



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

EDILVAN EXPEDITO DE SOUSA

ADSORÇÃO DA POLIACRILAMIDA EM SOLO COM CARÁTER
COESO EM TABULEIRO COSTEIRO PERNAMBUCANO

RECIFE-PE
JUNHO/2023

EDILVAN EXPEDITO DE SOUSA

ADSORÇÃO DA POLIACRILAMIDA EM SOLO COM
CARÁTER COESO EM TABULEIRO COSTEIRO
PERNAMBUCANO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal Rural de Pernambuco, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental, Área de concentração, Tecnologia e Gestão do Meio Ambiente – Controle e Remediação da Poluição.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Cartaxo Rolim Neto.

Coorientador: Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida.

RECIFE-PE

JUNHO/2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S725a

Sousa, Edilvan Expedito de

Adsorção da poliacrilamida em solo com caráter coeso em Tabuleiro Costeiro pernambucano / Edilvan Expedito de Sousa. - 2023.

65 f. : il.

Orientador: Fernando Cartaxo Rolim Neto.

Coorientador: Brivaldo Gomes de Almeida.

Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, , Recife, 2023.

1. Dinâmica de Solutos. 2. Meio Ambiente. 3. Física do Solo. 4. Cinética. 5. Isotermas de adsorção. I. Neto, Fernando Cartaxo Rolim, orient. II. Almeida, Brivaldo Gomes de, coorient. III. Título

CDD

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e determinação para me guiar, tornando possível lutar por todas as etapas dessa conquista com saúde e responsabilidade.

À minha família, a base de tudo, principalmente meus pais, meus irmãos, minha noiva, meus sobrinhos e minhas cunhadas, por todos os ensinamentos, valores, incentivos, apoio e confiança em mim.

Ao meu orientador, o Professor Dr. Fernando Cartaxo Rolim Neto, pelos conhecimentos científicos transmitidos, por sua amizade, pelos ensinamentos profissionais e pessoais, pela confiança e paciência durante o curso de Mestrado.

Ao meu coorientador, Professor Dr. Brivaldo Almeida, pelos ensinamentos e todo suporte necessário para realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. André Maciel Netto, pela amizade, pelos ensinamentos e por sua imensa colaboração para execução deste trabalho.

Ao Instituto Federal Sertão Pernambucano, especialmente os colegas de trabalho do Campus Salgueiro, e aos amigos da coordenação de Agropecuária, por ter dado todo suporte e concedido meu afastamento das atividades laborais, possibilitando realizar minha capacitação com mais tranquilidade.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, seu corpo docente e demais funcionários, por todo suporte e estrutura na minha formação acadêmica, Graduação e Mestrado.

Aos docentes da UFRPE, em especial, os do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, e aos técnicos administrativos, pela amizade, ensinamentos e colaboração.

Aos colegas discentes, a maioria conhecidos apenas virtualmente, durante nossas aulas online, outros pessoalmente durante o desenvolvimento da pesquisa, em especial o Arnaldo, pelas contribuições importantes e as amizades conquistadas durante esse ciclo.

Por fim, agradeço a todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização do presente trabalho.

SOUSA, Edilvan Expedito de. Adsorção da poliacrilamida em solo com caráter coeso em Tabuleiro Costeiro pernambucano. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2023.

RESUMO

Solos coesos ou com caráter coeso, são solos que apresentam horizontes ou camadas subsuperficiais endurecidas quando secos, possuem estrutura geralmente maciça, entretanto, quando umedecidos, retornam rapidamente ao seu estado friável. Solos com tais características são muito utilizados na agricultura, porém, por limitarem o aprofundamento de raízes, provocam redução na absorção de água e nutrientes pelas plantas. Para atenuar tal problema, polímeros artificiais, tal como a poliacrilamida (PAM), vêm sendo utilizados como condicionadores de solo, sendo necessário um melhor entendimento da movimentação desses polímeros ao longo do perfil do solo. Este trabalho teve como objetivo avaliar e compreender os parâmetros de transporte e mecanismos de adsorção da molécula de PAM em solo com horizonte coeso, localizado na Estação Experimental de Itapirema, Goiana – PE. Foram realizadas coletas de amostras de solo, deformadas e indeformadas, em um perfil de solo, nos horizontes A, E, BE e Bt. Em laboratório foram feitos ensaios em lotes de equilíbrio, de cinética e de isotermas de adsorção. Utilizou-se nos ensaios de cinética a poliacrilamida na concentração de 200 mg L⁻¹, em diferentes tempos de contato com 5, 15, 30, 60, 120, 360, 720, 1440 e 2880 minutos. Para os ensaios de isotermas de adsorção, foram realizados dois tratamentos, o solo na condição natural de campo e o solo com extração de agentes cimentantes do solo (Si, Fe e Al). As concentrações de PAM para esse ensaio foram de 10, 20, 30, 50, 70, 90, 120, 150 e 200 mg L⁻¹. Os modelos cinéticos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem foram adequados, variando melhor ajuste para cada horizonte. O modelo isotérmico de Sips foi o que teve melhor ajuste para todas as camadas de solos estudados e para os dois tratamentos. O tipo de adsorção que ocorreu entre a poliacrilamida e as amostras de solo evidenciou características de quimissorção. O solo na condição natural apresentou maior capacidade de adsorção e taxa de adsorção quando comparado aos solos extraídos os agentes cimentantes.

PALAVRAS-CHAVE: Dinâmica de Solutos; Meio Ambiente; Física do Solo; Cinética; Isotermas de adsorção.

SOUSA, Edilvan Expedito de. Adsorption of Polyacrylamide in soil with cohesive character in Pernambuco Coastal Tableland. Dissertation (Master in Environmental Engineering). Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2023.

ABSTRACT

Cohesive soils or soils with a cohesive character are soils that present horizons or hardened subsurface layers when dry, they have a generally massive structure, however, when moistened, they quickly return to their friable state. Soils with such characteristics are widely used in agriculture, however, by limiting the deepening of roots, they cause a reduction in the absorption of water and nutrients by plants. To mitigate this problem, artificial polymers, such as polyacrylamide (PAM), have been used as soil conditioners, requiring a better understanding of the movement of these polymers along the soil profile. This work aimed to evaluate and understand the transport parameters and adsorption mechanisms of the PAM molecule in soil with a cohesive horizon, located at the Experimental Station of Itapirema, Goiana – PE. Soil samples were collected, deformed and undisturbed, in a soil profile, in the horizons A, E, BE and Bt. In the laboratory, tests were carried out on equilibrium, kinetics and adsorption isotherms batches. Polyacrylamide was used in the kinetic tests at a concentration of 200 mg L⁻¹, at different contact times of 5, 15, 30, 60, 120, 360, 720, 1440 and 2880 minutes. For the adsorption isotherm tests, two treatments were carried out, the soil in the natural field condition and the soil with extraction of cementing agents from the soil (Si, Fe and Al). The MAP concentrations for this assay were 10, 20, 30, 50, 70, 90, 120, 150 and 200 mg L⁻¹. The pseudo-first and pseudo-second order kinetic models were adequate, varying the best fit for each horizon. The Sips isothermal model had the best fit for all soil layers studied and for the two treatments. The type of adsorption that occurred between polyacrylamide and soil samples showed chemisorption characteristics. The soil in the natural condition showed a higher adsorption capacity and adsorption rate when compared to soils extracted from cementing agents.

KEYWORDS: Solute Dynamics; Environment; Soil Physics; kinetics; Adsorption isotherms.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVOS.....	10
2.1 Geral.....	10
2.2 Específico.....	10
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	11
3.1 Solo com caráter coeso.....	11
3.2 Poliacrilamida.....	13
3.3 Agentes cimentantes do solo.....	15
3.4 Processo de adsorção.....	16
3.4.1 Cinética de adsorção.....	18
3.4.1.1 Modelo cinético de pseudo-primeira ordem.....	19
3.4.1.2 Modelo cinético de pseudo-segunda ordem.....	19
3.4.2 Isotermas de adsorção.....	20
3.4.2.1 Isoterma de Langmuir.....	21
3.4.2.2 Isoterma de Freundlich.....	22
3.4.2.3 Isoterma de Sips.....	23
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	24
4.1 Área de estudo e coletas das amostras dos solos.....	24
4.2 Análises químicas dos solos.....	26
4.3 Análises Físicas dos Solos.....	26
4.3.1 Ensaios granulométricos e densidade dos solos.....	26
4.3.2 Capacidade de campo e Porosidade total do solo (Pt).....	27
4.4 Preparo das soluções de PAM.....	28
4.5 Extração dos agentes cimentantes do solo.....	28
4.6 Determinação da concentração da PAM no solo.....	29
4.7 Ensaios de cinética de adsorção.....	30
4.8 Ensaios de isotermas de adsorção.....	31
4.9 Fator de Retardo (R) e Coeficiente de Partição (K_D).....	32
4.10 Análise estatística.....	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1 Características físicas e químicas do solo.....	35
5.2 Ensaios de adsorção.....	38
5.2.1 Estudo cinético com ajustes pelos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.....	38
5.2.2 Isotermas de adsorção.....	41
5.2.2.1 Tratamento com solo natural.....	41
5.2.2.2 Tratamento com Extração de Agentes Cimentantes do solo.....	44
5.2.2.3 Solo natural <i>Versus</i> Solo com extração de agentes cimentantes.....	48
5.2.2.4 Fator de Retardo (R).....	50
5.2.2.5 Coeficiente de Partição (K_D).....	52
6. CONCLUSÕES.....	55
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1. INTRODUÇÃO

Os solos coesos ocorrem ao longo da costa brasileira, localizados, principalmente, no Nordeste, desde o sul da Bahia até o estado do Maranhão, acompanhando o litoral (SILVA JÚNIOR *et al.*, 2006). No estado de Pernambuco, os solos coesos são encontrados na Zona da Mata de Pernambuco, áreas conhecidas por sua geografia denominada Tabuleiros Costeiros.

Esse atributo foi definido como diagnóstico do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) para designar um estado de coesão, sem cimentação aparente, que se manifesta quando o solo está seco e desaparece ou se torna bem menos expressivo quando o solo está úmido (EMBRAPA, 2006). O caráter coeso de um solo é um termo utilizado para classificar horizontes pedogenéticos subsuperficiais adensados e tal característica ocorre nos horizontes AB, BA, Bw e Bt, sendo eles muito resistentes à penetração de faca, apresentando consistência variando de muito duros a extremamente duros quando secos, e friáveis quando úmidos (Jacomine, 1996).

Esses horizontes apresentam densidade do solo com valores elevados, entre 1,5 a 1,8 g cm⁻³, e baixas, porosidade total, infiltração de água no solo, aeração e, conseqüentemente, redução no desenvolvimento vegetal. O efeito dessa coesão em relação às taxas de infiltração lentas podem resultar em alto escoamento, aumentando a possibilidade da erosão e perda da camada superficial, mais fértil, do solo. São necessárias mudanças no manejo que é aplicado ao solo, a exemplo da irrigação, devendo ser mais curta e frequente para atender às necessidades da cultura.

Solos com esses horizontes coesos também apresentam elevada resistência à penetração de raízes (RP), mesmo antes da planta chegar ao ponto de murcha permanente, quando o potencial mátrico do solo atinge - 1,5 MPa, ou seja, ainda existindo água no solo disponível para a planta, as raízes não se desenvolvem em consequência dessa alta resistência. Conforme Giarola e Silva (2002), o valor de 3 MPa, com relação à RP, é suficiente para impedir severamente, ou mesmo parar, o crescimento radicular e limitar a emergência de hipocótilos.

A Mata Norte pernambucana é uma região de grande importância socioeconômica e ambiental, por conta do seu potencial produtivo, especialmente na agricultura, com a cultura da cana-de-açúcar e seus derivados. Entretanto, parte dos solos localizados no ecossistema

dos Tabuleiros Costeiros possuem baixa qualidade física, em função da presença de horizontes coesos subsuperficiais (CORRÊA *et al.*, 2008), além de apresentarem outras restrições, sendo pobres em fertilidade natural e com pouca capacidade de armazenamento de água.

Na tentativa de atenuar os problemas ocasionados pelos solos com o caráter coeso, alguns manejos são aplicados, como práticas mecânicas e biológicas. Os usos de implementos agrícolas, tais como escarificador e subsolador, são algumas das práticas mecânicas utilizadas na tentativa de melhoria física dos solos coesos. A escarificação possibilita o rompimento das camadas adensadas do solo, sendo realizada a profundidades aproximadas de 35 cm da superfície, enquanto a subsolagem ocorre em profundidades superiores a 40 cm da superfície do solo. Porém, estas são práticas com elevado custo energético e alto custo de produção, podendo seus efeitos serem revertidos em pouco tempo, com a recomposição do adensamento anterior do solo (SEKI *et al.*, 2015).

Uma alternativa para melhoria da qualidade física de solos com horizontes adensados é a utilização de polímeros sintéticos, como por exemplo a poliacrilamida (PAM). A PAM é um polímero (aniônico, catiônico ou não iônico) de alto peso molecular, não tóxico ao ambiente, utilizado em aplicações industriais, perfuração de poços, tratamento de águas residuais como floculante, produção de papel e celulose (SEYBOLD, 1994, ABIDIN *et al.*, 2012). Ela é solúvel em água, com macromoléculas lineares de cadeia longa, formada por polimerização de monômeros de acrilamida, com baixa densidade de carga, sendo uma molécula que está no mercado desde 1995, com promessas de benefícios para o manejo do solo (SOJKA *et al.*, 2007).

O uso da PAM em Argissolo Amarelo Distrocoeso promoveu a redução da coesão, diminuindo a perda de solo por erosão e nutrientes por lixiviação, sendo benéfico ao meio ambiente, evitando a perda do solo, como também no impacto da eutrofização nos corpos hídricos (MARCELO, 2019). A poliacrilamida com o passar do tempo se degrada no ambiente, por meio de processos físicos, químicos e biológicos, sendo a degradação potencializada pela ação de raios ultravioletas (WEN *et al.* (2010); FREITAS *et al.* (2019)). Segundo Lopes *et al.* (2010), a concentração de sais na solução do solo afeta na eficiência desse polímero. Fatores como temperatura, pH também contribuem na deterioração, reduzindo sua capacidade de retenção e absorção de água. Apesar dos avanços das pesquisas no Brasil com o uso de PAM, e outros condicionadores de solos, na mitigação dos efeitos da

coesão, com melhorias das propriedades físicas do solo, destacando-se estudos desenvolvidos por Almeida (2008) e com colaboradores (MELO *et al.*, 2014; MARCELO *et al.*, 2016; MIRANDA *et al.*, 2018; MIRANDA *et al.*, 2021), ainda são raros os estudos sobre a dinâmica desse polímero em solos coesos. Essa carência, motivou o direcionamento desta pesquisa, como vistas nos objetivos apresentados a seguir.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar a mobilidade e interação da poliacrilamida (PAM) no solo, visando o entendimento do seu deslocamento ao longo de um perfil de solo coeso em Tabuleiro Costeiro pernambucano.

2.2 Específico

Determinar a capacidade máxima de adsorção da poliacrilamida em relação à cada horizonte do perfil de solo estudado.

Determinar o tempo de contato de adsorção e o melhor ajuste entre os modelos cinéticos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Estudar a aplicabilidade e o melhor ajuste das equações de Langmuir, Freundlich e SIPS na adsorção da poliacrilamida em solo coeso do estado de Pernambuco.

Determinar o fator de retardo e o coeficiente de partição para cada horizonte de um perfil de solo com caráter coeso.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Solo com caráter coeso

Caráter coeso de um solo é a classificação pedogenética de horizontes subsuperficiais adensados, muito resistentes à penetração de faca ou de martelo pedológico, e de consistência dura ou muita dura quando secos, tornando-se friáveis na presença de umidade (Santos *et al.*, 2006). São horizontes muito duros e firmes, sem organização estrutural visível, apresentando macroporosidade relacionada à atividade biológica, com rara presença de raízes, e quando encontradas, a maioria está morta (RIBEIRO, 2001).

Solos com esses horizontes apresentam baixos teores de Fe, predomínio de caulinita na fração argila e quartzo na fração areia (MELO *et al.*, 2002). Também são solos com baixa Saturação por Bases (V%), Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e matéria orgânica (M.O), e alta saturação por alumínio e acidez, o que reduz a disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Os baixos teores de óxidos de Fe (goethita) e de Al (gibsite) e a presença de ciclos de umedecimento e secagem, favorecem os ajustes face a face da caulinita, argilomineral predominante nesses solos, sendo esse processo o principal responsável pelo endurecimento do solo quando seco (MOREAU *et al.*, 2006).

Os horizontes coesos podem apresentar características semelhantes a outros horizontes quando secos, por sua dureza. Conforme Santos *et al.* (2018), diferentemente dos fragipãs, que quando umedecidos se quebram facilmente, o horizonte coeso apresenta deformação mais lenta quando submetido à compressão nas mesmas condições de umidade. São solos que não possuem, visualmente, estrutura definida, sendo maciços, e quando submergidos em água esboroam facilmente.

A grande ocorrência do comportamento coeso em uma extensa área do território brasileiro fez com que se tornasse um atributo na classificação do solo. Segundo Jacomine (1996), Os horizontes coesos são identificados, normalmente, entre as profundidades de 0,30 e 0,70 m, geralmente nos horizontes AB e/ou BA, e/ou parte do Bw ou Bt, podendo também estar presente em profundidades maiores, ou menores, quando ocorre a perda da camada superficial do solo pela erosão. Normalmente estão presentes em solos de textura argilosa, apresentando em condições naturais alta densidade do solo, com valores entre 1,5 a 1,8 g cm⁻³.

