polímeros sintéticos.

A solução S1 foi resultado da extração de pectina (polímero coagulante) do *Cereus jamacaru* utilizando uma solução acidificada aquecida e a solução S2 foi resultado da extração da pectina utilizando solução aquecida. Sendo essas soluções as que apresentaram o melhor resultado, com base na definição de Van Buren (1991), a pectina obtida é originada de protopectina.

O coagulante de *Cereus jamacaru*, além de não ser eficiente na remoção de fósforo do esgoto sanitário, agregou fósforo nas amostras testadas. O acréscimo de fósforo é atribuído a liberação de fósforo presente na planta durante o processo de extração da pectina.

Com base nos resultados e informações apresentados neste trabalho recomenda-se que em estudos futuros seja feita a classificação qualitativa e quantitativa dos polímeros presentes nos cladódios do *Cereus jamacaru*, esses dados são fundamentais para dar subsídios técnicos com o objetivo de escolher a metodologia mais indicada para realizar e otimizar a extração da pectina. Também sugere-se avaliar se os benefícios obtidos ao usar a pectina extraída do *Cereus jamacaru* como coagulante (auxiliar) compensa os custos para fazer a extração.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSILAGO, M.; SILVA, L. A.; PEREIRA, N. S. *et al.* Determinação do ponto de carga zero de biopolímeros flocculantes de biomassa algal. *In: SIMPÓSIO CIENTÍFICO SOBRE RECURSOS NATURAIS*, 2., 2018, Dourados. **Resumos** [...]. Dourados: Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, 2018. Disponível em:

http://eventos.sistemas.uems.br/assets/uploads/eventos/279d95c879e48101c4aa753ef42570f4/programacao/4_2018-08-10_13-41-15.pdf. Acesso em: 2 abr. 2019.

APHA, A. P. H. A.; AWWA, A. W. W. A.; WEF, W. E. F. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. [S.l.]: American Public Health Association, 1998. 1220 p.

ATKINS, P. W.; DE PAULA, J. **Físico-química**. Tradução: Edilson Clemente da Silva, Márcio José Estillac de Mello Cardoso, Marco Antônio França Faria et. al. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 436 p.

BARTHLOTT, W.; HUNT, D. R. Cactacea. *In: KUBITZKI, K.; ROHWER, J.G.; BITTRICH, V. (org.). The families and genera of vascular plants: flowering plants: dicotyledons, magnoliid, hamamelid and caryophyllid families*. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1993. p. 161-197.

BRAGA, B. *et al.* **Introdução à engenharia ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 335 p.

BRATBY, J. **Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment**. 2. ed. London: IWA, 2006. 450 p.

CALLIARI, C. M. **Extração térmica, química e enzimática de pectina de bagaço de laranja**. 2004. 89 f. Dissertação (Mestrado em Ciências de Alimentos) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2004. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.uel.br/document/?code=vtls000100111>. Acesso em: 26 mar. 2019.

CANTERI, M. H. G.; MORENO, L.; WOSIACKI *et al.* Pectina: da matéria-prima ao produto final. **Polímeros**, São Carlos, v. 22, n. 2, p. 149-157, Abr. 2012. DOI 10.1590/S0104-14282012005000024. Disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-14282012000200009&lng=pt&nrm=iso. Acessos em 30 mar. 2019.

CAVALCANTI, M. B. D.; RIBEIRO FILHO, N. M.; DIAS, S. L. *et al.* Avaliação nutricional do mandacaru com e sem espinhos. *In: Congresso Norte-Nordeste de Química*, 2., 2008, João Pessoa. **Resumos** [...]. João Pessoa: CEFET-PB, 2008. Disponível em: <http://www.annq.org/congresso2008/resumos/Resumos/T50.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2019.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo 2017**. São Paulo: CETESB, 2018, 301 p. Disponível em: <http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/publicacoes-e-relatorios/>. Acesso em: 6 mai. 2019.

