



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**VANESSA OHANA GOMES MOREIRA**

**APLICAÇÃO DE HIDROGEL POLI(ACRILAMIDA-CO-ACRILATO) NA  
REMEDIAÇÃO DE SOLO DEGRADADO POR SÓDIO**

**FORTALEZA**

**2021**

VANESSA OHANA GOMES MOREIRA

APLICAÇÃO DE HIDROGEL POLI(ACRILAMIDA-CO-ACRILATO) NA  
REMEDIAÇÃO DE SOLO DEGRADADO POR SÓDIO

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Departamento de Ciências do Solo da Universidade Federal do Ceará. Área de Concentração: Manejo do Solo e da Água.  
Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M839a Moreira, Vanessa Ohana Gomes.  
Aplicação de hidrogel poli(acrilamida-co-acrilato) na remediação de solo degradado por sódio / Vanessa Ohana Gomes Moreira. – 2021.  
90 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior.

1. Polímero Superabsorvente. 2. Sodicidade. 3. Remediação de sodicidade. I. Título.

CDD 631.4

---

VANESSA OHANA GOMES MOREIRA

APLICAÇÃO DE HIDROGEL POLI(ACRILAMIDA-CO-ACRILATO) NA  
REMEDIAÇÃO DE SOLO DEGRADADO POR SÓDIO

Tese de doutorado apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Ciência do Solo do  
Departamento de Ciências do Solo da  
Universidade Federal do Ceará. Área de  
Concentração: Manejo do Solo e da Água.

Aprovada em: 19 / 04 / 2021

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Judith Pessoa de Andrade Feitosa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profa. Dra. Edilaine da Silva Marques  
Instituto Federal do Maranhão (IFMA)

Aos meus pais.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por toda a coragem, luz, determinação e força que me guiaram, tornando possível lutar por todas as etapas dessa pesquisa com saúde e responsabilidade.

À minha família, principalmente, meus pais Sebastião Moreira Neto e Maria da Glória por seus ensinamentos, valores, incentivos e sentimentos transmitidos.

À Universidade Federal do Ceará pelo ambiente de estudo e pesquisa durante o período de doutorado, e a CAPES pelo apoio financeiro com a bolsa de estudo.

Ao meu admirável orientador Professor Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior pelos conhecimentos científicos transmitidos, por sua amizade, pelos ensinamentos profissionais e pessoais, pela confiança e paciência durante o curso de doutorado.

Aos docentes e discentes do Departamento de Ciência do Solo e do curso de Agronomia da Universidade Federal do Ceará pelas amizades e contribuições durante a minha formação profissional.

Aos funcionários do Laboratório de Análises de Solo, Água, Tecidos Vegetais e Adubos, Antônio José, Hamilson e Tavares, pelo apoio e contribuições durante as análises.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo, Franzé, Fátima, Marilena, Edilson e Geórgia.

À professora Dra. Judith Feitosa, pela disponibilização de recursos e do laboratório (LABPOL) para realização de parte dessa pesquisa.

À equipe do LABPOL, em especial ao Túlio Cordeiro e Marquinhos, por todo apoio e auxílio na síntese do hidrogel.

Aos professores Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota e Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra pelas contribuições, correções e auxílio nas dúvidas.

À professora e amiga Dra. Edilaine Marques pela sua colaboração na correção desse trabalho.

Por fim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização dessa pesquisa.

“A ciência, na verdade, só começa a ficar interessante onde termina”

Justus von Liebig

## RESUMO

A salinização dos solos está relacionada com restrições importantes na produtividade das terras. O excesso de sódio trocável é uma forma grave de degradação, prejudicando atributos físicos do solo e, com isso, dificultando o desenvolvimento das plantas. Objetivou-se com esse estudo realizar um experimento em condições de casa de vegetação para avaliar o uso do hidrogel sintetizado em laboratório à base de acrilamida e acrilato de potássio poli(acrilamida-co-acrilato) na remediação de solo degradado por sódio. Para isso, realizou-se um experimento em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2x4, no qual o solo ficou incubado com o polímero por diferentes períodos. Utilizou-se amostras de solo com estrutura não preservada da camada superficial (0 – 0,18 m) e subsuperficial (0,45 – 0,85 m) de NEOSSOLO FLÚVICO Sódico típico e foram realizadas avaliações durante 4 períodos da incubação, correspondendo a 10 dias, 4 meses, 8 meses e 12 meses (T0, T4, T8 e T12, respectivamente). As análises químicas consistiram na decomposição do hidrogel para verificar se houve mudanças na absorção e liberação dos íons de sódio ( $\text{Na}^+$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ) na estrutura do polímero. Além disso, foram realizadas análises dos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  no extrato solúvel do substrato em incubação. Foram realizadas as análises físicas densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade, condutividade hidráulica do substrato, grau de flocculação das argilas, estabilidade e diâmetro médio e geométrico dos agregados. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANAVA) pelo teste F a 1%, aplicando o Teste de Tukey para comparação de médias do fator qualitativo e análise de regressão para o fator quantitativo. Quando a interação foi significativa realizou o desdobramento para análise das médias. A partir dos resultados foi possível inferir que o hidrogel possui a capacidade de absorver sódio ( $\text{Na}^+$ ) do solo, porém esse processo é dependente da concentração de  $\text{Na}^+$  na solução e do tempo de incubação, pois a quantidade do elemento reduziu significativamente no gel, em função do tempo, até que alcançou uma estabilização. A macroporosidade do solo aumentou (maiores médias resultando em 0,1454 e 0,1282  $\text{cm cm}^{-3}$  para P1 e P2, respectivamente) em função do tempo de incubação, apesar de ter sido constatada redução da microporosidade e da porosidade total em ambas as camadas avaliadas. Houve aumento da estabilidade de agregados de maior tamanho ( $> 4,6$  mm) na camada superficial e subsuperficial (73,96% e 55,99% para P1 e P2, respectivamente). No entanto, na camada superficial, a maior quantidade de matéria orgânica também pode ter contribuído para a maior agregação do solo. O polímero não foi efetivo na melhoria da densidade do solo (maiores médias resultando em 1,53 e 1,66  $\text{g cm}^{-3}$  para P1 e P2, respectivamente) e da condutividade hidráulica do solo saturado (sendo nula em ambas as



camadas no último período de avaliação). Sugere-se que seja verificada a eficiência do hidrogel poli(acrilamida-co-acrilato) quando aliado com outra técnica de remediação para solos afetados por sódio.