Esses horizontes coesos ocorrem sob influência da unidade geoambiental denominada Tabuleiros Costeiros, sendo uma característica pedogenética de adensamento, estando situados na faixa litorânea brasileira, originados por processos pedogenéticos da Formação do Grupo Barreiras. As classes de solos mais comuns em que ocorre o horizonte coeso são os Latossolos e Argissolos, porém pode ocorrer em outras classes de solos, como Neossolos, Plintossolos e Espodossolos (SANTOS *et al.*, 2018).

O termo Tabuleiro Costeiro se refere a uma topografia predominantemente plana, com presença de vales profundos e encostas com forte declividade. Algumas áreas possuem relevo suave ondulado a ondulado, chegando a fortemente ondulado, com elevações de topos planos denominados chãs (JACOMINE, 2001).

A ocorrência da coesão é atribuída a vários fatores, tais como: formação do solo; as alterações da estrutura do solo pela alternância de ciclos de umedecimento e secagem; presença de agentes cimentantes (De CARVALHO *et al.*, 2013; MOREAU *et al.*, 2006); migração de partículas mais finas para as partes inferiores do solo, obstruindo os microporos, diminuindo a aeração e porosidade total do solo, elevando a resistência à penetração e densidade do solo.

O cálcio e a matéria orgânica do solo podem funcionar como agente agregador, contribuindo na formação de agregados mais fortes. Por conta disso, muitos autores recomendam o uso do gesso agrícola para o fornecimento de cálcio, por sua característica mais solúvel e móvel, sendo uma prática viável, reduzindo a dispersão da argila (PORTELA, 2021).

Na Austrália, os solos que se tornam duros o suficiente para dificultar e até inviabilizar o cultivo, são classificados como hardsetting (GIAROLA *et al.*, 2001). Conforme Almeida (2008), o termo hardsetting é aplicado para solos com variação marcante nos parâmetros físicos, entre os períodos secos e úmidos. No Brasil, o termo coeso é aplicado para solos e, ou, horizontes que, sob baixa umidade, se apresentam duros e muito duros, formados a partir de sedimentos do Grupo Barreiras, sem considerar qualquer restrição ao uso dos solos, imposta pela resistência oferecida pelos horizontes (GIAROLA *et al.*, 2001).

Relacionando os solos hardsetting com os coesos, Giarola *et al.* (2001), consideraram que os conceitos, ocorrência, características físicas, químicas e mineralógicas descritos para os atributos hardsetting e coeso, apresentam uma série de coincidências. Pode se tratar de um

mesmo tipo de comportamento de solo, ao qual foram dadas denominações distintas, em diferentes regiões do globo.

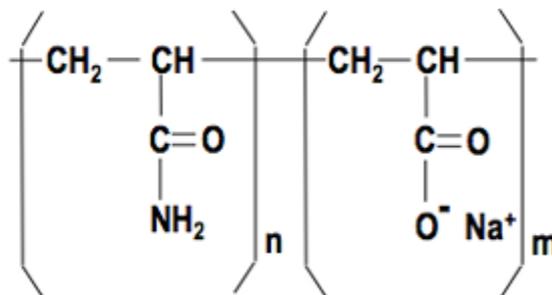
A identificação do caráter coeso, em campo, é feita através da descrição morfológica dos perfis de solos, levando-se em consideração a resistência do solo à penetração, sendo de valor limitado, pois o caráter coeso não se manifesta quando o solo está úmido (GIAROLA & SILVA, 2002). É de grande importância a utilização de outros parâmetros para a identificação do comportamento coeso, como a porosidade total, a densidade do solo e a condutividade hidráulica.

Os horizontes subsuperficiais, com comportamento coeso, limitam o uso do solo na agricultura, pela ocorrência da baixa infiltração de água no solo, concentrando a água nas camadas superficiais, no período chuvoso, o que favorece a evaporação e erosão do solo, reduzindo a capacidade de armazenamento de água ao longo do perfil.

3.2 Poliacrilamida

O surgimento dos polímeros hidrofílicos à base de poliacrilamida (PAM) ocorreu na década de 50, nos Estados Unidos, e com a evolução, a capacidade de hidratação do polímero foi melhorada de 20 para 400 vezes o seu peso. Em 1980 passou a ser utilizado na agricultura como condicionador de solos (FREITAS *et al.*, 2002). A poliacrilamida é um condicionador de solos formado a partir da polimerização de monômeros de acrilamida, sendo mais indicada para a melhoria da qualidade física dos solos (MIRANDA *et al.*, 2011).

Figura 1 – Monômero da poliacrilamida aniônica.



Fonte: o Autor (2023).

Santoni (2008), classificou os polímeros em três grupos: i) aqueles em que a água é fortemente confinada por fortes ligações H-H, ficando toda água retida; ii) aqueles que possuem grande capacidade de adsorção e pouca força de retenção; e iii) aqueles que retêm a água por ligações fracas de H, liberando-a paulatinamente com o tempo. Os polímeros retêm água e nutrientes durante um longo período.

A poliacrilamida pode apresentar carga iônica positiva (catiônica), negativa (aniônica) ou neutra (não iônica). A PAM é solúvel em água, com macromoléculas lineares de cadeia longa, formada por polimerização de monômeros de acrilamida, com baixa densidade de carga, bastante utilizada na agricultura, com promessas de benefícios para o manejo do solo (SOJKA *et al.*, 2007).

A PAM aniônica apresenta características de alto peso molecular, não tóxica ao ambiente, sendo bastante utilizada em aplicações industriais, perfuração de poços, tratamento de águas residuais como floculante, produção de papel e celulose (SEYBOLD, 1994, ABIDIN *et al.*, 2012).

Tabela 1 – Propriedades típicas da poliacrilamida, Kemira SUPERFLOC A – 130.

Propriedades Típicas	A - 130
Aparência	Pó granulado branco
Grau de carga %	33
Peso molecular relativo	Alto
Densidade aparente, kg/m ³	850 ± 50
pH da solução a 0,5%, 25 °C	5,0 – 7,0
	Viscosidade, cps:
0,10%	200
0,25%	400
0,50%	850
	Especificações do produto
Insolúveis % p/p (método BD 37)	2,0 máx.
Acrilamida residual, % (método BD 52)	0,05 máx.
PWG, Acrilamida residual, % (método BD 52)	0,020 máx.
Viscosidade padrão, cps (método 20, 20A, 21)	4,4 – 5,8

Fonte: Adaptada da Ficha técnica Kemira SUPERFLOC.

O uso da PAM promove a redução da coesão, diminuindo a perda de solo por erosão e nutrientes por lixiviação, sendo benéfico ao meio ambiente, evitando a perda do solo, como também no impacto da eutrofização nos corpos hídricos (MARCELO, 2019). Essa redução na

perda de solo por erosão, dá-se pela melhora na estrutura e agregação do solo, elevando a taxa de infiltração e retenção de água no solo.

Andrade (2014) estudando os atributos físico-hídricos de solos coesos na Zona da Mata pernambucana concluiu que a poliacrilamida na concentração 100 mg kg^{-1} melhorou a estabilidade dos agregados coesos, além do aumento na retenção de água desses solos.

Silva (2019) realizando experimento em campo com a poliacrilamida, confirmou a redução da coesão de solos em áreas cultivadas com cana-de-açúcar e mata secundária. Constatou que o solo tratado com a PAM foi capaz de armazenar mais água que o tratamento sem a PAM, reduzindo perdas potenciais pela percolação profunda em solos arenosos.

A poliacrilamida é uma ferramenta que ajuda a eficiência do uso da água na agricultura, e seu efeito depende significativamente da qualidade da água, sendo bastante reduzida a capacidade de hidratação do polímero em altas concentrações de sais na água de irrigação e na solução do solo (LÓPEZ-ELÍAS *et al.*, 2016). A utilização da PAM associada ao gesso agrícola também tem sido bastante estudada. Chávez; Fuentes & Ventura Ramos (2010), obtiveram resultados positivos com relação à eficiência do uso da água em irrigação por superfície, além do aumento na produtividade no cultivo de aveia, em 35% em comparação com a testemunha.

A PAM pode ser degradada de várias formas, como por mudanças no teor de sal e pH do solo, ação de microorganismos, variação de temperatura no solo e hidrólise (TOLSTIKH *et al.*, 1992; LANDE *et al.*, 1979), além da radiação ultravioleta, exposição ao sol e o cisalhamento das cadeias poliméricas (LU; WU & LETEY, 2002; XIONG *et al.*, 2018).

Freitas *et al.* (2019), analisando a fotodegradação da poliacrilamida, concluíram que o íon de Ferro e a Ureia, na presença de radiação ultravioleta, têm grande influência na degradação da poliacrilamida. Quando ocorre essa ação nas redes tridimensionais do polímero, são afetadas a capacidade de retenção e quantidades de água na estrutura.

3.3 Agentes cimentantes do solo

Estudos evidenciaram que a presença de agentes cimentantes compostos de Fe, Si e, ou, Al tem bastante influência na formação de camadas de solo endurecidas ou compactadas (De CARVALHO *et al.*, 2013; MOREAU *et al.*, 2006). Também, sucessivos ciclos de

umedecimento e secagem do solo podem favorecer o transporte de argila e silte em superfície, reduzindo a porosidade e aumentando a densidade do solo.

Corrêa *et al.* (2015) avaliaram a participação dos compostos de Fe, Si e Al, na coesão, e, ou, cimentação de fragipãs e horizontes coesos, em regiões de Tabuleiros Costeiros, na Bahia e Espírito Santo, concluindo que os maiores teores de Fe, Si e Al, nos horizontes dos solos estudados, extraídos por oxalato de amônio nos fragipãs, agem como cimentantes químicos. Porém, não ficou evidenciada a participação de formas de alta ou baixa cristalinidade, desses elementos, na gênese dos horizontes coesos em solos dos Tabuleiros Costeiros.

Lima Neto *et al.* (2010), estudando Latossolos e Argissolos no estado de Alagoas, também não observaram tendência de aumento dos teores de sílica e alumínio extraídos com ditionito-citratobicarbonato e oxalato nos horizontes coesos. Afirmaram que sua gênese não se deve à presença de agentes cimentantes, e que a gênese do horizonte coeso apresenta duas fases distintas, sendo sua base formada inicialmente pela iluviação de argila fina, entupindo os poros do solo, com posterior perda de Fe na parte superior, colapsando a estrutura.

Já Vieira *et al.* (2012) observaram em seu trabalho uma significativa redução da coesão do solo após a extração de compostos amorfos (Fe, Al e Si), com resultados na redução da resistência à penetração das raízes no solo e na densidade do solo.

Vieira (2019) evidenciou que solos que apresentam acréscimos de silício e alumínio de baixa cristalinidade nos horizontes coesos, contribuem conjuntamente para a origem desse caráter, tendo a sílica maior ação cimentante em relação ao alumínio, nos solos estudados. Também concluiu que a extração desses compostos melhorou a qualidade física do solo, reduzindo o adensamento do solo, em relação ao tratamento sem extração dos agentes cimentantes.

3.4 Processo de adsorção

A tecnologia de adsorção é considerada um dos processos mais eficientes e econômicos para a remoção de poluentes de correntes aquosas, sendo superior a muitos outros processos de tratamento por conta do seu baixo custo e limite de operação. Tem sido bastante utilizada no tratamento de águas residuárias, sendo bastante eficiente, com a intenção de reduzir os níveis de toxicidade desses efluentes.

Por se tratar de um processo de acumulação e concentração seletiva de um ou mais constituintes contidos em fluidos líquidos ou gasosos sobre superfícies sólidas, a adsorção possibilita a separação desses fluidos.

O material sobre o qual ocorre a adsorção, chama-se adsorvente, e a substância adsorvida é o adsorvato ou adsorbato. Quando determinada quantidade de um sólido (adsorvente) entra em contato com um volume de líquido contendo um soluto adsorvível (adsorvato), a adsorção avança até que o equilíbrio seja alcançado. Ou seja, as moléculas ou íons do adsorvato tendem a migrar do meio aquoso para a superfície do adsorvente até que um equilíbrio se estabeleça e a concentração de soluto na fase líquida (C_{eq}) permaneça constante. Nesse estágio, diz-se que o sistema atingiu o estado de equilíbrio, e a capacidade de adsorção do adsorvente (S_e) é determinada, como evidenciada pela Equação 1 (NASCIMENTO, 2020).

$$S_e = \frac{(C_o - C_{eq}) \cdot V}{m} \quad (1)$$

Onde: S_e é a capacidade de adsorção no equilíbrio; C_o é a concentração inicial da solução; C_{eq} é a concentração do adsorvato em equilíbrio na solução; V é o volume da solução; e m é a massa do adsorvente.

A adsorção pode ser física ou química. A física ou fisissorção, é, principalmente, causada por forças de Van der Waals ou forças eletrostáticas, que são ligações relativamente fracas, entre as moléculas do adsorvato e os átomos da superfície do adsorvente. É um fenômeno reversível, que ocorre, normalmente, com a deposição de mais de uma camada de adsorvato sobre a superfície do adsorvente.

Na adsorção química ou quimissorção há interações químicas entre o fluido adsorvido e o sólido adsorvente, onde há transferência de elétrons, resultando em reação química, sendo ligações mais fortes, geralmente irreversíveis. A quimissorção é altamente específica, é chamada de “localizada”, pois só pode ocorrer nos sítios ativos (NASCIMENTO *et al.*, 2014).

Vários fatores podem afetar o processo de adsorção, como as propriedades do adsorvente e do adsorvato, a temperatura do sistema, a área superficial, tamanho de poro e densidade do adsorvente, o pH do meio, entre outros.

A adsorção pode ser estudada de duas formas: ensaios em lotes de equilíbrio ou em leitos fixos. Os testes em lotes de equilíbrio, normalmente, são em escala laboratorial, de certa forma mais simples e de baixo custo. No processo, o adsorvente e a solução contendo o adsorvato ficam em contato durante todo tempo da realização do experimento, ocorrendo um estágio de equilíbrio, sendo possível se obterem parâmetros cinéticos e isotermas de equilíbrio (MALVESTIO, 2010; TADINI *et al.*, 2016).

3.4.1 Cinética de adsorção

O estudo cinético consiste na adição de uma massa de adsorvente em um volume de solução, contendo o adsorvato, com concentração inicial determinada, permanecendo em agitação durante um tempo t de contato e a uma determinada temperatura. Após atingir o tempo, é possível determinar as concentrações finais de adsorvato e sua massa retida por unidade de massa de adsorvente (CURBELO, 2006).

Os modelos cinéticos auxiliam na compreensão do processo de adsorção, a otimizar parâmetros e a compará-los em diferentes sistemas adsorventes e condições experimentais (MARIA; DA SILVA; & DOS SANTOS, 2022). A cinética de adsorção avalia o efeito do tempo de contato na adsorção da solução, adsorvato, no adsorvente.

Monteiro *et al.* (2022) descreveram a cinética de adsorção como a velocidade em que as moléculas do adsorvato aderem ao sólido do adsorvente. Essa velocidade de aderência depende exclusivamente das características físico/químicas do adsorvato, adsorvente e da solução.

Através dos estudos de cinética de adsorção é possível compreender os mecanismos de adsorção, tais como: o calor liberado no processo, a velocidade do processo, a natureza dos sítios ativos do adsorvente e o tempo ótimo de contato (DE SOUSA *et al.*, 2022).

Os modelos cinéticos mais utilizados para a maioria dos sistemas adsorvente/adsorvato são os de pseudo-primeira ordem (LAGERGREN, 1898) e pseudo-segunda ordem (HO *et al.*, 1996) e de difusão intrapartícula (WEBER, 1972). Esses modelos investigam os mecanismos de adsorção e as etapas limitantes do processo adsortivo (BAZZO, 2015).

3.4.1.1 Modelo cinético de pseudo-primeira ordem

Segundo Lagergren (1898), a velocidade de adsorção pode ser determinada por uma expressão baseada na capacidade de adsorção do sólido, partindo do princípio de que a velocidade de remoção do adsorvato em relação ao tempo é diretamente proporcional à diferença na concentração de saturação e ao número de sítios ativos do sólido. O modelo é representado pela Equação 2 (YANEVA e KOUMANOVA, 2006).

$$\frac{dS_t}{dt} = k_1(S_{e1} - S_t) \quad (2)$$

Em que: S_{e1} , representa a capacidade de sorção em equilíbrio (mg kg^{-1}); S_t , capacidade de sorção no tempo t , (mg kg^{-1}); k_1 , taxa constante de sorção de pseudo-primeira ordem (h^{-1}).

O valor de k_1 pode ser determinado por meio do gráfico de $\ln(S_{e1} - S_t)$ versus t , conforme Nascimento *et al.* (2014).

Sendo S_{e1} e S_t as capacidades de sorção em equilíbrio e no tempo t respectivamente (mg kg^{-1}) e k_1 a taxa constante de sorção de pseudo-primeira ordem (h^{-1}). Após integração, aplicando-se os limites $t = 0$ a $t = t$ e $S_t = 0$ a $S_t = S_t$, a forma integrada da Eq. (2) passa a ser representada pela Equação 3.

$$\log(S_{e1} - S_t) = \log S_{e1} - \frac{k_1}{2,303} t \quad (3)$$

k_1 é obtida por meio da regressão linear entre $\log(S_{e1} - S_t)$ e t .