CHAN, S.-Y.; CHOO, W.-S. Effect of extraction conditions on the yield and chemical properties of pectin from cocoa husks. **Food Chemistry**, [S.l.], v. 141, n. 4, p. 3752-3758, Dez. 2013. DOI 10.1016/J.FOODCHEM.2013.06.097. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308814613008741>. Acesso em: 11 nov. 2019.

CHOY, S. Y.; PRASAD, K. M. N.; WU, T. Y. *et al.* Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. **Journal of Environmental Sciences (China)**, [S.l.], v. 26, n. 11, p. 2178-2189, Nov. 2014. DOI 10.1016/j.jes.2014.09.024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jes.2014.09.024>. Acesso em: 30 ago. 2019.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 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**: Brasília, DF, p. 58-63, 18 mar. 2005.

CONSEMA - Conselho Estadual do Meio Ambiente. Resolução CONSEMA nº 355/2017. Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. **Diário Oficial do Estado**: Porto Alegre, RS, 19 jul. 2017.

CORDELL, D.; DRANGERT, J.-O.; WHITE, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, [S.l.], v. 19, n. 2, p. 292-305, Maio 2009. DOI 10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095937800800099X>. Acesso em: 8 nov. 2019.

CORREIA, D.; COELHO, P. J. A.; NASCIMENTO, E. H. S. *et al.* Introdução e multiplicação de mandacaru sem espinho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RECURSOS GENÉTICO, 2010, Salvador. **Resumos** [...]. Salvador: Sociedade Brasileira de Recursos Genéticos, 2010. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/34460/1/RE10069.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2019.

CORREIA, D.; SILVA, I. C.; NASCIMENTO, E. H. S. *et al.* **Produção de mudas de Mandacaru**. 1. ed. Fortaleza: [s.n.], 2012. 6 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/77711/1/CIT12002.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2019.

CORREIA, D.; SILVA, I. C.; MARQUES, K. C. *et al.* Crescimento de mandacaru em diferentes substratos em tubetes. **Ornamental Horticulture**, Goiás, v. 13, p. 151, Jun. 2019. DOI 10.14295/oh.v13i0.1277. Disponível em: <https://ornamentalhorticulture.emnuvens.com.br/rbho/article/view/1277>. Acesso em: 1 set. 2019.

DEZOTTI, M. **Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos**. Rio de Janeiro: E-papers, 2008. 360 p.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. **Economia mineral do Brasil**. Brasília-DF: DNPM, 2009. 764 p. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-2-fosfato>. Acesso em: 2 nov. 2017.

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. São Paulo: Elsevier Brasil, 2013. 832 p.

EL-NAWAWI, S. A.; SHEHATA, F. R. Extraction of pectin from Egyptian orange peel. Factors affecting the extraction. **Biological Wastes** [S.l.], v. 20, n. 4, p. 281-290, 1987. DOI 10.1016/0269-7483(87)90005-X. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/026974838790005X>. Acesso em: 2 set. 2019.

FOX, D. I.; STEBBINS, D. M.; ALCANTAR, N. A. Combining ferric salt and cactus mucilage for arsenic removal from water. **Environmental Science & Technology**, [S.l.], v. 50, n. 5, p. 2507-2513, Mar. 2016. DOI 10.1021/acs.est.5b04145. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.5b04145>. Acesso em: 9 nov. 2019.

GARCÍA, G. N.; GARCÍA, S. N. **Sustancias pécticas: química y aplicaciones**. Madri: EDITUM, 1985. 80 p.

HELLER, L. E. O.; DE PADUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. Belo Horizonte: UFMG, 2006. 860 p.

KERTESZ, Z. I. **The pectic substances**. New York: Interscience, 1951. 628 p.

KIESLING, R. Cactaceas de la Argentina promisorias agronomicamente. **J. PACD.**, [S.l.], v. 4, p. 11-14, Jan. 2001. Disponível em: <http://jpacd.org/?modulo=JS&ID=5>. Acesso em: 1 set. 2019.

KRATCHANOVA, M.; PANCHEV, I.; PAVLOVA, E. *et al.* Extraction of pectin from fruit materials pretreated in an electromagnetic field of super-high frequency. **Carbohydrate Polymers**, [S.l.], v. 25, n. 3, p. 141-144, 1994. DOI 10.1016/0144-8617(94)90197-X. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/014486179490197X>. Acesso em: 2 set. 2019.