**Palavras-chave:** Polímero Superabsorvente. Sodicidade. Remediação de sodicidade.

## ABSTRACT

Soil salinization is related to important restrictions on land productivity. Excess exchangeable sodium is a serious form of degradation, affecting the physical attributes of the soil and hindering the development of plants. The objective of this study was to carry out an experiment in greenhouse conditions to evaluate the use of hydrogel synthesized in the laboratory based on acrylamide and potassium acrylate poly(acrylamide-co-acrylate) in the remediation of sodium-degraded soil. For this, an experiment was carried out in a completely randomized design, in a 2x4 factorial scheme, in which the soil was incubated with the polymer for different periods. Soil samples with an unreserved structure of the superficial layer (0 - 0.18 m) and subsurface (0.45 - 0.85 m) of Typical Sodium Fluvisol were used and evaluations were carried out during 4 incubation periods, corresponding to 10 days, 4, 8 and 12 months (T0, T4, T8 and T12, respectively). The chemical analyzes consisted of the hydrogel decomposition to verify if there were changes in the absorption and release of sodium and potassium ions in the polymer structure. In addition, analyzes of the sodium and potassium ions were performed in the soluble extract of the substrate under incubation. Physical analyzes of soil density, total porosity, macro and microporosity, hydraulic conductivity of the substrate, degree of flocculation of the clays, stability and average and geometric diameter of the aggregates were carried out. The data obtained were subjected to analysis of variance (ANAVA) by the 1% F test, applying the Tukey test to compare means of the qualitative factor and regression analysis for the quantitative factor. When the interaction was significant, the analysis was performed to analyze the averages. From the results it was possible to infer that the hydrogel has the capacity to absorb sodium ( $\text{Na}^+$ ) from the soil, this process is dependent on the concentration of  $\text{Na}^+$  in the solution and on the incubation time, as the amount of the element has significantly reduced in the gel, in function of time, until it has stabilized. The soil macroporosity increased (resulting in 0.1454 and 0.1282  $\text{cm cm}^{-3}$  for P1 and P2, respectively, in T12) and there was a reduction in microporosity and total porosity in both evaluated layers. There was an increase in the stability of larger aggregates ( $> 4.6$  mm) in the superficial and subsurface layer (73.96% and 55, 99% for P1 and P2, respectively). However, in the superficial layer, the greater amount of organic matter may also have contributed to the greater aggregation of the soil. The polymer was not effective in improving the soil density (resulting in 1.53 and 1.66  $\text{g cm}^{-3}$  for P1 and P2, respectively, in T12) and the hydraulic conductivity of the saturated soil (being null in both layers in the last evaluation period). It is suggested that its efficiency be verified when combined with another remediation technique for soils affected by sodium.

**Keywords:** Superabsorbent polymer. Sodicity. Remediation of sodicity.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	HIPÓTESES.....	16
3	OBJETIVOS .....	16
3.1	Objetivo Geral.....	16
3.2	Objetivos Específicos.....	16
4	REVISÃO DE LITERATURA.....	17
4.1	Solos afetados por sais.....	17
4.2	Formação e evolução dos solos afetados por sais.....	20
4.3	Principais estratégias de remediação de solos afetados por sais.....	21
4.3.1	<i>Lavagem</i> .....	21
4.3.2	<i>Corretivos químicos</i> .....	22
4.3.3	<i>Fitorremediação</i> .....	23
4.4	Polímeros superabsorventes (hidrogéis).....	24
4.5	Hidrogéis como condicionador para solos afetados por sais.....	28
5	MATERIAL E MÉTODOS.....	31
5.1	Caracterização da área de coleta do solo.....	31
5.2	Síntese do hidrogel poli(acrilamida-co-acrilato).....	32
5.3	Características do hidrogel sintetizado.....	34
5.4	Local do experimento, período e caracterização do solo.....	34
5.5	Preparo das amostras e incubação do solo com hidrogel.....	35
5.6	Delineamento experimental e tratamentos.....	36
5.7	Avaliação dos atributos químicos.....	38
5.8	Avaliação dos atributos físicos no substrato.....	40
6	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	45
7	INFRAESTRUTURA UTILIZADA.....	45
8	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
8.1	Atributos químicos avaliados.....	46
8.1.1	<i>Concentração de Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> no hidrogel e no substrato</i> .....	46
8.1.1.1	Sódio (Na <sup>+</sup> ).....	46
8.1.1.2	Potássio (K <sup>+</sup> ).....	52

8.2	Atributos físicos avaliados .....	56
8.2.1	<i>Densidade do substrato, Porosidade e Distribuição de Poros</i> .....	56
8.2.2	<i>Condutividade Hidráulica - Ksat</i> .....	61
8.2.3	<i>Grau de flocculação das argilas</i> .....	63
8.2.4	<i>Estabilidade dos agregados</i> .....	66
8.2.5	<i>Diâmetro médio ponderado (DMP) e geométrico (DMG) dos agregados</i> .....	68
8.3	Impactos sociais e econômicos da pesquisa.....	72
9	CONCLUSÕES.....	74
	REFERÊNCIAS.....	75

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de salinização do solo provoca restrições importantes na produtividade das terras agrícolas. Os efeitos deletérios do excesso de sais solúveis estão associados à redução do potencial osmótico da solução do solo, aos distúrbios nutricionais, aos efeitos tóxicos/específicos de alguns íons ou à combinação desses fatores. Por outro lado, o excesso de sódio ( $\text{Na}^+$ ) trocável é uma forma mais grave de degradação, por causar problemas aos atributos físicos do solo e, conseqüentemente, dificultar o desenvolvimento das plantas.