3.4.1.2 Modelo cinético de pseudo-segunda ordem

Em 1999 foi proposto por Ho e Mckay, o mecanismo de pseudo-segunda ordem. Este, descreve que a cinética de adsorção depende da quantidade de sítios de adsorção contidos na superfície do material adsorvente. A equação proposta por este modelo é descrita na Equação 4.

$$\frac{dS_t}{dt} = k_2(S_{e2} - S_t)^2 \quad (4)$$

Em que: k_2 representa a constante da taxa de adsorção de pseudo-segunda ordem (h^{-1}); S_{e2} e S_t são as capacidades de sorção em equilíbrio e no tempo t , respectivamente (mg kg^{-1}); e k_2 a taxa constante de sorção de pseudo-segunda ordem ($\text{kg kg}^{-1} \text{h}^{-1}$).

Após integração e aplicando-se os limites $t = 0$ a $t = t$ e $S_t = 0$ a $S_t = S_t$, a forma integrada da Equação 4 é representada pela Equação 5.

$$\frac{1}{S_{e2} - S_t} = \frac{1}{S_{e2}} + k_2 t \quad (5)$$

Os valores de S_{e2} e k_2 podem ser obtidos do intercepto e da inclinação da curva apresentada no gráfico (t/S_t) versus t .

$$\frac{t}{S_t} = \left(\frac{1}{k_s}\right) + \left(\frac{1}{S_{e2}}\right)t \quad (6)$$

k_s pode ser considerado a taxa inicial de sorção quando $t/S_t \rightarrow 0$.

3.4.2 Isotermas de adsorção

As isotermas de adsorção possibilitam informações efetivas da sorção de uma solução (adsorvato) pelo adsorvente, a partir da obtenção de dados nos experimentos de adsorção, através de modelos matemáticos, tais como a quantidade máxima de soluto adsorvida por ele e determinar a viabilidade econômica de um adsorvente, por exemplo, para purificação de um líquido (FERREIRA *et al.*, 2015).

A partir dos ensaios de isotermas e seus resultados, podem-se gerar gráficos correlacionando a quantidade máxima de soluto retida pelo adsorvente no equilíbrio (S_{max}) e a concentração de equilíbrio (C_{eq}), determinando-se o comportamento da isoterma, que pode ser favorável, extremamente favorável, linear, não favorável e irreversível, de acordo com a classificação de Weber e Chakravorti (1974).

Muitas equações de isotermas foram propostas com a finalidade de elucidar a relação entre adsorvato e adsorvente com base no ajuste dos dados experimentais sobre os valores de S versus C_{eq} . Cada uma delas possui seus parâmetros (dois ou mais) bem como seus pressupostos (NASCIMENTO, 2020). As mais utilizadas são as equações de Langmuir e Freundlich, devido ao fato de se prever a capacidade máxima de adsorção do material (Langmuir) e capacidade de descrever o comportamento dos dados experimentais. Some-se a isto, o fato delas apresentarem dois parâmetros, tornando mais fácil a sua utilização.

Existem diversos modelos isotérmicos adsorptivos dentre os quais, os modelos mais comumente utilizados são: Langmuir, Freundlich, Brunauer-Emmett-Teller (BET), Toth, Sips, Redlich-Peterson, Dubinin-Radushkevich, entre outros. Cada modelo possui suas especificidades, desde a sua formulação à aplicação.

Neste trabalho foram abordadas as isotermas de Langmuir, Freundlich e Sips.

3.4.2.1 Isoterma de Langmuir

A isoterma de Langmuir assume um número finito de sítios de adsorção, em que o máximo de adsorção corresponde à formação de uma monocamada saturada de moléculas de soluto na superfície do adsorvente (LANGMUIR, 1916). A saturação é alcançada após um certo tempo, além do qual nenhuma sorção adicional pode ocorrer. A equação de Langmuir é aplicável à sorção homogênea, onde a sorção de cada molécula do adsorvato na superfície, tem igual energia de ativação (TAHIR e RAUF, 2006).

Langmuir propôs uma teoria para explicar a adsorção sobre uma superfície simples, não porosa, uniforme, infinita, que assume que as moléculas adsorvidas não interagem, umas com as outras, e que a entalpia de adsorção independe da superfície coberta (McQUARRIE; SIMON, 1997).

O modelo de Langmuir é uma das equações mais utilizadas para representação de processos de adsorção, esta, por sua vez, apresenta os seguintes pressupostos: número definido de sítios; os sítios têm energia equivalente, e as moléculas adsorvidas não interagem umas com as outras; a adsorção ocorre em uma monocamada; cada sítio pode comportar apenas uma molécula adsorvida. A Equação 7 representa a isoterma de Langmuir (LANGMUIR, 1916).

$$S = \frac{S_{m\acute{a}x} K_L \cdot C_{eq}}{1 + K_L \cdot C_{eq}} \quad (7)$$

Em que: S é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg g^{-1}); C_{eq} é a concentração de adsorvato dissolvido na solução em equilíbrio (mg L^{-1}); $S_{m\acute{a}x}$ é a quantidade máxima de adsorção (mg g^{-1}); K_L (L mg^{-1}) é a constante de equilíbrio de Langmuir e indica a energia de ligação relacionando com a afinidade dos sítios.

Na isoterma de Langmuir o parâmetro de equilíbrio R_L (fator de separação) descreve as características essenciais da isoterma, expresso na Equação 8, que indica se o tipo de isoterma é reversível ($R_L = 0$), favorável ($0 < R_L < 1$), linear ($R_L = 1$) ou desfavorável ($R_L > 1$) (CHAYID e AHMED, 2015):

$$RL = \frac{1}{1 + K_L \cdot C_0} \quad (8)$$

3.4.2.2 Isoterma de Freundlich

O Modelo de Freundlich é uma isoterma empírica que pode ser usada para sorção não ideal, envolvendo sistemas heterogêneos de energia de superfície (ANTUNES *et al.*, 2021). Foi originalmente introduzida como uma correlação empírica de dados experimentais, admitindo-se uma distribuição logarítmica de sítios ativos, que constitui um tratamento válido quando não existe interação apreciável entre as moléculas de adsorvato (ZOLA, 2007).

O modelo de isotermas de Freundlich admite adsorção em multicamadas, diferentemente do modelo de Langmuir que considera a adsorção apenas em monocamada.

A Equação 9 é a representação da equação de Freundlich:

$$S = K_F \cdot C_{eq}^n \quad (9)$$

Em que: S é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg/g); C_{eq} é a concentração de adsorvato dissolvido na solução em equilíbrio (mg L^{-1}); K_F ($(\text{mg g}^{-1}) \cdot (\text{L mg}^{-1})^{1/n}$) é a constante de Freundlich que indica a capacidade de adsorção e n é a constante de Freundlich que fornece uma capacidade mensurável da intensidade da adsorção.

3.4.2.3 Isoterma de Sips

O modelo de Sips consiste na generalização das equações de Freundlich e Langmuir, fato que levou esta isoterma a ser conhecida como modelo isotérmico Langmuir-Freundlich ou mesmo modelo generalizado de Freundlich (SIPS, 1950). Em pequenas concentrações de adsorvato, a equação se reduz à isoterma de Freundlich, mas, para concentrações mais elevadas, segue a isoterma de Langmuir (FOO; HAMEED, 2010; TÓTH, 2011; NASCIMENTO, 2014).

A equação de Sips permite calcular rigorosamente a distribuição das energias de adsorção dos locais de uma superfície quando as isotermas de adsorção são conhecidas, se a adsorção é localizada e não há interações, considerando a heterogeneidade da superfície do sólido sorvente (solo) (ÁLVAREZ *et al.*, 2015). O modelo Sips é descrito pela Equação 10.

$$S = \frac{S_{m\acute{a}x} \cdot (K_s C_{eq})^n}{1 + (K_s \cdot C_{eq})^n} \quad (10)$$

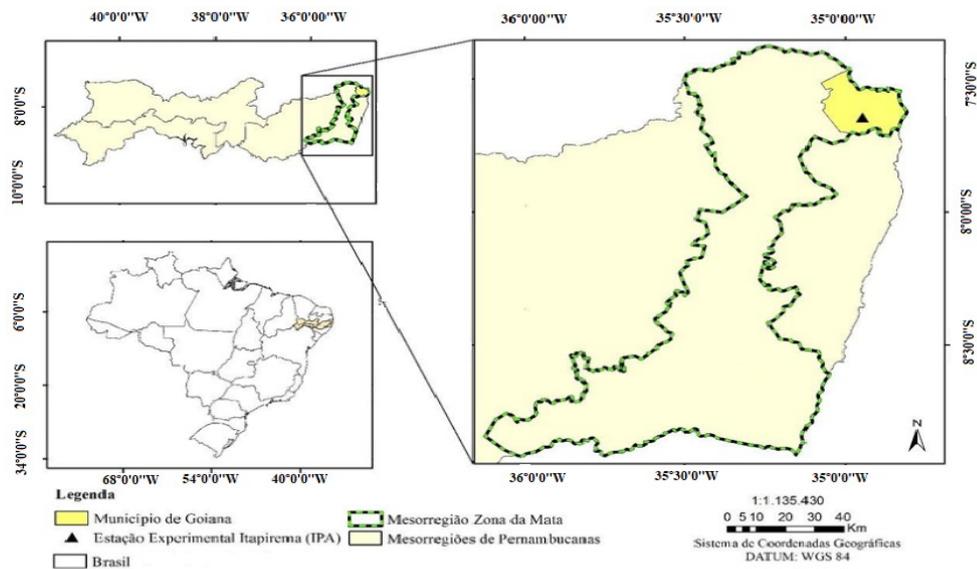
Em que: S é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg g^{-1}); C_{eq} é a concentração de adsorvato dissolvido na solução em equilíbrio (mg L^{-1}); $S_{m\acute{a}x}$ é a quantidade máxima de adsorção (mg g^{-1}); K_s ($(\text{L mg}^{-1})^n$) é a constante de equilíbrio de Sips, e n é o parâmetro de heterogeneidade.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo e coletas das amostras dos solos

A pesquisa foi realizada em uma área localizada na estação experimental de Itapirema, pertencente ao Instituto Agrônomo de Pernambuco (IPA), situada às margens da BR 101 Norte, km 53, no município de Goiana-PE (Figura 2). O local é bem referenciado desde 1960, em relação a estudos sobre solos coesos, sendo amplamente utilizado por vários pesquisadores/professores de diferentes órgãos (EMBRAPA, Universidades, IFPE, etc.), tendo-se várias informações sobre as classes de solos que ocorrem na Estação, e uso da terra, como confirmados nas discussões durante a Reunião de Classificação e Correlação de Solos, 1998 (V RCC). Na área sob relevo plano, ocorre a unidade geoambiental denominada de Tabuleiro Costeiro, apresentando clima Ams' pela classificação de Köppen, pluviosidade anual média de 2.002,8 mm e vegetação do tipo floresta tropical subperenifólia.

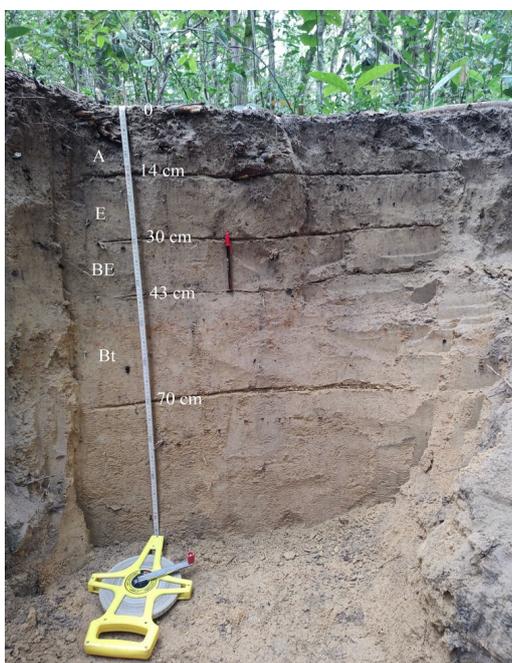
Figura 2 – Localização da área de estudo, na Estação Experimental de Itapirema, Goiana-PE.



Fonte: Marcelo (2019).

No ambiente selecionado, já existiam trincheiras abertas, sendo realizada a limpeza do perfil com auxílio de pá e enxada, confirmando-se a descrição morfológica dos solos, seguindo a metodologia de Santos *et al.* (2015), e a classificação do solo, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (EMBRAPA, 2018). Andrade (2014) & Silva (2019) classificaram o solo como Argissolo Amarelo Distrocoeso, com presença dos horizontes A (0-14 cm), E (14-30 cm), BE (30-43 cm), Bt (43-70 cm) e Bw (70 >110 cm). Na escolha dos horizontes para o estudo, levou-se em consideração, entre os horizontes coesos, aqueles com máxima coesão. O horizonte coeso estudado se encontra na profundidade de 43-70 cm, identificado como horizonte Bt1 (Figura 3).

Figura 3 - Perfil de solo estudado na Estação Experimental de Itapirema, Goiana-PE.



Fonte: O autor, 2022.

No perfil do solo foram coletadas as amostras de solo, em anéis, inseridos no solo via amostrador tipo Uhland, e em blocos, obtidos manualmente, com auxílio de serrote e pá reta. A coleta ocorreu nos horizontes coesos e naqueles acima da faixa com comportamento coeso. As amostras indeformadas, anéis e blocos, foram envolvidas em plástico filme e plástico bolha, com a intenção de se evitarem perturbação e deformação do solo. Essas amostras foram identificadas, com informações do local de coleta, do horizonte classificado e do sentido das

amostras no solo, sendo em seguida colocadas em caixa de isopor e transportadas ao laboratório.

No laboratório, as amostras deformadas foram destorroadas, secas ao ar, passadas por peneira de 2 mm de malha, para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA), e realizadas as caracterizações física e química, conforme Embrapa (1997), e os ensaios de cinética e isotermas de adsorção.

4.2 Análises químicas dos solos

Por se tratar de um local bastante estudado, os dados acerca das propriedades químicas do perfil de solo utilizado na pesquisa foram obtidos através de estudos desenvolvidos por Andrade (2014), Marcelo (2019) & Silva (2019), os quais determinaram: pH, em água e KCl a 1 mol L⁻¹; acidez potencial (H⁺+Al³⁺); sódio (Na⁺) e potássio (K⁺) trocáveis; além do fósforo disponível (P), extraídos por solução de Mehlich 1, também chamada de solução duplo ácida, que é constituída por uma mistura de ácido clorídrico e ácido sulfúrico, baseando-se na solubilização de P pelo efeito do pH ácido. A determinação do H⁺+Al³⁺ foi realizada por volumetria, Na⁺ e K⁺ determinados por fotômetro de chama e o P por colorimetria. Também foram determinados o cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺) e alumínio (Al³⁺) trocáveis, sendo os dois primeiros via espectrofotometria de absorção atômica, e o último por volumetria. Nestes ensaios foram utilizadas as recomendações conforme Teixeira *et al.* (2017).

De posse dos resultados das análises, foram calculadas: a soma de bases (SB), a capacidade da troca de cátions (CTC), a saturação por bases (V%), a saturação por Al (m), a atividade da fração argila e a saturação por sódio (PST), conforme descrito em Teixeira *et al.* (2017).

4.3 Análises Físicas dos Solos

4.3.1 Ensaios granulométricos e densidade dos solos

A granulometria dos horizontes de solos estudados foi obtida em estudo realizado por Andrade (2014), utilizando-se do método do densímetro, onde 50 g das amostras em TFSA,

sob ação do dispersante (Calgon = hexametáfosfato de sódio + carbonato de sódio = 0,25 L) e 250 mL de água, foram submetidas ao agitador tipo Wagner por 16 horas. Após essa agitação, as amostras foram transferidas para provetas de 1 L, até o volume de 0,94 L, agitando-se manualmente com haste e permanecendo em repouso por 24 horas (ALMEIDA, 2008). Após esse período, foram realizadas as leituras do material em suspensão (argila total) com o uso do densímetro de Bouyoucos, além da leitura da solução dispersante (apenas Calgon). Em seguida, o restante do conteúdo da proveta foi passado através da peneira (abertura de malha 0,053 mm) para retenção e determinação da fração de areia total, e colocadas na estufa a 105 °C por 24 horas. A argila dispersa em água (ADA) foi determinada do mesmo modo que a fração argila total (AT), exceto pela ausência do dispersante químico. Com os dados da AT e ADA, calculou-se o grau de floculação (GF), conforme Equação 11.

$$GF \% = \frac{(AT - ADA)}{AT} 100 \quad (11)$$

A densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método do anel volumétrico (GROSSMAN & REINSCH, 2002) e a densidade de partículas sólidas do solo (D_p) pelo método do picnômetro (FLINT & FLINT, 2002).