LOZANO, K. P. C.; MENDOZA, J. Y. A.; MENDOZA, G. S. *et al.* Nopal (*Opuntia ficus-indica*) as a complementary natural coagulant to clarify water. **Rev.P + L**, Caldas, v. 10, n. 1, p. 40-50, Jan. 2015. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000100004&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 10 nov. 2019.

MANAHAN, S. E. **Química ambiental**. 9. ed. Porto Alegre: Bookman , 2016. 944 p.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **A natureza e os polímeros**. São Paulo: EDGARD BLUCHER, 2013. 420 p.

MELO, J. M. D. **Aplicação de polímero orgânico extraído do cacto (*Cereus jamacaru*) como coagulante principal e associado ao sulfato de alumínio no tratamento de água**. 2017. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina. 2017. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8001>. Acesso em: 2 abr. 2019.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. Tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 2008 p.

MILLER, S. M.; FUGATE, E. J.; CRAVER, V. O. *et al.* Toward understanding the efficacy and mechanism of opuntia spp. as a natural coagulant for potential application in water treatment. **Environ. Sci. Technol.**, [S.l.], v. 42, n. 12, p. 4274-4279, Jun. 2008. DOI 10.1021/es7025054. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es7025054>. Acesso em: 1 set. 2019.

MORAIS, D. D. S. C. **Avaliação das atividades antioxidantes e citotóxicas de extratos ricos em polissacarídeos extraídos das hastes de mandacaru (*Cereus jamacaru de candolle*, Cactaceae)**. 2013. 65 f. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12618> . Acesso em: 17 set. 2018.

MUNHOZ, C. L.; SANJINEZ-ARGANDOÑA, E. J.; SOARES-JÚNIOR, M. S. Extração de pectina de goiaba desidratada. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v. 30, n. 1, p. 119-125, Mar. 2010. DOI 10.1590/S0101-20612010005000013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-20612010000100018&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 12 nov. 2019.

NARASIAH, K. S.; VOGEL, A.; KRAMADHATI, N. N. Coagulation of turbid waters using moringa oleifera seeds from two distinct sources. **Water Science and Technology: Water Supply**, [S.l.], v. 2, p. 83-88, Dez. 2002. DOI 10.2166/ws.2002.0154. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article/2/5-6/83/25767/Coagulation-of-turbid-waters-using-Moringa>. Acesso em: 30 ago. 2019.

NETZ, P. A.; ORTEGA, G. G. **Fundamentos de físico-química: uma abordagem conceitual para as ciências farmacêuticas**. Porto Alegre: Bookman, 2014. 296 p.

NHARINGO, T.; ZIVURAWA, M. T.; GUYO, U. Exploring the use of cactus *Opuntia ficus-indica* in the biocoagulation–flocculation of Pb(II) ions from wastewaters. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [S.l.], v. 12, n. 12, p. 3791-3802, Dez. 2015. DOI 10.1007/s13762-015-0815-0. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s13762-015-0815-0>. Acesso em: 9 nov. 2019.

ORTIZ, Á. V.; ASTUDILLO, I. C. P.; GARCÍA, J. M. Characterization of *Opuntia ficus-indica* for using as a natural coagulant. **Rev. colomb. biotecnol.**, Bogotá, v. 15, n. 1, p. 137-144, 2013. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752013000100014&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 10 nov. 2019.

OSTROWSKI, J. **Utilização de extrato de cacto *Cereus jamacaru* como coagulantes auxiliares para a diminuição de turbidez da água de turbidez sintética**. 2014. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Processos Químicos) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, 2014. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/6229> . Acesso em: 22 mar. 2019.

PAGÁN, J.; IBARZ, A.; LLORCA, M. *et al.* Extraction and characterization of pectin from stored peach pomace. **Food Research International**, [S.l.], v. 34, n. 7, p. 605-612, Jan. 2001. DOI 10.1016/S0963-9969(01)00078-3. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963996901000783>. Acesso em: 11 nov. 2019.