A sodicidade pode ser originada do material original do solo e da atuação de processos pedogenéticos, resultando em sodificação primária. Existem, também, solos sódicos onde a sodicidade origina-se de processos antropogênicos, sendo denominada de sodificação secundária. Dados atuais mostram que, a área afetada por ambos processos de sodificação no mundo é de cerca de 210 milhões de hectares (ha), causando significativas perdas de áreas produtivas em países, como Canadá (6.974 ha), Argentina (53.139 ha), Austrália (33.9971 ha), URSS (11.9628 ha), entre outros. (LEVY; SHAINBERG, 2005; HOSSAIN, 2019).

No Brasil, o processo de salinização ocorre, principalmente, na região Nordeste, mais especificamente nos perímetros irrigados. Os percentuais elevados de sódio encontrados nessa região já foram associados a características naturais dessa região, como as condições climáticas, o intemperismo da albita e de outros plagioclásios, e ao manejo inadequado das terras e dos recursos hídricos, resultando na formação de solos com caráter sódico (MOTA; OLIVEIRA, 1999; QADIR; SCHUBERT, 2002).

Como resultado, a elevada quantidade de  $\text{Na}^+$  nos solos, aliada com a baixa concentração de eletrólitos, provoca a dispersão das argilas e o desenvolvimento de estabilidade estrutural fraca; baixa condutividade hidráulica; baixa infiltração; aumento da suscetibilidade a escoamentos e erosão; alterações na disponibilidade de íons trocáveis, alterações no pH e toxidez, resultando em menor produtividade das culturas.

A remediação de solos com excesso de sódio depende da neutralização desses efeitos adversos, principalmente, em propriedades físicas dos solos. Embora exista o conhecimento sobre vários métodos para o gerenciamento sustentável da agricultura com o objetivo de reduzir os danos causados pela sodicidade, a implementação dessas práticas é geralmente limitada devido aos elevados custos ou a baixa disponibilidade de recursos hídricos. Nesse contexto, o uso de polímeros superabsorventes ou hidrogéis, tem ganhado aceitação como condicionador do solo.

Conceitualmente, constituem uma classe de polímeros hidrofílicos com redes de cadeias macromoleculares entrecruzadas formadas por redes tridimensionais e grupos iônicos com a capacidade de absorver grande quantidade de água ou fluidos em curto tempo e retê-los de forma eficiente. É utilizado como condicionador do solo, pois atuam na retenção de água e nutrientes para as plantas, disponibilizando-os à medida que o solo, ao redor da zona radicular das plantas, perde umidade.

Em estudos desenvolvidos com hidrogéis, relata-se também sua capacidade de a) atuar melhorando os atributos físicos dos solos; b) aumentar a eficiência de uso da água pelas plantas; c) auxiliar na remoção de elementos tóxicos por processos de adsorção e d) atenuar os efeitos dos sais no desenvolvimento das plantas. No entanto, apesar de existir na literatura diversos relatos do uso de hidrogel e os seus efeitos nas propriedades químicas e físico-hídricas dos solos, poucos e divergentes são os resultados do uso desse polímero em solos afetados por sais e seu uso como condicionador em solo degradado por sódio.

Diante dessas informações, objetivou-se avaliar a eficiência do hidrogel copolímero sintetizado à base de acrilamida e acrilato de potássio poli(acrilamida-co-acrilato) na redução da concentração de sódio em excesso no solo e na melhoria dos atributos físicos e, com isso, verificar a atuação e eficiência desse polímero como um condicionador no reestabelecimento da capacidade produtiva de solos sódicos.

## **2 HIPÓTESES**

1 – O hidrogel poli(acrilamida-co-acrilato) é capaz de absorver o íon  $\text{Na}^+$  presente em excesso no solo e liberar  $\text{K}^+$ ;

2 – O hidrogel poli(acrilamida-co-acrilato) melhora os atributos físicos de solo sódico à medida que aumenta o tempo de incubação;

3 – O hidrogel poli(acrilamida-co-acrilato) funciona como um condicionador para remediação de solo sódico.

## **3 OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo Geral**

Avaliar o potencial do hidrogel poli(acrilamida-co-acrilato) para a remediação de solo degradado por sódio.

### **3.2 Objetivos Específicos**

1 – Realizar a incubação do hidrogel em amostras, com estrutura não preservada, da camada superficial e subsuperficial de solo degradado por sódio por um período de 12 meses;

2 – Determinar, a cada quatro meses:

- A concentração dos elementos  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  no hidrogel incubado ao solo;
- As concentrações dos elementos  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  presentes no extrato de saturação do solo;
- Atributos físicos do solo:
  - Porosidade total do solo, macro e microporosidade;
  - Condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{\text{sat}}$ );
  - Densidade do solo;
  - Argila dispersa e grau de floculação;
  - Estabilidade dos agregados.



## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Solos afetados por sais

Embora as informações sobre as áreas afetadas pelo excesso de sais não estejam bem definidas, estima-se que ocorra uma perda de, aproximadamente, 1,5 milhões de hectares de terras aráveis a cada ano devido ao acúmulo de sais. No Brasil, esse problema é mais conspícuo na região Nordeste, a qual possui uma área de 155 milhões de hectares, sendo que 52% dessa superfície é semiárida. Dessa forma, a salinização tem sido identificada como processo de degradação dos solos (OLIVEIRA; GOMES-FILHO; ENÉAS-FILHO, 2010).

Os solos afetados por sais são classificados em função de valores dos parâmetros de condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), porcentagem de sódio trocável (PST) e pH (RAIJ, 1991). Basicamente, podem ser classificados, como: a) salinos – o predomínio de sais em solução se eleva a ponto de provocar estresse osmótico das plantas; b) sódicos – quando a relação de sódio trocável é alta; c) salino-sódico – quando as condições anteriores ocorrem simultaneamente (FERREIRA; SILVA; RUIZ 2016).