4.3.2 Capacidade de campo e Porosidade total do solo (Pt)

Com as amostras de solos em anéis foram determinadas as umidades na capacidade de campo (θ_{cc}) dos horizontes A, E, BE e Bt. Inicialmente as amostras foram saturadas em bandeja por capilaridade, elevando-se a água lentamente até 0,5 cm do topo do anel, por um período de 48 horas. Os conjuntos anel-amostra foram levados a uma mesa de tensão, ajustando-se a tensão de 100 cca. Após o equilíbrio, verificado pela saída de água do dreno, realizou-se a pesagem dos conjuntos anel-amostra na tensão de 100 cca. Em seguida, as amostras foram levadas à estufa por 24 horas, a 105 °C, sendo realizada, novamente, a pesagem de cada conjunto anel-amostra seco. A partir da diferença dos pesos entre o anel-amostra úmido (ψ 100 cca) e o anel-amostra seco, foram obtidas as massas de água, para cada amostra de solo; adotou-se o volume total do solo como o volume do anel volumétrico ($\pi r^2 h$). Determinou-se a umidade na capacidade de campo conforme a Equação 12.

$$\theta_{cc} = \frac{\left(\frac{\text{massa de água } \Psi \text{ 100 cca}}{\text{Densidade da água}} \right)}{\text{Volume total do solo}} \quad (12)$$

A porosidade total (Pt) foi obtida pela divisão do volume total de poros pelo volume do solo. O volume de poros foi obtido pela diferença de peso do conjunto anel-amostra saturada e o conjunto anel-amostra seco em estufa a 105 °C, dividido pela densidade da água, considerada em todos os ensaios como 1.000 kg L⁻¹, sendo considerado como volume do solo, o volume do anel volumétrico ($\pi r^2 h$), conforme a Equação 13.

$$P_t = \frac{(\text{Conjunto amostra saturada} - \text{Conjunto amostra seca})}{\text{Volume total do solo}} \quad (13)$$

4.4 Preparo das soluções de PAM

Para o preparo das soluções de PAM foi utilizada a poliacrilamida, de nome comercial Superfloc A-130 (Tabela 1), da empresa Cytec. Inicialmente, pesou-se 1 grama do polímero, com balança de precisão, e misturou-se com 5 litros de água destilada, preparando-se a solução padrão de PAM na concentração de 200 mg L⁻¹.

A partir da solução estoque foi realizada a diluição com água destilada para as demais concentrações desejadas: 10, 20, 30, 50, 70, 90, 120, 150 mg L⁻¹. Todas as soluções foram armazenadas e identificadas em balões volumétricos de fundo chato, sendo utilizadas nos ensaios de isotermas de adsorção.

4.5 Extração dos agentes cimentantes do solo

Para um conjunto de amostras de solos, realizou-se a extração dos agentes cimentantes (Fe, Si, Al e M.O) de cada horizonte do solo estudado (A, E, BE e Bt). Esse procedimento foi executado no Laboratório de Mineralogia, pertencente ao Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, e seguiu a metodologia aplicada por McKeague e Day (1966), no qual a TFSA de cada horizonte foi separada e pesada, colocando-a em tubos opacos, para que a extração ocorresse na ausência de luz. Logo em seguida,

adicionou-se uma solução reagente, contendo oxalato de amônio + ácido oxálico, que foi diluída e misturada, ajustando-se seu pH para 3,0. Após a adição da solução reagente, os tubos foram fechados imediatamente, e em seguida, levados para agitação, por um período de 4 horas, em um agitador horizontal, com rotação de 150 rpm. A próxima etapa foi a centrifugação, a uma rotação de 3000 rpm, transferindo-se o sobrenadante das amostras de solo para outro recipiente, separando-se o solo desses agentes cimentantes. Essas amostras sólidas foram levadas para estufa, permanecendo por um período de 72 horas e temperatura de 105 °C.

4.6 Determinação da concentração da PAM no solo

Para a determinação da concentração equivalente de PAM, a partir da leitura obtida pelo turbidímetro digital, da marca AKSO e modelo TU430, foi feita, inicialmente, uma curva de calibração utilizando-se as soluções, com suas diferentes concentrações. Em seguida, foi retirada uma alíquota de 10 mL das soluções de PAM, e realizadas as leituras da turbidez, usando-se o surfactante catiônico hiamina 1622, de acordo com o método de Kang *et al.* (2013). As moléculas aniônicas de PAM reagiram com a hiamina para produzir colóides insolúveis, causando turbidez. Após um tempo de espera de reação de 5 minutos, a turbidez na alíquota foi medida usando o turbidímetro (Figura 4) sendo assim determinada a concentração de PAM.

Figura 4 - Turbidímetro digital, AKSO – TU430.



Fonte: O autor, 2023.

Com os dados de leitura do equipamento, fez-se o uso do programa Solver do Excel da Microsoft Office 365 para a determinação da curva e o fator de correção, transformando-se turbidez em concentração equivalente da solução.

4.7 Ensaios de cinética de adsorção

Os ensaios de cinética foram realizados no Laboratório de Avaliação da Contaminação do Solo – LACS, localizado no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, em ambiente com temperatura controlada de 22 °C, com variação para mais ou para menos de 2 °C. Foram usadas amostras de solo obtidas da TFSA.

Esses ensaios consistiram em colocar as amostras de solo, de cada horizonte em estudo (A, E, BE e Bt), em tubos Falcon, em triplicata, pesando-se 10 g de TFSA, adicionando-se em cada tubo uma solução de 40 mL, contendo água destilada e poliacrilamida, com concentração de 200 mg L⁻¹ de PAM. Os tubos foram agitados manualmente e colocados em seguida em mesa agitadora a 100 RPM (Figura 5), nos seguintes tempos: 5, 10, 15, e 30 min, 1, 2, 6, 12, 24 e 48 h.

Figura 5 - Mesa agitadora.

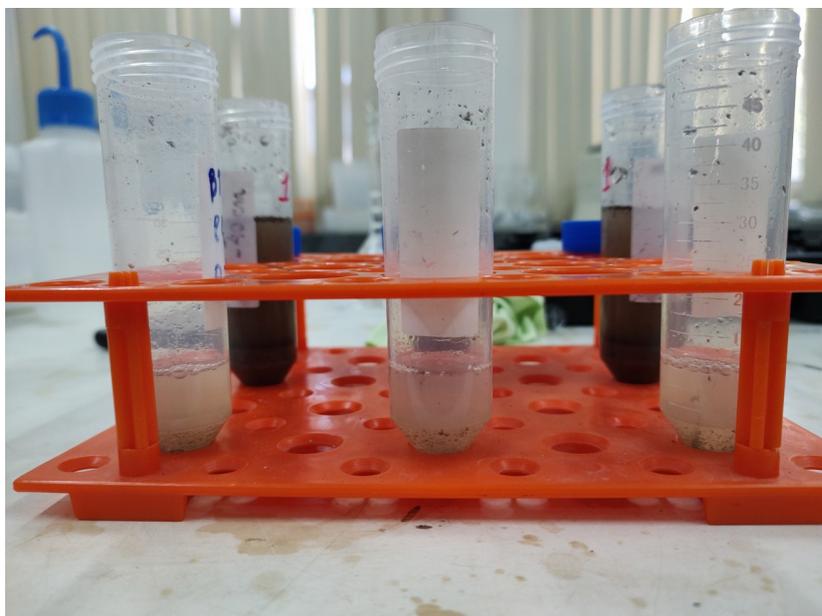


Fonte: O autor, 2023

Após a agitação dos tubos Falcon, nos tempos estabelecidos, eles foram retirados da mesa de agitação e colocados em uma estante para tubos, sendo retirada uma alíquota de 10 mL, com auxílio de uma pipeta, colocando-a em um novo tubo, e adicionado 0,1 mL de hiamina (figura 6), misturando-se, em seguida, com o auxílio de um vortex, para que ocorresse a reação com a PAM. Após se aguardar o tempo de 05 minutos, foi realizada a leitura e determinada a turbidez, com a utilização do turbidímetro, a partir de uma curva de calibração de PAM desenvolvida com amostra de lixiviado não tratada (em branco).

Os dados experimentais foram aplicados aos modelos cinéticos de adsorção de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem. Com base nesses modelos, definiu-se a cinética que melhor se ajusta ao adsorvente e ao adsorvato estudados.

Figura 6 - Retirada da alíquota do sobrenadante e adição da hiamina.n5



Fonte: O autor, 2023

4.8 Ensaio de isotermas de adsorção

Os ensaios de isotermas foram também realizados no Laboratório de Avaliação da Contaminação do Solo – LACS, situado no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, em ambiente com temperatura controlada de 22 °C, com variação para mais ou para menos de 2 °C.

Para os ensaios de isotermas de adsorção foram determinadas as concentrações da solução contendo água destilada e PAM: 10, 20, 30, 50, 70, 90, 120, 150, e 200 mg L⁻¹, e o tempo para que a solução permanecesse em agitação com o solo foi de 24 horas. O tempo de contato da solução com o adsorvente em agitação, 24 horas, foi definido a partir dos ensaios de cinética realizados.

Os ensaios de isotermas de adsorção se basearam em dois tratamentos, realizados com as amostras de solo dos horizontes coletados (A, E, BE, Bt), sendo o primeiro tratamento, o solo natural, sem a extração dos agentes cimentantes do solo + solução de PAM; e o segundo tratamento, o solo com a extração dos agentes cimentantes + solução de PAM.

As amostras de solo (TFSA) de cada horizonte estudado (A, E, BE, Bt) foram colocadas em tubos Falcon, em triplicata, contendo 10 g de TFSA, e 40 mL das soluções, contendo água destilada e poliacrilamida, em concentrações diferentes, como descrito anteriormente, para cada horizonte. O solo e a solução de PAM foram previamente misturados, agitando-se os tubos manualmente, sendo em seguida colocados em mesa agitadora, a 100 RPM, temperatura constante de 22 °C, com variação de mais ou menos 2 °C, por um período de 24 horas.

Após a agitação dos tubos Falcon no período determinado, eles foram colocados em uma estante, e retirada uma alíquota de 10 mL do sobrenadante, com auxílio de uma pipeta, colocando-a em um novo tubo. Em seguida foi adicionado 0,1 mL de hiamina, misturando-se com o auxílio de um vortex, e aguardou-se a reação com a PAM. Após 05 minutos, determinou-se a turbidez, usando o turbidímetro digital (AKSO – TU430).

Os dados obtidos através dos experimentos foram ajustados aos modelos de isotermas de Langmuir, Freundlich e Sips, no Solver do Excel (MS 365), definindo-se o que melhor se ajustou no processo de adsorção da solução contendo a poliacrilamida e os solos do perfil estudado.

4.9 Fator de Retardo (R) e Coeficiente de Partição (K_D)

O fator de retardo (*R*) é uma variável que representa o “atraso” da lixiviação de um composto relativo à percolação da água. Esse retardo ou atraso é devido à sorção do composto na matéria sólida do solo, da volatilização e da difusão gasosa e aquosa do composto solo.

O R pode ser determinado de várias formas, porém, neste trabalho foi feito a partir dos parâmetros das curvas isotérmicas de Sips e dados das características dos solos estudados, conforme Equação 14.

$$R = 1 + \frac{\rho_d}{\theta} \frac{S_{m\acute{a}x} n K_s^n C_{eq}^{n-1}}{(1 + (K_s \cdot C_{eq})^n)^2} \quad (14)$$

onde, R é o fator de retardo (adimensional); ρ_d é a densidade do solo (g cm^{-3}); θ é a umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); S é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg g^{-1}); C_{eq} é a concentração de adsorvato dissolvido na solução em equilíbrio (mg L^{-1}); $S_{m\acute{a}x}$ é a quantidade máxima de adsorção (mg g^{-1}); K_s ($(\text{L mg}^{-1})^n$) é a constante de equilíbrio de Sips; e n é o parâmetro de heterogeneidade.

O coeficiente de partição ou distribuição solo-água (K_D) é um dos parâmetros derivados das isotermas de adsorção que indica a intensidade da adsorção. O parâmetro K_D (mg kg^{-1}) é uma importante ferramenta na estimativa do potencial de sorção de contaminantes dissolvidos em contato com o solo. Quanto maior o K_D , maior a tendência do contaminante ficar adsorvido ao solo ou sedimento. O K_D depende dos íons presentes na solução, de suas concentrações, da força iônica da solução, do pH e dos minerais e fases amorfas presentes no solo (USEPA, 1999).

O K_D foi determinado a partir dos ensaios de adsorção em lotes de equilíbrio, feitos em laboratório, resultando nos valores de concentração adsorvida da PAM pelo solo (S) e concentração de equilíbrio da PAM na solução (C_{eq}). Calculado pela Equação 15.

$$K_D = \frac{S}{C_{eq}} = \frac{\text{Concentração da PAM no Solo}}{\text{Concentração da PAM na Solução}} \quad (15)$$

onde, K_D é o Coeficiente de Partição; S é a quantidade adsorvida no equilíbrio (mg g^{-1}); C_{eq} é a concentração de adsorvato dissolvido na solução em equilíbrio (mg L^{-1}).

4.10 Análise estatística

Para os ensaios de adsorção realizados, ou seja, cinética e isothermas de adsorção, foram analisados os ajustes dos modelos pelos parâmetros estatísticos do coeficiente de correlação (R^2) e a soma dos erros quadráticos (SSE).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram apresentados em duas partes, a primeira tratando da caracterização do solo como adsorvente, mostrando-se informações das análises físicas e químicas. Esses estudos resultaram nas seguintes determinações: granulometria do solo, porosidade total, pH do solo, sendo fatores importantíssimos que influenciam no processo da adsorção.

A segunda parte dos resultados expõe a cinética, isotermas de adsorção, fator de retardo e coeficiente de partição, avaliando-se alguns parâmetros e seleção dos modelos que apresentaram melhor ajuste para os ensaios realizados.

5.1 Características físicas e químicas do solo

As características físicas e químicas do perfil de solo estudado são apresentadas nas tabelas 2 e 3.

Em relação às características físicas é um solo medianamente profundo a profundo, passando dos 120 cm, com presença do horizonte B textural, que é um horizonte diagnóstico característico da classe dos Argissolos. As análises evidenciaram sua granulometria com alto percentual de areia, sendo seus horizontes classificados de acordo com o triângulo textural, entre areia, areia franca e franco arenoso.

Devido à textura arenosa, possui alta densidade do solo, porém em seu horizonte Bt, com maior presença de argila em relação aos demais horizontes, é o horizonte mais denso, confirmando as principais características do horizonte coeso, como a alta densidade do solo, a baixa permeabilidade e a elevada resistência do solo à penetração das raízes, quando se encontram secos. O horizonte coeso se encontra na camada mais profunda do solo, devido à movimentação e ao rearranjo de argila nessa porção resultando na compactação, sendo o transporte de argila um fator de contribuição da coesão. Corrêa *et al.* (2008) concluíram que a maior coesão observada para o Argissolo Amarelo, nos Tabuleiros Costeiros, com caráter

Tabela 2 - Características físicas do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico estudado da Estação de Itapirema, Goiana – PE.

Horizontes	Prof. (cm)	Argila	Silte	Areia	-----g kg ⁻¹ -----						GF %	---- kg dm ⁻³ ----		PT cm ³ cm ⁻³	θ_{cc} cm ³
					AMG	AG	AM	AF	AMF	ADA		Dp	Ds		
A	0-14	75,54	33,39	891,07	44,48	162,34	324,24	298,65	60,27	20,99	72	2,70	1,43	0,47	0,13
E	14-30	92,12	18,27	889,61	35,84	158,94	320,9	308,1	62,98	33,5	64	2,70	1,53	0,31	0,11
BE	30-43	150,87	33,93	815,21	31,69	142,25	276,26	287,99	74	104,77	31	2,73	1,57	0,38	0,18
Bt	43-70	323,62	26,94	649,44	22,69	110,87	222,33	220,08	72,88	16,81	95	2,78	1,71	0,35	0,17

Em que: Prof. = Profundidade; AMG = Areia muito grossa; AG = Areia grossa; AM = Areia média; AF = Areia fina; AMF = Areia muito fina; ADA = Argila dispersa em água; GF = Grau de floculação; Dp = Densidade da partícula; Ds = Densidade do solo; PT = Porosidade Total do solo; θ_{cc} = Umidade na capacidade de campo.

Fonte: Adaptada de ANDRADE, 2014.

Tabela 3 - Características químicas do Argissolo Amarelo Distrocoeso epirredóxico estudado da Estação de Itapirema, Goiana – PE.

Horizontes	Prof. (cm)	pH (H ₂ O) ²	pH (KCl) ²	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al ³	SB	CTC _{Ef}	CTC _{Pot}	V	----- % -----		P mg kg ⁻¹
														m	PST	
A	0-14	4,45	3,24	0,36	0,59	3,97	1,36	6,67	48,4	6,28	12,95	54,68	11,49	51,49	4,57	11,25
E	14-30	4,59	3,79	0,3	0,52	3	0,64	6	41,25	4,47	10,47	45,72	9,77	57,32	4,94	9,94
BE	30-43	5,05	4,16	0,25	0,49	5,05	1,23	3,67	32,45	7,02	10,69	39,47	17,78	34,31	4,57	9,89
Bt	43-70	4,87	3,98	0,25	0,53	4,62	1,36	5	31,25	6,76	11,76	38,11	17,74	42,51	4,53	9,57

Em que: Prof. = Profundidade; pH = Potencial hidrogeniônico; K⁺ = Potássio; Na⁺ = Sódio; Ca²⁺ = Cálcio; Mg²⁺ = Magnésio; Al³⁺ = Alumínio; Al³⁺ + H⁺ = Acidez potencial; SB = Soma das bases; V% = Saturação por bases; m% = Saturação por alumínio; PST = Percentagem de sódio trocável; P = Fósforo.

Fonte: Adaptada de ANDRADE, 2014.

coesos, está relacionada à sua granulometria e à maior quantidade de feições de iluviação de argila. E o horizonte Bt, que é o coeso, tem uma quantidade considerável de argila, sendo o mais argiloso no perfil estudado.

Os valores percentuais do grau de flocculação variaram entre altos, 95 % em sua camada coesa (Bt), medianos nos horizontes mais superficiais (A e E), e um valor baixo com 31 %, na região intermediária do perfil do solo (BE). Baixos índices de flocculação, ou seja, altos índices de dispersão, contribuem para a perda ou iluviação da argila presente no solo, sendo um fator determinante para a formação do caráter coeso de um solo.