RICKLEFS, R. E. **A economia da natureza**. 6. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010. 546 p.

SILVA, L. R.; ALVES, R. E. Caracterização físico-química de frutos de “mandacaru”. **Revista Acadêmica: Ciência Animal**, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 199, Abr. 2009. DOI 10.7213/cienciaanimal.v7i2.9894. Disponível em : <https://periodicos.pucpr.br/index.php/cienciaanimal/article/view/9894>. Acesso em: 1 set. 2019.

VIRTUOUS TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO. "Parede celulósica" em **Só Biologia**. 2008 - 2019. 1 ilustração. Disponível em: <https://www.sobiologia.com.br/conteudos/Citologia/cito4.php>. Acesso em: 15 ago. 2019.

SOUSA, K. M. L. D. **Estudo dos coagulantes naturais *Cereus jamacaru*, *Opuntia ficus-indica* e *Pilosocereus gounellei* como pré-tratamento para desinfecção solar**. 2019. 44 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Licenciatura em Química) - Unidade Acadêmica de Serra Talhada, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Serra Talhada, 2019. Disponível em: <http://hdl.handle.net/123456789/1315>. Acesso em: 10 nov. 2019.

TAIZ, L; ZEIGER, E.; MØLLER, I.M. *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TUNDISI, J. G.; MATSUMURA-TUNDISI, T. **Recursos hídricos no século XXI**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 328 p.

VAN BUREN, J. P. Function of pectin in plant tissue structure and firmness. *In*: TAYLOR, S. T.; KINSELLA, J. E; ARCHER, D. *et al.* (org.). **The Chemistry and Technology of Pectin**. San Diego: Academic Press, 1991. cap. 2 , p. 1-22.

VAN KAUWENBERGH, S. J.; STEWART, M.; MIKKELSEN, R. World reserves of phosphate rock-a dynamic and unfolding story. **Better Crops**, [S.l.], v. 97, n. 3, p. 18-20, Jan. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/288635988_World_reserves_of_phosphate_rock-a_dynamic_and_unfolding_story. Acesso em: 8 nov. 2019.

VIJAYARAGHAVAN, G.; SIVAKUMAR, T. . V. K. Application of plant based coagulants for waste water treatment. **Int. J. Adv. Eng. Res. Stud.**, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 88-92, Jan. 2011. Disponível em: <http://www.technicaljournalsonline.com/ijaers/VOL%20I/IJAERS%20VOL%20I%20ISSUE%20I%20%20OCTBER%20DECEMBER%202011/18%20IJAERS.pdf>. Acesso em: 16 mai. 2019.

VON SPERLING, M.; ANDRADE NETO, C. O.; VOLSCHAN JÚNIOR, I.; FLORÊNCIO, L. Impacto dos nutrientes do esgoto lançado em corpos de água. In: MOTA, S. B.; VON SPERLING, M. (org.). **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES RJ, 2009. cap. 2, p. 26-51.

XU, Y.; ZHANG, L; BAILINA, Y. *et al.* Effects of ultrasound and/or heating on the extraction of pectin from grapefruit peel. **Journal of Food Engineering**, [S.l.], v. 126, p. 72-81, Abr. 2014. DOI 10.1016/J.JFOODENG.2013.11.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0260877413005724>. Acesso em: 12 nov. 2019.

ZANELLA, K. **Extração da pectina da casca da laranja-pera (*Citrus sinensis* L. Osbeck) com solução diluída de ácido cítrico**. 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado em engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/266586>. Acesso em: 22 mar. 2019.

ZARA, R. F.; THOMAZINI, M. H.; LENZ, G. F. Estudo da eficiência de polímero natural extraído do cacto mandacaru (*Cereus jamacaru*) como auxiliar nos processos de coagulação e floculação no tratamento de água. **REA**, Blumenau, v. 4, n. 2, p. 75-83, 2012. DOI 10.7867/1983-1501.2012v14n2p75-83. Disponível em: <http://proxy.furb.br/ojs/index.php/rea/article/view/2935>. Acesso em: 2 abr. 2019.