Os solos são classificados como salinos quando a CEes é  $\geq 4 \text{ dS m}^{-1}$ , a PST é  $< 15\%$  e o pH  $< 8,5$  (USSL, 1954). O efeito flocculante dos íons cálcio e magnésio promove maior agregação das partículas, resultando em solo mais permeável e com menor probabilidade de inundação, além de beneficiar a aeração e o crescimento das raízes. No entanto, o excesso de sais interfere na disponibilidade de água para as plantas, devido ao aumento da pressão osmótica, na absorção de nutrientes e no desenvolvimento da planta de forma generalizado (AHMED; MORITANI, 2010; BERNARDO, 1995; DIXON; WEED; DINAUER, 1989).

São classificados como salino-sódicos quando a PST atinge valores  $\geq 15\%$  e o nível de salinidade permanece alto, com CEes  $\geq 4 \text{ dS m}^{-1}$ , e pH geralmente  $\geq 8,5$  (USSL, 1954). Embora possuam excesso de sódio, a permeabilidade é menos crítica do que solos sódicos, em razão do efeito flocculante dos sais solúveis presente (RUIZ et al., 2004). Portanto, a eliminação imediata dos sais no processo de recuperação desses solos pode levar a redução da drenagem, comprometendo seu uso na agricultura (FREIRE et al., 2003).

Como uma categoria importante de solos afetados por sais, os solos sódicos são caracterizados por níveis excessivos de íons sódio ( $\text{Na}^+$ ) na fase de solução do solo e no complexo de troca catiônica (QADIR et al., 2007). Mais precisamente, caracterizam-se por apresentar PST  $\geq 15\%$  e CE  $< 4 \text{ dS m}^{-1}$ , com pH, geralmente entre 8,5 e 10 (USSL, 1954).

O alto pH, característico da maioria desses solos, pode causar a dispersão da matéria orgânica, podendo dar cor escura aos solos, razão pela qual também são denominados de álcali negro (BISWAS; BISWAS, 2014; RIBEIRO; RIBEIRO FILHO; JACOMINE, 2016). Além disso, possui problemas estruturais como resultado de certos processos físicos e condições específicas, desencadeando o surgimento de crostas e impedimentos (QADIR et al., 2007), o que interfere negativamente nas propriedades físico-hídricas do solo, aumentando a susceptibilidade à erosão e inundações (CHHABRA, 1996).

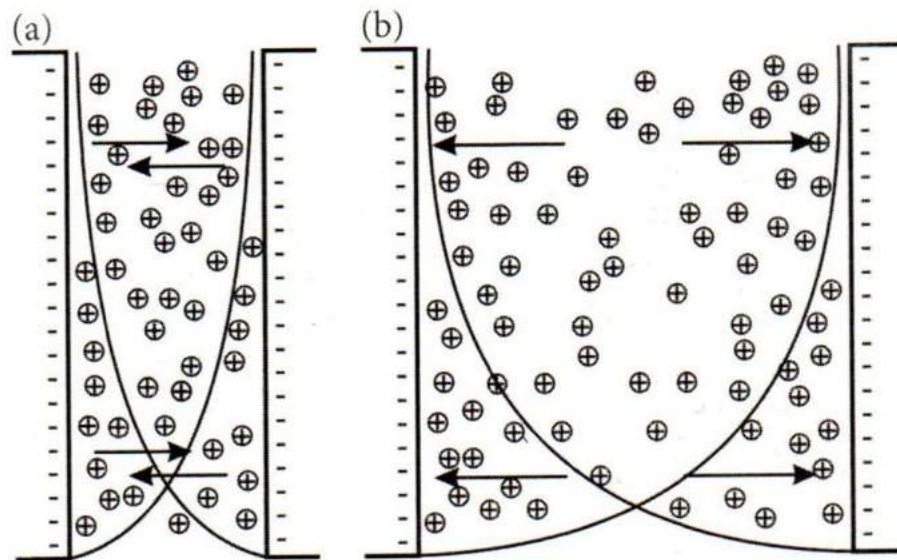
Dois mecanismos explicam a redução da permeabilidade dos solos em condições de alta porcentagem de sódio trocável: a expansão e a dispersão dos minerais argila (ANDRADE; CRUCIANI, 1996). Ambos os termos resultam do balanço entre as forças repulsivas e as forças atrativas de Van der Waals (V-L) na camada dupla difusa, afetando a porosidade do solo e, conseqüentemente, a passagem de água e ar (FERREIRA, SILVA, RUIZ et al., 2016).

A dupla camada difusa forma-se devido às cargas elétricas líquidas, predominantemente negativas, existentes na superfície dos colóides dos solos. Sua espessura é variável, sendo um dos fatores determinantes para ocorrência de dispersão ou floculação dos minerais da fração argila (SPERA et al., 2008).

Se a camada dupla difusa possui espessura maior do que a distância sobre a qual a força de V-L atua, então a força repulsiva dos cátions prevalece e as partículas de argila são mantidas dispersas. Por outro lado, se a camada dupla difusa das partículas estiver compacta, as partículas de argila aproximam-se - de tal modo - que a distância entre elas pode ficar menor do que a distância sobre a qual as forças de V-L atuam e as argilas agregam-se, formando flocos (FERREIRA, SILVA, RUIZ et al., 2016).

A predominância de cátions monovalentes, como o sódio ( $\text{Na}^+$ ), implica aumento na espessura da camada dupla difusa, causando a dispersão das argilas que, por sua vez, migram para a camada mais subsuperficial e preenchem os espaços porosos, reduzindo a infiltração de água, aumentando a densidade do horizonte B e a suscetibilidade à erosão hídrica. Há a formação de camadas impermeáveis que dificultam o movimento de ar e de água no solo e, conseqüentemente, a atividade agrícola (PEDROTTI et al., 2015) (RENGASAMY, 1997) (FASSBENDER; BORNEMISZA, 1987) (Figura 1).

Figura 1. Micelas saturadas por: a) íons bivalentes (floculação); b) íons monovalentes (dispersão).



Fonte: Ferreira, Silva, Ruiz et al., (2016)

Solos com elevada quantidade de sódio podem ter uma boa estrutura e baixa dispersão de argila quando a quantidade de sais solúveis também é elevada. No entanto, quando a concentração de sais na solução do solo reduz devido a lixiviação, seja pela água da chuva ou pela irrigação, os solos tornam-se mais susceptíveis a dispersão (DIERICKX, 2015).