De acordo com a caracterização química do solo é possível se verificar que se trata de um solo de baixa fertilidade natural, pois apresenta baixos valores de saturação por bases (V %) e soma das bases (SB), com acidez potencial alta, pH baixo e alta saturação por alumínio (m%).

A percentagem de saturação por alumínio (m%) é extremamente alta para todas as camadas do solo, revelando quanto os pontos de troca de cátions ou da CTC efetiva estão ocupados pelo alumínio, sendo bastante prejudicial ao desenvolvimento das plantas.

O pH em água expôs valores abaixo de 5 em todos os horizontes do solo, com exceção do horizonte BE com valor de 5,05, sendo esses horizontes considerados com acidez média a elevada, o que torna o solo limitado para a produção agrícola, apresentando baixa capacidade de retenção de cátions, dificultando a disponibilidade da maioria dos nutrientes essenciais às plantas, por mais que esses elementos estejam presentes na solução do solo.

Em todos os horizontes do solo analisado, a CTC efetiva apresentou valor baixo, influenciada pelos valores da soma das bases. Essa deficiência na capacidade de troca de cátions favorece bastante a perda de nutrientes por lixiviação. Nas camadas mais profundas (BE e Bt) mesmo com maior presença de argila, o que poderia ocorrer um maior número de cargas negativas, e um maior número de pontos de troca, os valores da CTC permaneceram com valores próximos dos horizontes mais superficiais (A e E). Isso pode ser explicado por essas argilas serem de baixa atividade, compostas por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio.

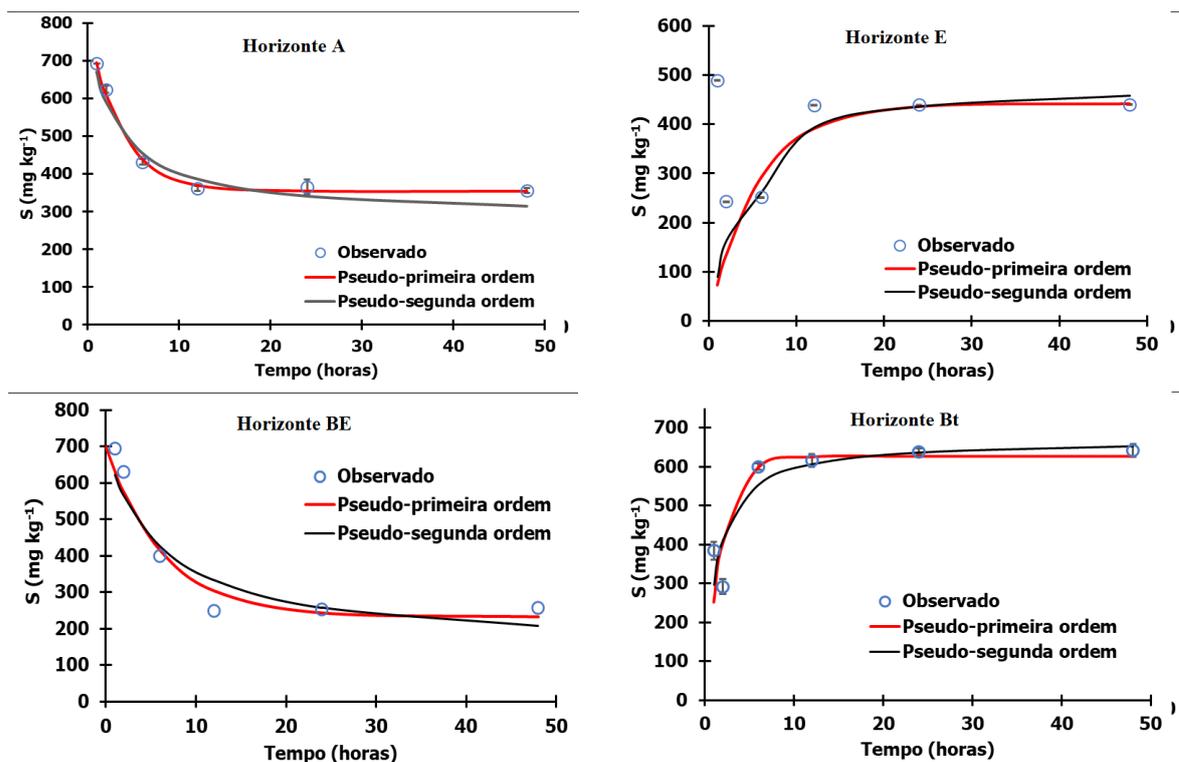
Com relação aos valores de Fósforo (P), as três primeiras camadas do solo apresentaram valores baixos desse elemento, contudo o horizonte Bt se mostrou com valor adequado de P no solo. Para cálcio e magnésio, todos os horizontes do perfil do solo estudado também retrataram valores baixos, o que influencia na baixa saturação de bases, confirmando seu caráter distrófico e sua baixa fertilidade natural.

5.2 Ensaios de adsorção

5.2.1 Estudo cinético com ajustes pelos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem

Os ensaios de cinética de adsorção, em função do tempo de contato das amostras de solos com a PAM, tiveram como objetivo estabelecer o tempo mínimo necessário para atingir o equilíbrio de adsorção. Diante desses ensaios, foi possível se observar o tempo de contato entre a solução de PAM, com concentração de 200 mg L^{-1} , e os adsorventes (amostras de solos dos diferentes horizontes), para a obtenção do equilíbrio de adsorção. As curvas cinéticas foram construídas da relação de quantidade de solução adsorvida, através dos horizontes do solo estudado, em função do tempo, conforme Figura 7.

Figura 7 – Representação gráfica dos ensaios de cinética com os dados observados em laboratório e os modelos de pseudo-primeira ordem (vermelho) e pseudo-segunda ordem (azul), para cada horizonte de solo estudado.



Fonte: O autor (2023).

Perante o observado na Figura 7, o horizonte Bt foi o que mostrou maior velocidade de adsorção da solução, sendo que a maior parte foi adsorvida nas primeiras 08 horas, entrando

em equilíbrio com aproximadamente 12 horas. Em seguida aparece o horizonte E, que precisou de um tempo acima de 18 horas para entrar em equilíbrio. A rápida adsorção nas primeiras horas, entre o adsorvato e o adsorvente, é devida, principalmente, aos numerosos sítios ativos disponíveis na superfície do adsorvente nos estágios iniciais (TANG *et al.*, 2019). Passado esse momento inicial com a ocupação dos sítios de adsorção, no decorrer do processo, é dificultada a ocupação por outras moléculas de PAM, devido às forças de repulsão entre a superfície do adsorvente e do adsorvato. A adsorção que, inicialmente, ocorreu de forma rápida, é devido ao processo ocorrer na superfície externa das partículas sólidas, quase que de forma imediata. Porém, ao longo do tempo, a adsorção passa a ser de forma lenta, ocorrendo na superfície interna das partículas sólidas, no interior dos microporos do adsorvente, até que o processo de sorção é equilibrado.

Os horizontes A e BE apresentaram comportamentos diferentes do esperado para os ensaios de cinética de adsorção, ou seja, mostraram características de uma dessorção, ocorrendo inicialmente uma adsorção da solução com o adsorvente, em seguida ocorre um processo inverso, em que as moléculas da PAM são liberadas pelas partículas do solo, retornando-as para fazer parte da solução, por apresentar maior afinidade com o fluido. Isso também deve ocorrer pela maior presença de material orgânico nessas camadas mais superficiais do solo, ocasionando o fenômeno de hidrofobicidade, que é a repelência do solo à solução contendo o adsorvato.

Com o passar do tempo, a adsorção se tornou gradualmente mais lenta até o equilíbrio ser atingido. Ao atingir o equilíbrio, a capacidade de adsorção foi maior para a amostra de solo do horizonte Bt, e menores para os horizontes BE, E e A, tanto para os ajustes ao modelo de pseudo-primeira ordem, quanto para o modelo de pseudo-segunda ordem, conforme a Tabela 4.

Percebe-se que, para a solução contendo o adsorvato atingir o equilíbrio nas diferentes amostras de solos, houve uma variação de tempo entre 12 e 24 horas, optando-se pelo período de 24 horas para a realização dos ensaios de isotermas, por melhor representar todas as quatro amostras dos adsorventes. Resultados semelhantes foram obtidos por Lu *et al.* (2002), que estudando os efeitos das propriedades do solo e da água na adsorção da PAM, utilizando seis tipos de solos como adsorvente e a poliacrilamida aniônica como adsorvato, mostraram que mais da metade da sorção ocorreu na primeira hora, e mais de 85% nas primeiras 05 horas, contudo, para chegar ao equilíbrio da adsorção o processo durou entre 15 a 22 horas.

Os parâmetros cinéticos foram obtidos a partir da regressão não-linear para cada um dos modelos estudados (pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem), conforme Tabela 4. Foi possível se observar que os valores dos coeficientes de determinação (R^2) e da soma das diferenças ao quadrado entre cada observação e a média de seu grupo (SSE), com relação aos dados experimentais, ajustaram-se adequadamente para os modelos de pseudo-primeira e pseudo-segunda ordem.

Os ajustes aos modelos escolhidos, apresentados na Tabela 4, foram verificados para os dois modelos avaliados, sendo adequados os valores do Coeficiente de Determinação (R^2) e da Soma dos Erros Quadráticos (SSE). Os dados experimentais se ajustaram melhor ao modelo de pseudo-segunda ordem, para os horizontes E e Bt, uma vez que os valores de R^2 foram os mais próximos a 1, indicando uma correlação perfeita entre o tempo de contato da solução com a capacidade de adsorção em equilíbrio. Além disso, os valores da soma dos erros quadráticos (SSE) também foram menores para essas amostras.

Tabela 4 - Valores ajustados dos parâmetros dos modelos de pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem.

Modelos Cinéticos	Parâmetros	Horizonte A	Horizonte E	Horizonte BE	Horizonte Bt
Pseudo cinética de 1ª ordem	S_{e1}	448,60	441,80	466,80	626,70
	k_1	0,28	0,18	0,1561	0,5151
	R^2	0,998	0,813	0,971	0,767
	SSE	396,00	15.954,50	10748,00	30178,50
Pseudo cinética de 2ª ordem	S_{e2}	514,80	537,60	557,00	670,15
	k_2	$6,56 \cdot 10^{-4}$	$3,20 \cdot 10^{-4}$	89,79	$1,19 \cdot 10^{-3}$
	R^2	1,00	0,905	0,926	0,791
	SSE	4831,82	8894,90	19502,50	24214,40

S_e = Capacidade de sorção em equilíbrio (mg g^{-1}); k_1 = Taxa constante de sorção de pseudo-primeira ordem (mg g^{-1}); k_2 = taxa constante de sorção de pseudo-segunda ordem (mg g^{-1}); R^2 = Coeficiente de Determinação; SSE = Soma dos Erros Quadráticos.

Fonte: O autor (2023).

Já para os horizontes A e BE foram obtidos melhores ajustes para o modelo de pseudo-primeira ordem, pois para o coeficiente de determinação (R^2) não houve diferença significativa, porém os valores de SSE foram menores para esses horizontes de solos. Esse melhor ajuste do SSE também está relacionado pela proximidade obtida pelos valores de S_e (capacidades de adsorção do soluto em equilíbrio) experimentais com os valores de S_e calculados. Quando houve o melhor ajuste ao modelo pseudo-primeira ordem, entende-se que

não ocorreu a saturação dos sítios do adsorvente, indicando que a quantidade de PAM disponível é razoavelmente menor que o número dos sítios ativos.

É importante destacar que apenas analisar os valores de R^2 de forma isolada para a escolha de um dos modelos cinéticos não é suficiente, visto que, como ocorreu na amostra do horizonte A, não houve diferença significativa entre os dois modelos quando comparados os valores de R^2 . O valor de R^2 está associado às diferenças individuais de cada ponto em relação à média. Portanto, deve-se avaliar também os valores das somas dos erros quadráticos, pois quanto menores os valores de SSE, menor é a diferença dos dados experimentais para o modelo ajustado.

Foi possível observar que o horizonte BE apresentou valor mais alto da constante k_2 em relação aos demais horizontes estudados. Essa constante cinética k_2 tem por finalidade indicar a taxa com que o sistema atinge o equilíbrio. Logo valores maiores de k_2 indicam que o equilíbrio será atingido em menor tempo. O valor da constante k_2 também pode indicar a alta afinidade entre a poliacrilamida e os demais adsorventes.

Os resultados indicaram que a adsorção da poliacrilamida é controlada pela quimissorção, a qual é considerada um processo de adsorção lento, preconizando que a etapa limitante do processo de adsorção foi a adsorção química na superfície do adsorvente, envolvendo forças de valência através do compartilhamento ou troca de elétrons entre o adsorvente (solo) e o adsorvato (PAM) (KIWAAN *et al.*, 2021).

5.2.2 Isotermas de adsorção

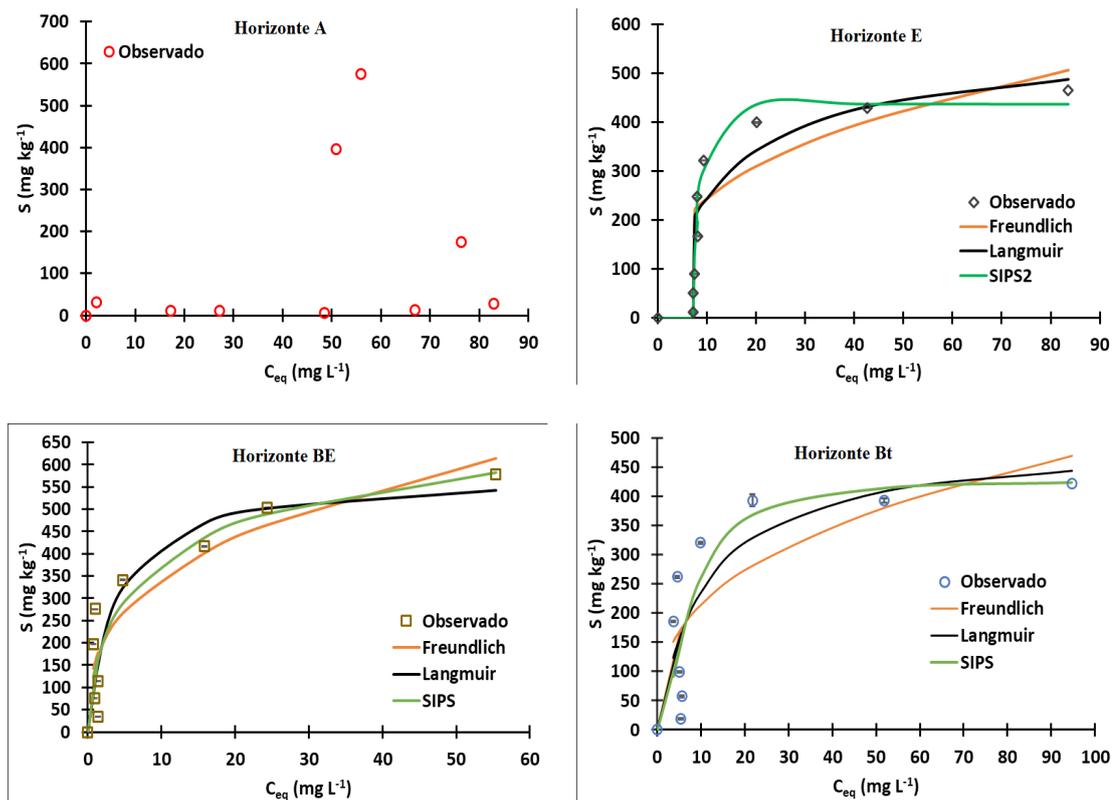
5.2.2.1 Tratamento com solo natural

Para melhor entendimento da relação entre o adsorvato e o adsorvente, os dados experimentais da adsorção da PAM em diferentes concentrações foram ajustados aos modelos isotérmicos de Langmuir, Freundlich e Sips (Lang + Freud), como podem ser vistos na Figura 8.

No tratamento solo natural + PAM, o horizonte A mostrou comportamento aleatório. Tal fato se deu, provavelmente, por conta do horizonte superficial apresentar hidrofobicidade, que é a repelência da água do solo, em consequência da sua maior quantidade de resíduos orgânicos, sugerindo que a composição específica da matéria orgânica presente nesse

horizonte superficial pode afetar o comportamento de adsorção da poliacrilamida, resultando em uma falta de aderência aos modelos isotérmicos utilizados. Portanto, impossibilitado, para o horizonte A, a aplicação dos modelos de isotermas de adsorção. Lu *et al.* (2002) concluíram que a matéria orgânica presente nos solos naturais, utilizados como adsorventes, teve efeito negativo na adsorção da poliacrilamida, pois ao retirar parte desse material orgânico, ocorreu maior interação entre o adsorvato e o adsorvente.

Figura 8 - Isotermas de adsorção para os solos em suas condições naturais de campo.



Fonte: O autor (2023).

Para os demais horizontes (Figura 8, E, BE e Bt), as curvas isotérmicas se mostraram em formato côncavo, sendo isotermas favoráveis, pois possuem capacidade de extrair quantidades relativamente altas, mesmo em níveis baixos da concentração de adsorvato, nesse caso, a poliacrilamida na solução. Essas curvas são do formato de isoterma tipo I, de acordo com a classificação de Brunauer *et al.* (1938).

Conforme classificação de Giles *et al.* (1960), foi possível se observar nos solos dos horizontes E, BE e Bt uma mesma tendência em seus formatos de curva, sendo classificadas

na classe tipo L (de Langmuir), com curvatura inicial voltada para baixo, proveniente da diminuição da disponibilidade de sítios ativos, e de subgrupo 2, o que confirma a saturação da superfície, em que a PAM tem mais afinidade pelo solvente que pelas próprias moléculas já adsorvidas.