Segundo She et al., (2014), para um determinado solo, há um ponto em que a combinação dos valores de sodicidade e salinidade resulta na dispersão das argilas, o que leva a obstrução dos poros condutores de água do solo, reduzindo as taxas de infiltração e aumentando o processo de destruição dos agregados. Os autores também explicam que quanto maior a presença de sais solúveis no solo sódico, menor é o processo de dispersão.

Um limite para que a PST seja considerada prejudicial aos diferentes solos é considerado difícil de avaliar. Em geral, problemas são relatados em solos de regiões semiáridas com  $PST > 15\%$ , como já mencionado anteriormente. No entanto, uma  $PST > 25\%$  em solo arenoso dificilmente afeta a estrutura do solo. Já em solos argilosos, o tipo de argila influencia na dispersão, sendo as argilas do tipo expansivas mais susceptível a ocorrência desse fenômeno (DIERICKX, 2015; BARZEGAR et al., 1997), o que mostra que a textura dos solos também pode influenciar fortemente nesse aspecto (FREIRE et al., 2003).

### 4.3 Formação e evolução dos solos afetados por sais

O processo de salinização pode ser resultado de ações naturais e/ou induzidas pelo homem (MACHADO; SERRALHEIRO, 2015). A salinização natural ou primária consiste no acúmulo de sais através de processos naturais, incluindo o intemperismo físico e químico (DALIAKOPOULOS et al., 2016) e o transporte de sais provenientes do material de origem, depósitos geológicos, águas subterrâneas e sal marinho, acumulando-se à medida que a água é evaporada ou consumida pelas culturas (DAKER, 1988; HASANUZZAMAN et al., 2014).

Uma alta porcentagem de sais no solo está geralmente associada ao clima semiárido, devido as baixas precipitações e ao elevado potencial evapotranspirativo (RIBEIRO; BARROS; FREIRE, 2009). Essa condição pode contribuir com a dissolução incongruente de minerais primários facilmente alteráveis, com elevada concentração de  $\text{Na}^+$ , assim como, favorecer ou desfavorecer a lixiviação das bases do solo, resultando no desenvolvimento de solos com caráter solódico (PST entre 6% e 15%) ou sódico (PST  $\geq 15\%$ ) (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2017), o que pode resultar na gênese de solos salino-sódicos ou sódicos.

A dessalinização de solo salino-sódico, por processo de drenagem natural também pode originar solos sódicos devido a lixiviação dos sais, permanecendo apenas o sódio no complexo de troca (RIBEIRO; RIBEIRO FILHO; JACOMINE, 2016). Com isso, há modificações na estrutura do solo devido aos efeitos do sódio adsorvido nas argilas, como a dispersão e translocação da argila e destruição de agregados estruturais que, por sua vez, promove o desenvolvimento de condições físicas extremamente desfavoráveis (RHOADES; INGVALSON, 1969).

Algumas outras regiões do Brasil, com clima mais úmido, também apresentam solos com altos níveis de  $\text{Na}^+$ , como a região norte do Pantanal, por exemplo. Nesse caso, os solos sódicos ocorrem, principalmente, nas regiões mais altas da paisagem, contrariamente ao que ocorre na região semiárida do Brasil (NASCIMENTO et al., 2015), e a formação de solos sódicos, alcalinos ou salinos está intimamente relacionada a qualidade das águas dos rios ou suas propriedades químicas (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2017).

A salinização secundária ou antrópica é introduzida por intervenções humanas, principalmente, com utilização de água com altos teores de sais na irrigação ou outras práticas de manejo inadequadas, muitas vezes associadas a condições de má drenagem (TRNKA et al., 2013). Além disso, pode ser causada pela aplicação de fertilizantes de forma excessiva e pouco parcelada, ao longo do ciclo das culturas, induzindo o sistema radicular ao estresse osmótico e toxidez (AYERS; WESTCOT, 1991).

Em relação a qualidade da água destinada a irrigação, o teor de sais das águas superficiais depende das rochas predominantes nas nascentes, da natureza do solo e de eventuais poluições causadas pela atividade humana. Para a águas subterrâneas, a qualidade depende da origem da água, do curso sobre o qual ela flui e da composição e dissolução do substrato em que se encontra em contato (KOVDA et al., 1973).

A rigor, todas as águas de irrigação contêm sais dissolvidos em quantidades variadas (RHOADES, 1989), portanto, é necessário a utilização de manejo adequado da irrigação e drenagem eficiente para evitar o acúmulo de sais precipitáveis e/ou elevação da concentração de sódio na solução do solo. Embora a água de irrigação, geralmente, tenha uma concentração limitada de sais, o uso contínuo por um período prolongado pode ter enormes implicações (KALEV; TOOR, 2018).

#### **4.4 Principais estratégias de remediação de solos afetados por sais**

A remediação de solos salinos, sódicos e/ou salino-sódicos tem como objetivo a redução da concentração dos sais solúveis e do sódio trocável e deve ser utilizado em processos de prevenção e na remediação de áreas salinizadas (MELO et al. 2008).

As principais técnicas utilizadas no processo de remediação de solos afetados por sais são a lavagem por lixiviação e a aplicação de condicionadores químicos, que dependem diretamente de um eficiente sistema de drenagem (MONTENEGRO; MONTENEGRO, 2004).

##### **4.4.1 Lavagem**

A lavagem é a técnica mais eficiente para reduzir os teores de sais solúveis do solo e consiste em se fazer passar, através do perfil do solo, determinado volume de água que, por sua vez, carrega os sais solúveis para além da zona radicular. A necessidade da lavagem é fundamentada no balanço de água e sais na zona radicular nos quais se baseiam nos diferentes fluxos de água no solo irrigado. O balanço de água pode ser obtido pela soma dos diferentes fluxos de entrada e saída de água no perfil (CAVALCANTE et al., 2016).

Existem diversos modelos matemáticos para o cálculo da quantidade de água a ser aplicada na lavagem, porém nenhum dos métodos descreve os diversos processos e fatores que a influenciam simultaneamente, como o fluxo de água no solo, a presença de fendas e a diferença na solubilidade dos sais (CAVALCANTE et al., 2016; BLANCO; FOLEGATTI,

2001). Com isso, as estimativas da quantidade de água de lixiviação ou da lâmina de lavagem são baseadas em relações empíricas, derivadas de pesquisas e experiências de campo (RHOADES; LOVEDAY, 1990; SIETKAZIEV; KULKAEVA; SHINYSHEROVA, 2018).

A lavagem de sais pode ser realizada com duas finalidades: 1) reduzir a alta salinidade inicial do solo até níveis toleráveis pelas culturas, denominada lavagem de recuperação; e 2) impedir a ressalinização dos solos recuperados ou prevenir o processo de salinização, chamada lavagem de manutenção (PIZARRO, 1978; CAVALCANTE et al., 2016).

Entretanto, apesar da eficiência comprovada dessa técnica na remediação de solos afetados por sais, a sua aplicação de forma isolada não é eficiente para eliminação do sódio adsorvido às micelas de solos afetados por sódio. Nesse caso, há a necessidade da aplicação de um corretivo químico, a base de cálcio ou não, que através das reações produza cálcio, com a finalidade de substituir o sódio no complexo de troca (QADIR et al, 2001; PAVANI; SHANMUGAN, 2019; LEITE et al., 2007; BLANCO; FOLEGATTI, 2001).

#### **4.4.2 Corretivos químicos**

Entre as estratégias de melhoria de solos sódicos ou salino-sódicos, os aditivos químicos são amplamente utilizados (MIRANDA et al., 2011). Dentre os produtos químicos utilizados, citam-se o gesso, enxofre elementar, cloreto de cálcio, ácido sulfúrico (SOUZA et al., 2017), que devem reagir com a finalidade de substituir o sódio do complexo de troca e transferi-lo para a solução do solo, devido a substituição por outros íons, como o cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ). Após ser transferido, o  $\text{Na}^+$  fica disponível na solução e, dessa forma, deve-se efetuar a lavagem para a sua eliminação por lixiviação (SANTOS, 2005).

Comparativamente, o gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) é o corretivo mais comumente utilizado pelo seu baixo custo, porém a menor solubilidade desse produto ( $2,16 \text{ g L}^{-1}$ ) dificulta a efetividade das reações. Leite et al., (2007) e Santos et al., (2005) concluíram que o gesso promoveu decréscimo da porcentagem de sódio trocável e reduziu o pH do solo, além de aumentar expressivamente os teores de cálcio e magnésio. Para Vasconcelos et al. (2013), a aplicação de gesso em solo sódico promoveu uma eficiente substituição do sódio pelo cálcio no complexo de troca e favoreceu o aumento na agregação das partículas primárias.

Por outro lado, o cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) é mais solúvel ( $427 \text{ g L}^{-1}$  a  $20^\circ\text{C}$ ), sendo eficiente na correção de solos sódicos com menor quantidade de água e em menor tempo, porém seu elevado custo torna ainda mais dispendiosas as operações de remediação (USSL, 1954; RIBEIRO; FREIRE; MONTENEGRO, 2003). A aplicação de cloreto de cálcio em

solução, reduziu a PST em solos classificados como salino-sódicos, corrigindo o problema parcialmente em relação a sua condição inicial (MIRANDA; PESSOA; FREIRE, 2008). Contudo, o seu efeito é considerado de curto prazo, por ser mais rapidamente lixiviado no perfil (SHAINBERG; KEREN; FRENKEL, 1982; CAVALCANTE et al., 2016)

A drenagem, apesar de não ser uma técnica de remediação, está relacionada com a eficiência da lavagem dos solos sódicos e eliminação do sódio trocável após a aplicação dos corretivos químicos (CAVALCANTE et al., 2016). No entanto, em algumas regiões, as condições de drenagem inadequadas e a quantidade e qualidade da água disponível torna inviável a remediação dos solos, tornando a prática dispendiosas e de difícil realização (HASANUZZAMAN et al., 2014).

Além disso, devido aos aumentos graduais nos custos de emenda e aquisição de insumos em algumas partes do mundo durante as últimas duas décadas, estratégias de remediação dos solos com uso de corretivos químicos tornaram-se onerosas, especialmente para os agricultores de subsistência nos países em desenvolvimento (QADIR et al., 2001).

#### **4.4.3 Fitorremediação**

A fitorremediação é um tipo de biorremediação utilizada para remover íons tóxicos do solo por meio de hiperacumulação ou fitoestabilização nas células vegetais (JESUS et al., 2018), sendo utilizada para eliminação de contaminantes em solos, como metais pesados e sais, especialmente, os íons cloro e sódio (QADIR et al., 2007).

Várias espécies de plantas podem ser utilizadas na fitorremediação. No entanto, para a retirada específica de cloro e sódio, as halófitas são a alternativa mais indicada. Dentre as principais espécies utilizadas, destaca-se as do gênero *Atriplex* sp., sendo a *Atriplex nummularia* uma das espécies mais estudadas pertencentes ao gênero, recebendo também a denominação de erva-sal (FREIRE; FREIRE; SOUZA, 2016).

A *Atriplex nummularia* caracteriza-se como uma planta arbustiva que possui vasta distribuição no mundo e alta capacidade de adaptação em diversos habitats, possuindo alta eficiência na extração do íon sódio em comparação aos demais elementos (SOUZA et al., 2014).

Apesar de ser um método de baixo custo, sustentável e considerado eficiente para a descontaminação de solos, experiências de biorremediação vegetativa realizadas sugerem que, a absorção de sais solúveis e sódio apenas por plantas halófitas não é suficiente para a remediação do solo e, portanto, outros mecanismos devem estar associados (JESUS et al., 2018; MANN; RUTTER; ZEEB, 2020).