A fim de se verificar a adequação das equações, as capacidades máximas de adsorção desses adsorventes são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores dos parâmetros ajustados dos modelos de isotermas Freundlich, Langmuir e Sips, sendo os modelos ajustados pelo Solver do Microsoft Excel 365.

Modelo	Parâmetros	Horizonte E	Horizonte BE	Horizonte Bt
Freundlich	K_F	110,40	157,32	95,60
	n	0,3443	0,340	0,349
	R^2	0,858	0,850	0,672
	SSE	41.637,30	55273,5	79.711,60
Langmuir	K_L	0,0771	0,267	0,0903
	S_{max}	562,99	579,11	495,29
	R^2	0,893	0,849	0,730
	SSE	31.358,70	56.486,80	65594
SIPS	K_s	$1,38 \cdot 10^{-7}$	0,2089	0,0285
	S_{max}	436,54	821,44	429,36
	n_s	7,412	0,6120	1,739
	R^2	0,958	0,862	0,749
	SSE	13144	51015	61.195,40

K_F = Constante de Freundlich $((\text{mg g}^{-1}) \cdot (\text{L mg}^{-1})^{-1/n})$; n = Expoente de Freundlich; K_L = Constante de Langmuir (L/mg) ; S_{max} = Capacidade máxima de adsorção (mg/g) ; K_s = Constante de Sips $((\text{L mg}^{-1})^n)$; n_s = Expoente de Sips; R^2 = Coeficiente de Determinação; SSE = Soma dos Erros Quadráticos.

Fonte: O autor (2023).

Os parâmetros obtidos para os modelos isotérmicos representados na Tabela 5 demonstraram qual modelo isotérmico melhor representa os processos de adsorção estudados. Foram usados como critérios os maiores valores de coeficiente de determinação (R^2) e os menores valores da soma dos erros quadráticos (SSE) (BRIÃO *et al.*, 2018). Observou-se que o modelo de Sips (Lang + Freud) descreveu melhor o processo de adsorção da poliacrilamida para todas as amostras em estudo. A equação de Sips é baseada na teoria de que em baixas concentrações de adsorvato, a adsorção é caracterizada pela equação de Freundlich, e em altas concentrações de adsorvato, a adsorção é caracterizada pela equação de Langmuir, ou seja, ocorre por meio de monocamadas (FOO e HAMEED, 2010).

O modelo de Sips quando comparado aos demais modelos isotérmicos demonstrou valores de coeficiente de correlação (R^2) mais próximos da unidade, e os menores valores de SSE. O que comprova que esse modelo descreveu melhor o processo de adsorção dos ensaios da poliacrilamida nos horizontes de solos estudados, pois foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais das isotermas nos horizontes E, BE e Bt, corroborando que a quantidade adsorvida S_{max} apresentada pelo modelo ajustado se assemelha à quantidade adsorvida experimentalmente S_{exp} .

Diante do melhor ajuste ao modelo isotérmico de Sips, foi possível verificar que o horizonte de solo que apresentou a maior capacidade de máxima de adsorção (S_{max}) foi o horizonte BE, com 821,44 mg g⁻¹. Diferentemente, os horizontes E e Bt apresentaram menores capacidade de adsorção (S_{max}) em relação ao BE, com seus respectivos valores de 436,54 e 429,36 mg g⁻¹.

O valor da constante de capacidade de adsorção de Sips (K_s), foi maior para o horizonte BE, com valor de 0,2089 (L mg^{-1/n}), indicando maior energia de ligação retida nessa amostra de solo em relação aos horizontes E e Bt.

A constante K_L , da isoterma de Langmuir, também foi maior para o horizonte BE, esta relacionada à energia livre de adsorção e a capacidade de adsorção máxima, que representa a afinidade entre o adsorvente e adsorvato (MOREIRA *et al.*, 2019).

Os valores do fator de separação R_L obtidos por meio da constante de Langmuir (K_L), para todos os horizontes variaram entre 0 e 1 (Tabela 6), indicando que o processo de adsorção é favorável, conforme a classificação de Weber e Chakravorti (1974).

Tabela 6 – Relação entre o Fator de Separação R_L e a possibilidade de adsorção, isotermas de Langmuir.

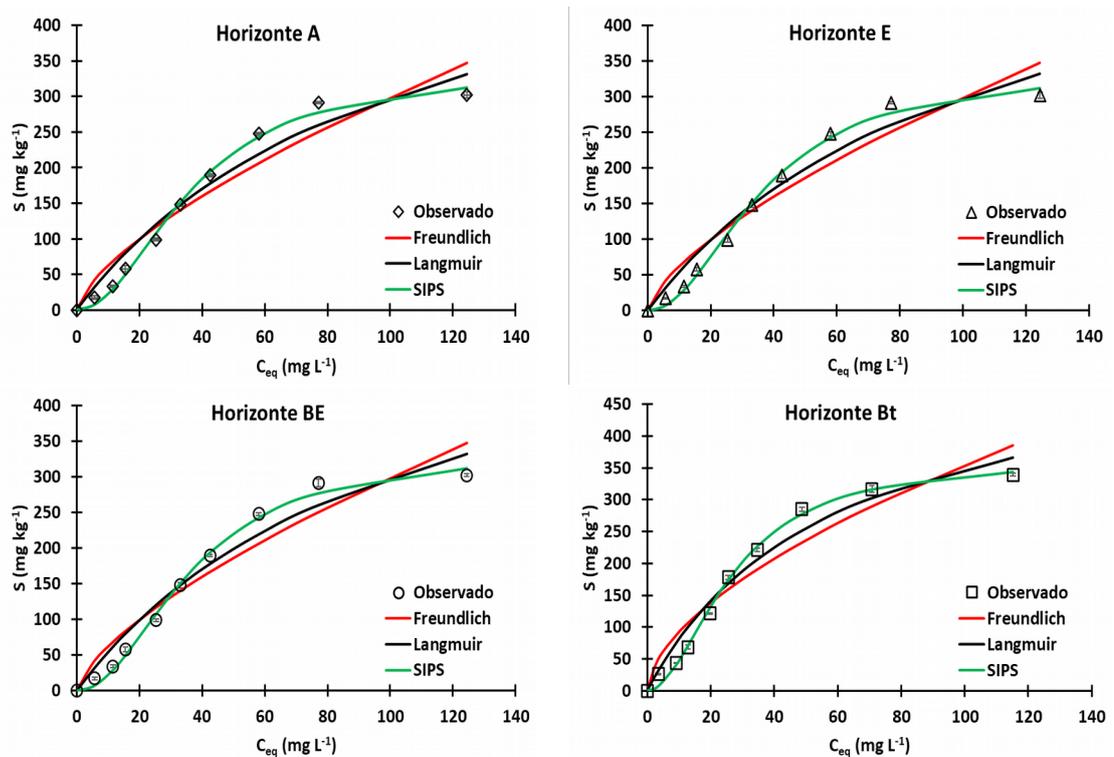
Amostras de solo	Fator de Separação R_L	Tipo de Isotherma
Horizonte E	0,2001	Favorável
Horizonte BE	0,0064	Favorável
Horizonte Bt	0,0218	Favorável

Fonte: O autor (2023).

5.2.2.2 Tratamento com Extração de Agentes Cimentantes do solo

Com relação ao segundo tratamento, em que foram extraídos os agentes cimentantes (Si, Fe e Al) das amostras de solos + a solução de PAM, também foram realizados os ajustes aos modelos isotérmicos de Langmuir, Freundlich e Sips (Lang + Freud), como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Isotermas de adsorção para os solos em que os agentes cimentantes foram extraídos.



Fonte: O autor (2023).

Diferentemente do tratamento do solo natural, no tratamento com a extração dos agentes cimentantes foi possível a obtenção dos ajustes isotérmicos para todos os horizontes, inclusive o horizonte A. Nesse horizonte deve ter havido remoção da matéria orgânica, pois o tratamento para a remoção dos agentes cimentantes, deve ter contribuído para sua eliminação parcial ou total.

As curvas isotérmicas (Figura 9) mostraram formatos de curvas diferentes ao tratamento do solo na condição natural, para todos os horizontes. Apesar dessas diferenças nas curvas, ainda são consideradas isotermas do tipo favorável.

Observando-se as curvas obtidas através dos dados experimentais e dos ajustes dos modelos isotérmicos de Langmuir, Freundlich e Sips, percebe-se o melhor ajuste das curvas ao modelo de Sips. As curvas que representam o modelo de Sips mostram, para todos os horizontes, uma curvatura inicial voltada para cima, ainda em baixas concentrações da solução de PAM, o que conforme a classificação de Giles *et al.* (1960), representa uma isoterma do tipo S, sigmoidal, por serem as interações adsorvente-adsorvato mais fracas que as interações adsorvato-adsorvato e solvente-adsorvente; e do subgrupo 2, o que significa que o adsorvato tem mais afinidade pelo solvente do que pelas moléculas já adsorvidas, não ocorrendo adsorção em multicamadas. Porém, com o aumento da concentração da solução de PAM, ocorreu uma maior adsorção, modificando o formato da curva, até se obter o equilíbrio no processo de adsorção.

Giles *et al.* (1974) relacionam o formato da curva S como a adsorção onde a presença das moléculas individuais de soluto, ligadas ao sólido, interagem umas com as outras, aumentando a força das ligações de solutos individuais à superfície sólida, razão pela qual, por um breve período durante a adsorção, as primeiras moléculas ligadas aumentam a adsorção das próximas moléculas que se ligam ao sólido. Isso pode ser observado pela maior inclinação da isoterma a partir da baixa concentração da PAM. Após a redução dos sítios de sorção, a inclinação da isoterma começa a diminuir novamente.

Conforme a classificação de Brunauer *et al.* (1938), em relação ao formato das curvas das isotermas de adsorção, elas se assemelham a isotermas do tipo I, sendo limitadas a poucas camadas moleculares, e seus poros excedem um pouco o diâmetro molecular do adsorvente.

Os parâmetros das isotermas são apresentados na Tabela 7, sendo possível afirmar que o modelo de isotermas de Sips foi o que melhor representou os dados obtidos experimentalmente para os solos com extração de agentes cimentantes, pois os valores de R^2 para esse modelo foram os mais próximos de 1, todos com valores 0,99. Além dos valores do coeficiente de determinação terem sido mais adequados, a soma dos erros quadráticos (SSE) mostraram valores bem menores para as isotermas de Sips, em comparação com os modelos de Langmuir e Freundlich, indicando maior semelhança dos dados obtidos experimentalmente ao modelo ajustado de Sips.

Diante do melhor ajuste das isotermas ao modelo de Sips, verificou-se para os horizontes de solos Bt e BE os maiores valores de capacidade máxima de adsorção, sendo

363,80 e 361,00 mg g⁻¹, respectivamente. Entretanto, os horizontes E e A mostraram menor capacidade máxima de adsorção, com seus valores respectivos de 317,20 e 338,45 mg g⁻¹.

Tabela 7 - Valores dos parâmetros ajustados dos modelos de isotermas Freundlich, Langmuir e Sips, para os solos com extração de agentes cimentantes, com ajustes dos modelos com uso do Solver do Microsoft Excel 365.

Modelo	Parâmetros	Horizonte A	Horizonte E	Horizonte BE	Horizonte Bt
Freundlich	K _F	12,80	16,90	16,50	23,70
	n	0,684	0,592	0,643	0,587
	R ²	0,928	0,945	0,939	0,926
	SSE	8.856,00	5.207,20	8.008,30	10.979,80
Langmuir	K _L	0,0098	0,0144	0,012	0,0172
	S _{max}	604,40	441,80	574,40	550,50
	R ²	0,965	0,981	0,975	0,970
	SSE	4.766,90	1.866,30	3.553,10	4.685,20
SIPS	K _s	0,0272	0,0273	0,0290	0,0373
	S _{max}	338,45	317,20	361,00	363,80
	n _s	2,046	1,532	1,788	1,937
	R ²	0,995	0,993	0,995	0,996
	SSE	626,40	667,20	627,10	605,70

K_F = Constante de Freundlich ((mg g⁻¹).(L mg⁻¹)⁻¹); n = Expoente de Freundlich; K_L = Constante de Langmuir (L mg⁻¹); S_{max} = Capacidade máxima de adsorção (mg g⁻¹); K_s = Constante de Sips ((L mg⁻¹)ⁿ); n_s = Expoente de Sips; R² = Coeficiente de Determinação; SSE = Soma dos Erros Quadráticos.

Fonte: O autor (2023).

O horizonte Bt na condição de solo natural, apesar de sua granulometria composta pela maior quantidade de argila em relação aos demais horizontes (Tabela 2), mais que o dobro quando comparado ao BE, e a argila por ter maior superfície específica, não confirmou a expectativa de ser o horizonte do solo com os maiores valores de capacidade máxima de adsorção (S_{máx}). Essa expectativa para o horizonte Bt foi confirmada no tratamento do solo em que foram extraídos os agentes cimentantes, apesar de a diferença não ser marcante em relação ao horizonte BE, sendo esses dois horizontes os que apresentaram as maiores quantidades de argila em sua composição granulométrica e os maiores valores da capacidade de adsorção (S_{máx}). Outro fator importante na adsorção é o pH do adsorvente, e os horizontes BE e Bt foram os que apresentaram valores mais altos de pH (Tabela 3).

É possível se verificar que os valores referentes à constante de capacidade de adsorção de Freundlich (K_F), mostraram-se maiores para os horizontes E e Bt, com valores de 16,9 e 23,7, respectivamente. Por outro lado, os horizontes A e Bt evidenciaram valores menores

dessa constante, sendo 12,80 e 16,50, na devida ordem. Os valores de K_F indicam as diferentes energias de ligação retidas nos diferentes adsorventes, sendo maior a energia para os maiores valores da constante.

A constante K_L , da isoterma de Langmuir, também indicou valores maiores para os horizontes E e Bt. Essa constante expressa a interação do adsorvato, a molécula da PAM, com o adsorvente (solo), sendo maior essa relação para os maiores valores de K_L .

Da mesma forma que o tratamento com o solo natural, o tratamento com ausência de Si, Fe e Al apresentou valores do R_L , fator de separação (Tabela 8), variando entre 0 e 1, confirmando que o processo de adsorção para todos os horizontes foi favorável.

Tabela 8 – Relação entre o Fator de Separação R_L e a possibilidade de adsorção, isotermas de Langmuir.

Amostras de solo	Fator de Separação R_L	Tipo de Isotherma
Horizonte A	0,1444	Favorável
Horizonte E	0,1358	Favorável
Horizonte BE	0,1266	Favorável
Horizonte Bt	0,0955	Favorável

Fonte: O autor (2023).

5.2.2.3 Solo natural *Versus* Solo com extração de agentes cimentantes

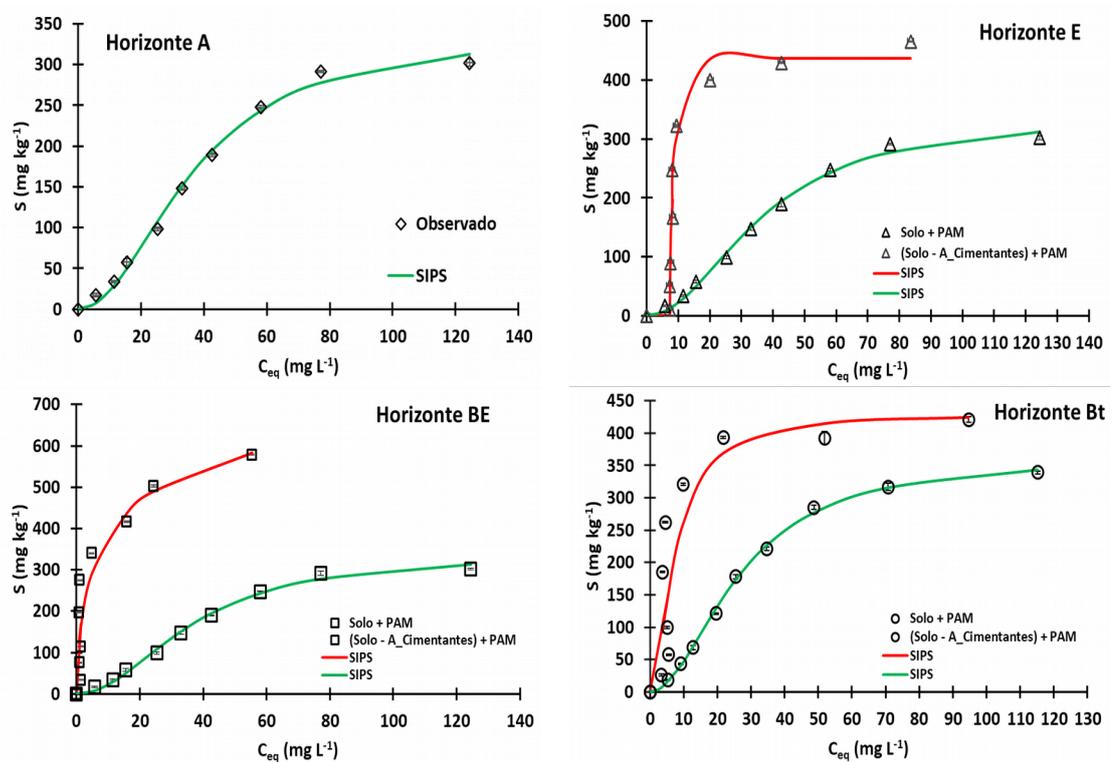
Diante dos resultados das isotermas de adsorção apresentados e do melhor ajuste ao modelo de Sips, entre os tratamentos com os solos na condição natural + as soluções de PAM e com os solos que foram extraídos os agentes cimentantes + as soluções de PAM, foi possível se realizar a comparação entre as curvas isotérmicas dos dois tratamentos (Figura 10). Exceção feita para o horizonte A (Figura 10 A), pois como já mencionado, ele apresentou comportamento aleatório para o ensaio de adsorção, não sendo possível a obtenção dos parâmetros de estudo.