#### 4.5 Polímeros superabsorventes (hidrogéis)

Os hidrogéis constituem uma classe de polímeros hidrofílicos capazes de absorver até centenas de vezes o próprio peso em água (OMIDIAN; ROCCA; PARK, 2005). São considerados polímeros superabsorventes (SAPs) quando são baseados em monômeros iônicos e são ligeiramente reticulados, exibindo uma excepcional capacidade de absorção de água (BUCHHOLZ; GRAHAM, 1998). Caracterizam-se pela elasticidade, insolubilidade em água e intumescimento em meio aquoso, mantendo sua forma, mas aumentando em volume até que o equilíbrio físico-químico seja atingido (DURAN; ŞOUPAN; GUVEN, 1999).

A alta hidrofiliabilidade, como característica destes materiais, está intimamente ligada aos grupamentos presentes em suas cadeias como, por exemplo -OH, -COOH, -CONH<sub>2</sub>, -NH<sub>2</sub> e -SO<sub>3</sub>H que interagem com as moléculas de água, através da formação de pontes de H<sup>+</sup> (ZHENG et al., 2007; BRITO et al., 2013). A insolubilidade se justifica devido às reticulações e ligações cruzadas (*agentes de crosslink*) e interações físicas das cadeias poliméricas formadoras do hidrogel (BAJPAI et al, 2008; AOUADA; MATTOSO, 2009; AHMED, 2015).

Na síntese de hidrogéis superabsorventes emprega-se uma variedade de monômeros. O acrilato, seus sais de sódio ou potássio e a acrilamida são os monômeros frequentemente empregados na produção industrial desses materiais (MAGALHÃES, 2009).

De acordo com a literatura, os polímeros superabsorventes podem ser classificados, principalmente, conforme:

- a) As unidades monoméricas (BORZACCHIELLO; AMBROSIO, 2009):
  - homopolímeros: quando formados por um tipo de monômero;
  - copolímeros: formados por dois tipos de monômeros, pelo menos um hidrofílico;
  - multipolímero: quando mais de três tipos de monômeros estão presentes
- b) A presença ou ausência de cargas elétricas (AHMED, 2015):
  - aniônicos: cargas negativas;
  - catiônicos: cargas positivas;
  - não iônico;
  - anfóteros: cada carga positiva tem outra negativa no mesmo grupo funcional
- c) De acordo com a natureza do material (AOUADA; MATTOSO, 2009):
  - naturais;
  - sintéticos;
  - ambos.



As poliacrilamidas (PAAM) são obtidas por reações de polimerização de monômeros de acrilamida (AAM), uma amida derivada do ácido acrílico e, normalmente, são descritas na literatura como não-iônicas (SILVA, 2006). As reações de copolimerização das acrilamidas com monômeros funcionais (acrilatos e seus sais) conferem às cadeias do polímero uma densidade de grupos funcionais carregados, positivamente ou negativamente, dando origem a copolímeros (SHALABY et al., 1993; VORCHHEIMER, 1981).

O acrilato de potássio, um monômero obtido por neutralização do ácido acrílico, é classificado como aniônico, pois possui cargas elétricas negativas. Com isso, a absorção de água por hidrogéis sintetizados à base de acrilato de potássio é normalmente mais alta que em polímeros não-iônicos, como os sintetizados apenas com a acrilamida (SANTOS, 2015).

A menor afinidade com a água, de polímeros sintetizados com maior quantidade de AAM, já foi relacionada a maior densidade da cadeia polimérica, nas quais tornam a rede menos flexível, e ao decréscimo no tamanho e na quantidade dos poros (AOUADA et al., 2009). Resultados semelhantes foram encontrados por Bortolin et al., (2012), os autores sugerem que a redução do intumescimento, deve-se ao aumento da rigidez da cadeia polimérica resultante da maior da presença da acrilamida.

O processo de absorção de água (intumescimento do hidrogel) deve-se a penetração da água na matriz polimérica por capilaridade e difusão. Esse processo é diretamente relacionado a fatores intrínsecos à rede polimérica e a fatores externos (ZHENG et al., 2007; BRITO et al., 2013).

Os fatores intrínsecos a estrutura da cadeia polimérica, como a presença de grupos hidrofílicos (-OH, -NH<sub>2</sub>, -COOH, -CONH<sub>2</sub>, -SO<sub>3</sub>H), a menor densidade de reticulação e a alta flexibilidade, contribuem para um maior intumescimento do hidrogel. Por outro lado, a presença de grupos hidrofóbicos, maior densidade de reticulações e a presença de íons desfavorece a absorção de água pelo gel (BRITO et al., 2013; HOFFMAN, 2012).

Em relação aos fatores externos, as mudanças no pH, a força iônica, a temperatura e a composição das soluções são fatores que interferem na eficácia de absorção de água pelo gel. Por exemplo, as soluções com alta quantidade de íons provoca alterações significativas na pressão osmótica, o que dificulta a entrada de água na rede polimérica (AOUADA et al., 2009; BRITO et al., 2013; HOFFMAN, 2012).

À medida que a água penetra no hidrogel, ocupando os espaços entre as cadeias poliméricas, estas se estendem, buscando uma nova configuração. À proporção que as cadeias são alongadas para uma nova configuração, existe uma força resistiva, que aumenta com o

aumento da densidade de ligações cruzadas. O equilíbrio é atingido quando essas forças se igualam (ANSETH et al., 1996).

O equilíbrio é alcançado entre a força de alongamento (pressão osmótica) e a força de retração (módulo de cisalhamento elástico da rede). Assim, à medida que a densidade de reticulação aumenta no hidrogel, o módulo de cisalhamento elástico aumenta, o que leva a maiores forças de retração dentro da rede e uma diminuição correspondente na razão de dilatação (ZHU, BARNEY, ERK, 2015). Portanto, percebe-se que, a forma de síntese do hidrogel influencia diretamente no comportamento e na cinética de intumescimento do polímero (BRITO et al., 2013; AOUADA et al., 2009).

Além da absorção de água e fluidos aquosos, os hidrogéis possuem a capacidade de adsorver espécies catiônicas e metais (ZOHURIAAN et al., 2010) devido a presença dos grupos iônicos funcionais (-COOH, -NH<sub>2</sub>, -OH, -SO<sub>3</sub>H, -CONH) nos segmentos dos acrilatos (GUILHERME et al., 2007; ROY et al., 2011; OZAY et al., 2009). Por serem carregados eletrostaticamente, também funcionam como um sistema de liberação controlada de moléculas (ZOHURIAAN et al., 2010).