Pode-se destacar que nos horizontes E, BE e Bt, para o tratamento em que foram extraídos os agentes cimentantes do solo, ocorreram menores taxas e capacidade de adsorção quando comparados com o solo natural em relação ao modelo isotérmico de Sips. Diferentemente, o solo natural possui uma adsorção mais rápida e maior capacidade de

adsorção, sendo notável em menores concentrações da PAM, pois a curva apresenta uma maior inclinação, se aproximando mais do eixo da variável dependente (S).

Os solos sem os agentes cimentantes manifestaram curvas, inicialmente, mais próximas de uma forma linear, indicando que a adsorção é proporcional à concentração da solução. Porém quando ocorre o aumento das concentrações da solução de PAM, aumenta a adsorção do adsorvato pelo adsorvente (solo com extração dos agentes cimentantes), até que o processo entre em equilíbrio, sendo observado no formato da curva que é paralela ao eixo da concentração de equilíbrio (C_{eq}), ocorrendo para todos os horizontes do solo.

Figura 10 – Comparação das isotermas de adsorção da PAM nos ensaios com o solo natural e o solo com a extração dos agentes cimentantes.



Fonte: O autor (2023).

A menor capacidade de adsorção observada para os solos sem agentes cimentantes é considerada interessante para esse estudo, pois, infere-se que esses agentes cimentantes quando ausentes ou em pequenas quantidades são determinantes para reduzir a adsorção da poliacrilamida ao solo, e conseqüentemente, ocorre a livre movimentação do polímero ao

longo do perfil de solo, facilitando sua chegada às camadas mais profundas do solo. Porém, em campo não é possível a extração dos agentes cimentantes do solo, portanto, a maior parte da molécula de PAM aplicada em superfície, em doses recomendadas, fica adsorvida às camadas superficiais. Malik e Letey (1991) confirmaram a alta capacidade de adsorção e a baixa mobilidade do polímero, sendo a poliacrilamida considerada incapaz de penetrar no solo mais que alguns centímetros da superfície do solo.

5.2.2.4 Fator de Retardo (R)

Os dados obtidos do fator de retardo “ R ” (equação 14), a partir de parâmetros da isoterma de Sips, contribuíram para o entendimento da lixiviação da poliacrilamida no solo, conforme a Tabela 9. Os valores do fator de retardo mostram quantas vezes a migração ou movimentação de uma substância sujeita à adsorção (PAM) é considerada mais lenta que a velocidade real do escoamento da água nos poros do adsorvente.

Os resultados de R foram mais altos para os ensaios com os solos em condição natural (presença de agentes cimentantes), indicando uma redução na velocidade de deslocamento da solução de PAM ao longo do perfil de solo, e conseqüentemente maior adsorção pelo adsorvente. Diferentemente, os solos sem a presença dos agentes cimentantes, no geral, apresentaram valores de R bem abaixo em relação ao solo natural, em alguns casos com diferenças de aproximadamente 18 vezes o seu valor. Valores mais baixos do fator de retardo indicam menor interação da solução de PAM com o solo, e maior possibilidade na movimentação da PAM ao longo do perfil do solo.

Como não foi possível a obtenção de parâmetros isotérmicos para o horizonte A nos solos com a presença dos agentes cimentantes, também não foi realizado o cálculo do fator de retardo para esse ensaio. Entretanto, para o horizonte A com ausência dos elementos cimentantes foram determinados os valores de R , esses valores foram mais altos para as concentrações baixas e médias, entre 10 e 70 mg L⁻¹, e mais baixos para as concentrações mais altas. Esse comportamento para o fator de retardo ocorreu para todos os horizontes, com e sem agentes cimentantes.

Os valores de R mais altos ocorrem pela alta disponibilidade dos sítios ativos de adsorção. Após a diminuição da disponibilidade dos sítios de adsorção, os valores de R diminuem, aumentando a mobilidade da poliacrilamida no solo, isso é observado nas maiores

concentrações do adsorvato na solução. Portanto, para ocorrer o deslocamento da PAM em superfície para camadas mais profundas de um perfil de solo, é necessária uma aplicação com concentrações altas de solução, caso contrário, a maior parte da PAM aplicada, ou toda, seria adsorvida às camadas mais superficiais do solo, não chegando ao horizonte coeso, e, portanto, não sendo obtida a melhoria das condições físicas dessa camada adensada que é o principal objetivo da aplicação do polímero.

Tabela 9 – Valores do Fator de Retardo para os solos em condição natural e com extração dos agentes cimentantes.

PAM mg L ⁻¹	Fator de Retardo (R)						
	Solo condição natural			Solo sem agentes cimentantes			
	E	BE	Bt	A	E	BE	Bt
10	1,0	690,5	50,5	26,9	41,8	38,0	38,1
20	1,0	923,4	52,0	48,2	53,2	58,9	77,2
30	1,0	694,0	49,0	57,1	54,4	65,1	87,3
50	1,0	1.080,9	39,7	60,6	47,6	63,1	83,4
70	1,0	887,1	45,7	53,1	36,2	54,2	70,3
90	1,0	232,9	69,2	40,9	27,2	40,1	49,0
120	1,0	61,7	74,0	25,3	17,7	25,7	27,4
150	1,0	36,5	33,3	14,3	10,8	15,0	12,5
200	1,0	12,8	11,1	4,9	4,9	5,7	4,3

Fonte: O autor (2023).

Todos os horizontes apresentaram valores de retardo (R) altos, que segundo a escala de mobilidade para pesticidas definido por Liang e Khan (1987), classifica a PAM como sendo bastante imóvel ($R > 10$), exceto para concentrações aplicadas acima de 200 mg L⁻¹, onde classificaria a PAM como sendo moderadamente ($3 < R < 10$).

O horizonte E com a presença de agentes cimentantes apresentou valores de *R* iguais a 1, pois o parâmetro da constante de Sips (K_s) obtido, foi um valor muito baixo, $1,38 \cdot 10^{-7}$, próximo a 0 (zero). Por isso, para todas as concentrações da PAM na solução, os valores do fator de retardo foram aproximados a 1, o que nessa condição indica muita mobilidade da molécula de PAM no solo e pouca afinidade do adsorvato pelo adsorvente. Porém, os demais parâmetros da isoterma de Sips evidenciaram que esse horizonte possui boa capacidade de adsorção à molécula de PAM.

Também é possível destacar que o horizonte E, em comparação com os demais horizontes de solo sem agentes cimentantes, resultou nos menores valores de R , confirmando, entre os demais horizontes de solos, a menor capacidade máxima de adsorção (S_{max}) obtida através do modelo matemático de Sips, e sua menor interação da solução pelo adsorvente, conseqüentemente uma mobilidade ligeiramente maior do polímero no solo.

O horizonte BE apresentou a maior diferença dos valores de R entre os solos com e sem agentes cimentantes, sendo maior para o solo natural, com valor de retardo na solução com concentração de 50 mg L^{-1} de 1080,9, sendo muito imóvel a PAM no solo. Isso confirma a contribuição dos agentes cimentantes no solo para maior adsorção da solução contendo a poliacrilamida.

O horizonte de solo Bt em condição natural e sem a presença de agentes cimentantes no solo foi o que resultou em valores de R mais próximos quando comparados aos demais tratamentos, principalmente nas concentrações mais baixas da solução contendo a PAM. Contudo, nas concentrações mais altas, entre 120 e 200 mg L^{-1} , o solo com os agentes cimentantes apresentou valores quase 3 vezes maiores do fator de retardo, atestando as maiores afinidades e adsorções obtidas pelos parâmetros isotérmicos do modelo de Sips.

5.2.2.5 Coeficiente de Partição (K_D)

Outra ferramenta importante para a estimativa do potencial de adsorção da poliacrilamida no solo é o Coeficiente de Partição (K_D), que possui relação proporcional direta com o fator de retardo. Quanto maior o seu valor, maior é a tendência de adsorção e permanência da PAM no solo, Tabela 10.

Os valores de K_D foram bem mais altos para todos os horizontes de solos com a presença dos agentes cimentantes, quando comparados aos solos com ausência desses agentes. Isso ratifica mais uma vez, a relevância dos agentes cimentantes como fator determinante na maior adsorção da poliacrilamida nos solos estudados nessa pesquisa.

Os resultados do K_D revelaram os maiores valores para o horizonte BE, com o solo na condição natural, chegando a $163,60 \text{ L g}^{-1}$ com a concentração da PAM a 50 mg L^{-1} . Esses maiores valores do K_D para esse horizonte corroboram sua maior capacidade de adsorção, e possuem o mesmo comportamento que o fator de retardo, com altas taxas em concentrações

menores da solução de PAM, sendo elas reduzidas com o aumento da concentração do adsorvato.

A poliacrilamida aniônica, quando aplicada em solos naturais, demonstrou alta capacidade de retenção, resultando em parâmetros de " K_D " e " R " elevados. Essa retenção provavelmente está relacionada à interação dos polímeros com argila, especificamente nas bordas quebradas dos minerais, onde as cargas positivas dos íons de alumínio ou de outros elemento substituídos na rede cristalina podem ser expostas (Greenland, 1972).

Tabela 10 – Valores do Coeficiente de Partição para os solos em condição natural e com extração dos agentes cimentantes.

PAM mg L ⁻¹	Coeficiente de Partição (K_D , L g ⁻¹)						
	Solo condição natural			Solo sem agentes cimentantes			
	E	BE	Bt	A	E	BE	Bt
10	-	120,70	27,70	1,29	2,76	2,12	1,94
20	-	146,70	27,90	2,51	3,89	3,58	4,40
30	18,00	121,10	27,50	3,19	4,21	4,26	5,49
50	23,90	163,60	25,10	4,25	4,54	5,11	6,56
70	22,30	142,80	26,90	4,56	4,38	5,26	6,79
90	32,20	61,00	26,30	4,56	4,06	5,08	6,53
120	21,70	27,50	16,90	4,18	3,53	4,56	5,68
150	10,20	20,10	8,00	3,60	2,93	3,86	4,46
200	5,20	10,50	4,50	2,51	2,10	2,70	2,98

Fonte: O autor (2023).

Quando o solo passa por um tratamento de remoção de agentes cimentantes, como óxidos e matéria orgânica, os parâmetros de " K_D " e " R " diminuem consideravelmente. Isso se deve ao fato de que a poliacrilamida aniônica requer eletrólitos suficientes para superar a atração entre os sítios aniônicos do polímero e os sítios catiônicos presentes nas superfícies minerais. Além disso, a presença de polications, como os íons Ca²⁺ e Mg²⁺ podem funcionar como uma “ponte” entre os sítios de carga negativa do polímero e as superfícies minerais, fortalecendo a interação entre eles (Laird, 1997; O’Gorman e Kitchener, 1974; Orts *et al.*, 2001; Pefferkorn, 1999; Theng, 1982; Wallace e Wallace, 1996).

Assim, ao ocorrer a remoção dos agentes cimentantes do solo, há uma diminuição na disponibilidade de eletrólitos e cargas positivas, resultando em uma redução nos sítios de

adsorção disponíveis para a poliacrilamida aniônica. Conseqüentemente, a poliacrilamida se torna mais livre para se deslocar ou se movimentar em direção às camadas subsuperficiais do solo.

Essas observações são particularmente relevantes em solos caracterizados como coesos, nos quais a coesão é mais pronunciada em uma faixa de profundidade entre 30 e 70 cm. A coesão nesses horizontes pode dificultar a infiltração de água e o crescimento das raízes, apresentando implicações significativas para a agricultura. No entanto, a aplicação da poliacrilamida nesses solos coesos tem demonstrado a capacidade de melhorar as características físicas do solo, reduzindo a coesão e facilitando a movimentação da água e das raízes (Sojka *et al.*, 2007).

Em resumo, a remoção dos agentes cimentantes do solo resulta em uma redução nos parâmetros de " K_D " e " R ", o que favorece ligeiramente a mobilidade da poliacrilamida aniônica se for aplicada a concentrações elevadas, que nestes ensaios seriam para concentrações acima de 200 mg L⁻¹. Com esse aumento do deslocamento da PAM ao longo do perfil de solo, ainda sim, não seria possível afirmar que a PAM alcançaria à camada coesa, o suficiente para o polímero promover as melhorias no solo. Entretanto, Silva (2019) obteve resultados satisfatórios quanto à melhoria das características físicas do horizonte coeso, aplicando a solução de PAM com concentração de 250 mg L⁻¹ na superfície do solo e em suas condições naturais de campo.

6. CONCLUSÕES

As interações entre a PAM e os solos, tanto no horizonte coeso, quanto nos horizontes superiores a ele, em condição natural do solo ou com a extração dos agentes cimentantes, apresentaram características de quimissorção no processo adsorptivo.

Os modelos cinéticos de pseudo-primeira e de pseudo-segunda ordem avaliados foram adequados aos ensaios propostos, contudo, os horizontes de solos E e Bt foram melhores representados pelo modelo de pseudo-segunda ordem, enquanto para os horizontes A e BE foram obtidos melhores ajustes ao modelo de pseudo-primeira ordem.

O modelo de isoterma de adsorção de Sips foi o mais adequado quanto ao ajuste aos dados experimentais na interação da solução de poliacrilamida com os horizontes do solo estudado, tanto para os solos em condição natural, com agentes cimentantes, quanto para os solos que tiveram esses elementos extraídos.

A capacidade máxima de adsorção da PAM para o modelo de Sips foi maior para o tratamento com o solo com agentes cimentantes em relação aos solos sem a presença dos agentes cimentantes.

A taxa de adsorção da PAM ao solo foi maior para o solo com presença de agentes cimentantes ao longo do perfil de solo.

A remoção dos agentes cimentantes do solo coeso promoveu uma redução na adsorção da PAM, refletindo, também, os menores valores do coeficiente de partição KD.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIDIN, A. Z.; PUSPASARI, T.; NUGROHO, W. A. Polymers for enhanced oil recovery technology. **Procedia Chemistry**, v. 4, p. 11-16, 2012.

ALMEIDA, B. G. **Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo**. 2008. 105 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - A Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

ÁLVAREZ, S. RIBEIRO, R. S.; GOMES, H. T.; SOTELO, J. L.; & GARCÍA, J. Synthesis of carbon xerogels and their application in adsorption studies of caffeine and diclofenac as emerging contaminants. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 95, p. 229-238, 2015.

ANDRADE, K. R. **Atributos físico-hídricos de solos coesos da zona da mata de Pernambuco sob ação de condicionadores químicos**. 2014. 116 p. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciências do Solo, Universidade Federal Rural Pernambuco, Recife, 2014.

ANTUNES, MARIA LUCIA PEREIRA; CONCEIÇÃO, F. T.; NAVARRO, G. R. B.; FERNANDES, A. M., & DURRANT, S. F. Use of red mud activated at different temperatures as a low cost adsorbent of reactive dye. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, p. 805-811, 2021.

BAZZO, A. **Aplicação e Caracterização do caroço de Abacate (Persea Americana Mill) como Adsorvente na remoção do Corante Violeta Cristal**, 2015. 83 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Programa Pós Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul., 2015. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/117661/000966805.pdf?sequence=1>. Acesso em: 24 jul. 2022.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P.H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.

CHAYID, M. A.; AHMED, M. J. Amoxicillin adsorption on microwave prepared activated carbon from *Arundo donax* Linn: isotherms, kinetics, and thermodynamics studies. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.3, n. 3, p. 1592-1601, 2015.

CHÁVEZ, CARLOS; FUENTES, CARLOS; VENTURA RAMOS, EUSEBIO. Uso eficiente del agua de riego por gravedad utilizando yeso y poliácridamida. **Terra Latinoamericana**, v. 28, n. 3, p. 231-238, 2010.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CURI, N.; TORRES, T. C. P. Caracterização física, química, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 297–313, 2008. DOI: 10.1590/S0100-06832008000100028.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; ARAÚJO FILHO, J. C. D.; CAMÊLO, D. D. L. Formas De Ferro, Silício e, ou, Alumínio na Gênese de Fragipãs e Horizontes Coesos dos Tabuleiros Costeiros. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, v. 39, p. 940-49, 2015.

CURBELO, F. D. S. **Recuperação avançada de petróleo utilizando tensoativo**. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

DE CARVALHO, V. S.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S., BRILHANTE, S. A.; Caracterização de Espodossolos dos Estados da Paraíba e do Pernambuco, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.37, n.6, p.1454-1463, 2013.

DE SOUSA, LAILSON; ALEXANDER VILLA-VÉLEZ, HARVEY; DA SILVA LEITE COELHO, PAULO HENRIQUE. Cinética da adsorção de óleo diesel por bioadsorventes de fibras in natura de coco (*cocos nucifera*). **Revista ION**, v. 35, n. 1, 2022.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de classificação de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 306p.

FERREIRA, P. P. L.; BRAGA, R.M; TEODORO, N. M.A.; MELO, V. R. M.; MELO, D. A. M.; MELO, M. A. F. Adsorção de Cu^{2+} e Cr^{3+} em efluentes líquidos utilizando a cinza do

bagaço da cana-de-açúcar (Adsorption of Cu^{2+} and Cr^{3+} in wastewater using bagasse fly ash). **Cerâmica**, v. 61, p. 435-441, 2015.

FLINT, A. L.; FLINT, L.E. Particle density. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. **Madison**: Soil Science Society of America, pt. 4, 2002, p. 229-240.

FOO, K.Y.; HAMEED, B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p. 2-10, 2010.

FREITAS, T. L.; BERTONHA, A.; ANDRADE, A. C. Uso de hidrogel na agricultura. **Revista do Programa de Ciências Agro-Ambientais**, Alta Floresta, v. 1, n. 1, p. 23-31, 2002.

FREITAS, J. S. et al. Fotodegradação de hidrogel de poli(acrilamida) na presença de substâncias químicas para o uso na agricultura. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 3, set. 2019. Não paginado.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. D.; TORMENA, C.; SOUZA, L. D. S.; RIBEIRO, L.D.P. Similaridades entre o caráter coeso dos solos e o comportamento hardsetting: estudo de caso. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 25, p. 239-247, 2001.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, ALVARO PIRES da. Conceitos sobre solos coesos e hardsetting. **Scientia Agrícola**, v. 59, p. 613-620, 2002.

GILES, C. H.; MACEWAN, T. H.; NAKHWA, S. N.; & SMITH, D. 786. Studies in adsorption. Part XI. A system of classification of solution adsorption isotherms, and its use in diagnosis of adsorption mechanisms and in measurement of specific surface areas of solids. **Journal of the Chemical Society (Resumed)**, p. 3973-3993, 1960.

GILES, C. H.; SMITH, D.; HUITSON, A.. A general treatment and classification of the solute adsorption isotherm. I. Theoretical. **Journal of colloid and interface science**, v. 47, n. 3, p. 755-765, 1974.

GREENLAND, D. J. (1972). Interactions between organic polymers and inorganic soil particles. In “**Proceedings of a Symposium on the Fundamentals of Soil Conditioning**” (M. DeBoodt, Ed.), State University of Ghent, Ghent, Belgium, pp. 205–220.

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Soil Science Society of America Journal, Madison.: pt. 4, 2002, p. 201-225.

HO, Y. S.; MCKAY, G. Comparative sorption kinetic studies of dye and aromatic compounds onto fly ash. **Journal of Environmental Science & Health Part A**, v. 34, n. 5, p. 1179-1204, 1999.

JACOMINE, P. K. T. Evolução do conhecimento sobre solos coesos no Brasil. In: Workshop coesão em solos dos tabuleiros costeiros. p. 19-46. 2001.

JACOMINE, P.K.T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos Tabuleiros Costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS, Cruz das Almas, 1996. **Pesquisa e desenvolvimento para os Tabuleiros Costeiros**; anais. Aracaju: EMBRAPA, CPATC; EMBRAPA, CNPMF; EAUFBA; IGUFBA, 1996. p.13-24.

KANG, J.; SOWERS, T. D.; DUCKWORTH, O. W.; AMOOZEGAR, A.; HEITMAN, J.L; MCLAUGHLIN, R. A.; Turbidimetric determination of anionic polyacrylamide in low carbon soil extracts. **J. Environ. Qual.** 42, p. 1902–1907, 2013. DOI:10.2134/jeq2013.07.0279.

LAGERGREN, STAN. Zur theorie der sogenannten adsorption geloster stoffe. Kungliga svenska vetenskapsakademiens. **Handlingar**, v. 24, p. 1-39, 1898.

LAIRD, D. A. Bonding between polyacrylamide and clay mineral surfaces. **Soil Sci.** v. 162, n. 11, p. 826-832, Nov., 1997.

LANDE, S. S., BOSCH, S. J. HOWARD, P. H. Degradation and leaching of acrylamide in soil. **J. Environ. Qual.** 8, 133–137 (1979). DOI:10.2134/jeq1979.00472425000800010029x.

LANGMUIR, I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids. Part I. Solids. **Journal of the American Chemical Society**, v. 38, n. 11, p. 2221-2295, 1916.

LIANG, T.; KHAN, M. A. Mapping pesticide contamination potential of Oahu's groundwater resources utilizing eleven pesticides. Rep. submitted to Hawaii State Off. Environ. Qual. Control (unpublished), 1987.

LIMA NETO, J. D. A.; RIBEIRO, M. R.; CORRÊA, M. M.; SOUZA-JÚNIOR, V. S. D.; ARAÚJO FILHO, J. C. D.; & LIMA, J. F. W. Atributos químicos, mineralógicos e micromorfológicos de horizontes coesos de Latossolos e Argissolos dos tabuleiros costeiros do estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 473-486, 2010.

LOPES, J. L. W., SILVA, M. R., SAAD, J. C. C., *et al.*, Uso de hidrogel na sobrevivência de mudas de *Eucalyptus urograndis* produzidas com diferentes substratos e manejos hídricos, **Ciência Florestal**, v. 20, pp. 217-224, 2010.

LÓPEZ-ELÍAS, J.; GARZA, S.; JIMÉNEZ, J.; HUEZ, M. A.; GARRIDO, O. D. Uso de un polímero hidrófilo a base de poliacrilamida para mejorar la eficiencia en el uso del agua. **European Scientific Journal**, v. 12, n. 15, 2016.

LU, J.H.; WU, L.; LETEY, J. Effects of soil and water properties on anionic polyacrylamide sorption. **Soil Science Society of America Journal**. v. 66, p. 578–584. 2002.
DOI:10.2136/sssaj2002.5780.

MALIK, M.; and LETEY, J. (1991). Adsorption of polyacrylamide and polysaccharide polymers on soil materials. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 55, p. 380–383.

MALVESTIO, A. C. **Estudo da adsorção de ácidos graxos voláteis através de troca iônica em ensaios em batelada e coluna de leito fixo**. 2010. 71f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MARCELO, V.F.; ALMEIDA, B.G.; ARAÚJO FILHO, J.C.; SOUZA, S.L.W. Disponibilidade hídrica de solo coeso sob a ação de poliacrilamida: qualidade física ambiental. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**. Rio de Janeiro, n. 42, p. 12-25, 2016.

MARCELO, V. F. **Uso de condicionador de baixo impacto ambiental para melhoria da qualidade de solos coesos de Pernambuco**. 2019. 87 p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) UFPE, Recife, 2019.

MARIA, CAROLINE PLANSKI; DA SILVA, YARA PROCK; DOS SANTOS, GUSTAVO HENRIQUE FIDELIS. Avaliação de modelos cinéticos da adsorção do corante azul de metileno pelo adsorvente zeína. **Jornada De Iniciação Científica E Tecnológica**, v. 1, n. 12, 2022.

McKEAGUE, J.A.; DAY, J.H. Dithionite and oxalate – extractable Fe and Al as Aids in differentiating various classes of soils. **Can. J. Soil Sci.**, v.46, p.13-22, 1966.

MCQUARRIE, DONALD ALLAN; SIMON, JOHN DOUGLAS. **Physical chemistry: a molecular approach**. Sausalito, CA: University science books, 1997.

MELO, D. V. M.; ALMEIDA, B. G.; SOUZA, E. R.; SILVA, L. S.; JACOMINE, P. K. T. Structural quality of polyacrylamide-treated cohesive soils in the coastal tablelands of Pernambuco. **REVISTA BRASILEIRA DE CIENCIA DO SOLO [online]**. 2014, v. 38, n. 2, pp. 476-485. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200012>>. Acesso: 10 Jan. 2022. ISSN 1806-9657. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200012>.

MIRANDA, M.A.; OLIVEIRA, E.E.M.; SANTOS, K.C.F.; FREIRE, M.B.G.S.; ALMEIDA, B.G. Condicionadores químicos e orgânicos na recuperação de solo salino-sódico em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 5, p.484-490, 2011.

MIRANDA, M. F. A.; FREIRE, M. B. G. S.; ALMEIDA, B. G.; FREIRE, A. G.; FREIRE, F. J.; PESSOA, L. G. M. Improvement of degraded physical attributes of a saline-sodic soil as influenced by phytoremediation and soil conditioners. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v.64, p.1 - 15, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2017.1419195>

MIRANDA, M. F. A.; FREIRE, M. B. G. S.; ALMEIDA, B. G.; FREIRE, F. J.; PESSOA, L. G. M.; FREIRE, A. G. Phytodesalination and chemical and organic conditioners to recover the chemical properties of saline-sodic soil. **Soil Science Society of America Journal**. , v.85, p.132 - 145, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20173>.

MONTEIRO, KEIVISON A.; SANTOS, WDISON C.; BRITO, MYLENA J.P.; SILVA, ALINE A dos S.; FERREIRA, JOSÉ P. R.; Adsorção de corante têxtil em carvão ativado produzido a partir de resíduo da agroindústria, 2022. Uberlândia, MG. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 40, **Anais [...]**. Uberlândia, MG, 2022. Disponível em: <http://enemp2022.com.br/trabalhosfinais/SEP42.pdf>. Acesso em: 10 dezembro 2022.

MOREAU, A. M. S. D. S.; COSTA, L. M. D.; KER, J. C., & GOMES, F. H. Gênese de horizonte coeso, fragipã e duripã em solos do tabuleiro costeiro do sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 1021-1030, 2006.

MOREIRA, J. V. I., SOUSA, R. B., MORAIS, L. N., BORBA, R. D., XAVIER, G. R., SIGNINI, R., (2019). Avaliação da adsorção de íons níquel (II) e cádmio (II) em quitosana, quitosana reticulada e carboximetilquitosana reticulada. **Revista Virtual de Química**,11, 237.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resource Research**, Washington, v. 12, p.513-522, 1976.

NASCIMENTO, Ronaldo Ferreira do et al. ADSORÇÃO: aspectos teóricos e aplicações ambientais. E-book. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2014. 256 p. Disponível em:<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/10267>. Acesso em: 10 mar. 2022.

NASCIMENTO, R. F. do et al. Adsorção: aspectos teóricos e aplicações ambientais. E-book. 2. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária. 2020. (Estudos da pós-graduação). Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/53271>. Acesso em: 24 abr. 2022.

O’GORMAN, J. V.; KITCHENER, J. A. Flocculation and de-watering of kimberlite clayslimes. **Int. J. Miner. Process.** v.1, n. 1, p. 33–49, 1974.

ORTS, W. J., SOJKA, R. E., GLENN, G. M., and GROSS, R. A. (2001). Biopolymer additives for the reduction of soil erosion losses during irrigation. In “Biopolymers from Polysaccharides and Agropoteins” (R. A. Gross and C. Scholz, Eds.), pp. 102–116. ACS Symposium 786. American Chemical Society, Washington, DC.

PEFFERKORN, E. Polyacrylamide at solid/liquid interfaces. **J. Colloid Interface Sci.** v. 216, n. 2, p. 197–220, 1999.

PORTELA, S. B. **Práticas de manejo para a sustentabilidade da produção agrícola em solo tropical coeso**. 2021. Tese (Doutorado em Agroecologia) - Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2021.

PREVEDELLO, C.L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo com problemas resolvidos**. 2 ed. rev. e ampl.. Curitiba: C. L. Prevedello, 2015. 474p. ISBN: 8590757420.

RIBEIRO, L.P. Evolução da cobertura pedológica dos tabuleiros costeiros e a gênese dos horizontes coesos. *In: WORKSHOP COESÃO EM SOLOS DOS TABULEIROS COSTEIROS*, Aracaju, 2001. Anais. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2001b. p.93-121.

SANTONI, N.; MATOS, M.; MÜLLER-KARGER, C.; NICOLA, H.; SABINO, M. A.; & SÁNCHEZ, A. J. M. Caracterización de Hidrogeles de quitosano entrecruzados covalentemente con Genipina. **Revista Iberoamericana de Polímeros**, Madrid, v. 9, n. 3, p. 326-330, 2008.

SANTOS, H. G. da et al. [Editores técnicos]. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa solos, 2006.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. D.; SANTOS, H. D.; KER, J. C., ANJOS, L. D.; & SHIMIZU, S. H. Manual de descrição e coleta de solos no campo. 7. ed. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 100p. 2015.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAÚJO FILHO J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F.x. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. rev. e ampl.. Brasília, DF: Embrapa, 355p. 2018.

SEKI, A. S.; SEKI, F. G. JASPER, S. P.; SILVA, P. R. A.; & BENEZ, S. H. Efeitos de práticas de descompactação do solo em área sob sistema plantiodireto1. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 46, p. 460-468, 2015.

SEYBOLD, C.A. Polyacrylamide review: soil conditioning and envi-ronmental fate. **Commun soil sci plant. Tylor e Francis Online**. v. 25, p. 2171-218, 1994.

SILVA JÚNIOR, J. D.; ARAÚJO, I. D.; BARREIRA NETO, M.; & ESPÍNDOLA, A. C. M. Recursos genéticos nos tabuleiros costeiros e baixada litorânea do Nordeste. In: SILVA JUNIOR, J. F.; LÉDO, A. S. (Eds.). **A cultura da mangaba**. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, p. 57-74, 2006. DOI:10.13140/2.1.5134.2723.

SILVA, NEURA MENDES da. **Manejo de solo com poliacrilamida em tabuleiro costeiro de Pernambuco**. 2019. 47 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2019.

SIPS, R. On the structure of a catalyst surface ii. **The Journal of Chemical Physics**, v. 18, p. 1024–1026, 1950.

SOJKA, R. E.; BJORNEBERG, D. L.; ENTRY, J. A.; LENTZ, R. D.; & ORTS, W. J. Polyacrylamide in agriculture and environmental land management. **Advances in agronomy**. v. 92, p. 75 –162, 2007. DOI:10.1016/S0065-2113(04)92002-0

TADINI, CARMEN CECILIA; TELIS, VÂNIA REGINA NICOLETTI; DE ALMEIDA MEIRELLES, ANTONIO JOSÉ. **Operações unitárias na indústria de alimentos**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

TAHIR, S.S.; RAUF, N. Removal of a cationic dye from aqueous solutions by adsorption onto bentonite clay. **Chemosphere**, v. 63, n. 11, p. 1842-1848, 2006.

THENG, B. K. G. Clay-polymer interaction: Summary and perspectives. **Clays Clay Miner.** v. 30, n.1, p. 1–10. 1982.

TEIXEIRA, W.; MARQUES, J. D. O.; STEINER, C.; & FLANAGAM, R. Retenção de água em carvão de bambu e madeira produzidos a diferentes temperaturas. In: DRUMOND, P. M.; WIEDMAN, G. (Org.). **Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia**. Rio de Janeiro: Instituto Ciência Hoje, 2017. p. 368-381. Disponível em:
<https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=1081413&biblioteca=vazio&busca=1081413&qFacets=1081413&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1> Acesso em: 24 jun. 2022.

TOLSTIKH, L. I.; AKIMOV, N. I.; GOLUBEVA, I. A.; & SHVETSOV, I. A. Degradation and Stabilization of Polyacrylamide in Polymer Flooding Conditions. **International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials**, v.17, p.177–193. 1992.
DOI:10.1080/00914039208041113

TÓTH, A.; TÖRŐCSIK, A.; TOMBÁCZ, E.; OLÁH, E.; HEGGEN, M.; LI, C.; & LÁSZLÓ, K. Interaction of phenol and dopamine with commercial MWCNTs. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 364, n. 2, p. 469-475, 2011.

USEPA. 1999. **Understanding Variation in Partition Coefficient, K_d, Values**: Volume I (402-R-99-004a), Volume 2 (402-R-99-004b), Volume 3 (402-R-04-002c).

VIEIRA, J. M.; ROMERO, R. E.; FERREIRA, T. O.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Contribuição de material amorfo na gênese de horizontes coesos em Argissolos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.43, p. 623-632, 2012.

VIEIRA, J. M. **Fatores físicos e agentes químicos envolvidos na gênese de solos com caráter coeso**, 2019, 102 p, Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação de Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

WALLACE, A., and WALLACE, G. A. (1996). Need for solution or exchangeable calcium and/or critical EC level for flocculation of clay by polyacrylamides. In “Proceedings of the Managing Irrigation-Induced Erosion and Infiltration with Polyacrylamide” (R. E. Sojka and R. D. Lentz, Eds.), May 6–8, 1996, College of Southern Idaho, Twin Falls, ID. University of Idaho Misc. Pub. 101-96, pp. 59–63.

WEBER, WALTER J. **Physicochemical process for water quality control**. New York: Wiley-Interscience, p. 199-255, 1972.

WEBER, Thomas W.; CHAKRAVORTI, Ranjit K. Modelos de difusão sólida e porosa para adsorvedores de leito fixo. **AIChE Journal**, v. 20, n. 2, p. 228-238, 1974.

WEN, Q. Biodegradation of polyacrylamide by bacteria isolated from activated sludge and oil-contaminated soil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 175, n. 1-3, p. 955-959, 2010.

XIONG, B., LOSS, R. D., SHIELDS, D., PAWLIK, T., HOCHREITER, R., ZYDNEY, A. L., & KUMAR, M. Polyacrylamide degradation and its implications in environmental systems. **Npj Clean Water**, v.1, 1. 2018. DOI:10.1038/s41545-018-0016-8

YANEVA, Z.; KOUMANOVA, B. Comparative modelling of mono-and dinitrophenols sorption on yellow bentonite from aqueous solutions. **Journal of colloid and interface science**, v. 293, n. 2, p. 303-311, 2006.

ZOLA, R. S. **Estudo de adsorção-dessorção: Equação cinética e efeito memória**. 2007. Dissertação (Mestrado em física) - Programa de pós-graduação em física, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.