Vários tipos de interações podem ocorrer entre a rede interligada do hidrogel e os íons metálicos. A proporção do agente de reticulação e o tipo de monômero desempenham um papel crucial na adsorção de íons, pois o maior grau de reticulação na estrutura do hidrogel reduz a interação entre os grupos funcionais e os íons da solução externa (EL HALAH, LOPEZ - CASQUERO, CONTRERAS, 2018). Há relatos da remoção eficiente dos metais Cd<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup> e Co<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, entre outros, do meio aquoso com a utilização de hidrogel superabsorvente à base de acrilato e acrilamida (SHAH et al., 2018; EL-HALAH; LOPEZ – CASQUERO; CONTRERAS, 2018).

A remoção de corantes em solução aquosa por hidrogel, como por exemplo o azul de metileno, também é relatada na literatura (PAULINO et al., 2006). No entanto, evidências mostram que hidrogéis sintetizados a base de acrilamida pura não removem corantes e que a presença dos acrilatos em sua estrutura é importante para esse processo (DURAN; SOUPAN; GUVEN, 1999; KARADAG; SARAYDIN, 2002).

Estudos com uso de polímeros e a descontaminação de áreas, com alta eficiência e baixo custo, ainda estão em andamento. Assim, freqüentemente, apresentam-se testes de novos materiais para a despoluição de metais em recursos hídricos, cujas propriedades são desenvolvidas de forma a aumentar a eficiência e diminuir custos. Por outro lado, as publicações sobre pesquisa e desenvolvimento de polímeros para remediação de solos ainda são escassas (MILANI et al., 2017).

Devido a essas peculiaridades mencionadas, os hidrogéis têm ampla utilização em diversas áreas. Na agricultura, desempenham funções, como: a) aumentam a capacidade de retenção de água no solo; b) influenciam potencialmente em propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos; c) atuam como um sistema de liberação controlada, favorecendo a absorção de alguns elementos nutrientes pelas plantas; d) auxiliam na retenção de aditivos de sementes e nos revestimentos de sementes, assim como atuam na imobilização de reguladores de crescimento das plantas (NEETHU; DUBEY; KASWALA, 2018; REHMAN; AHMAD; SAFDAR, 2011; AOUADA et al., 2009).

Por conseguinte, na literatura é considerado condicionador dos solos (MIRANDA et al., 2011; SAAD; LOPES; SANTOS, 2009) e suas partículas são denominadas "reservatórios de água em miniatura", de onde água é removida conforme a demanda da raiz, por meio da diferença de pressão osmótica, assim como a liberação de fertilizantes e soluções, o que proporciona melhoria das taxas de crescimento e desempenho das plantas cultivadas (NEETHU; DUBEY; KASWALA, 2018).

Estudos mostram que hidrogéis influenciam na permeabilidade, na densidade, na estrutura e nas taxas de infiltração da água nos solos, reduzindo a frequência de irrigação e melhorando a retenção de água, principalmente, de solos arenosos. Diante disso, é considerado uma tecnologia viável a ser utilizada em regiões com baixa disponibilidade hídrica, como as regiões áridas e semiáridas (SHI et al, 2010; NEETHU; DUBEY; KASWALA, 2018, MENDONÇA, et al., 2013).

Em experimento realizado, resultados obtidos sugerem que o polímero à base de acrilamida e acrilato de potássio pode melhorar as propriedades do solo arenoso para o cultivo - por absorver e reter água, reduzindo a frequência de rega das plantas. Além disso, o conteúdo de carga iônica e a proporção acrilamida e acrilato afetam suas propriedades de intumescimento no solo, como já mencionado (ABD EL-REHIM; HEGAZY; ABD EL-MODY, 2004).

O uso de hidrogel para o aumento da capacidade de armazenamento de água no solo tem sido bastante relatado na literatura (ABOBATTA, 2018; MENDONÇA et al, 2013; MONTESANO et al., 2015; SENNA et al., 2015). Mudanças nas propriedades físico-hídricas e químicas dos solos após a aplicação de hidrogel também são discutidas (AGABA et al., 2010; ZONATTO et al., 2017).

No entanto, devido a atuação dos polímeros ser dependente de fatores diversos, como o pH, a temperatura, a textura e a salinidade do solo, os resultados encontrados ainda são pouco conclusivos (ABEDI- KOUPI; SOHRAB; SWARBRICK, 2008; AGABA et al., 2010; AL-JABARI; GHYADAH; ALOKELY, 2019; NARJARY et al., 2012; ANDRY et al., 2009).

#### 4.6 Hidrogéis como condicionador para solos afetados por sais

Na literatura, existem duas vertentes entre a salinidade e o uso de hidrogel. Alguns autores relatam efeitos deletérios do excesso de sais na eficiência de retenção de água pelo polímero (BAO; MA, LI, 2011; ZHANG et al., 2014 ). Demais autores defendem que o hidrogel melhora a qualidade das soluções do solo e reduz os efeitos dos sais para as plantas, favorecendo o desenvolvimento vegetal em solos com excesso de sais solúveis e sódio trocável (CHEN et al., 2004; EL SAYED; KIRKWOOD; GRAHAM, 1991; EL SAYED; EL SAYED, 2011; MOREIRA, ASSIS JÚNIOR; ARAGÃO, 2020; MIRANDA et al., 2011).

Discute-se que, a interação dos sais com os grupos funcionais das cadeias poliméricas, reduz a absorção de água e o intumescimento dos hidrogéis devido a menor interação das moléculas de água com tais grupos que, por sua vez, estão ocupados por esses íons. A maior valência dos íons e a alta densidade de carga positiva potencializa essa interação, podendo até formar ligações eletrostáticas intra e intermoleculares entre os íons e os segmentos poliméricos (GARCIA; MOURA; AOUADA, 2019; BORTOLIN et al., 2012).

Embora os cátions monovalentes ( $\text{Na}^+$ ) também possam substituir moléculas de água na estrutura do gel, o efeito não é tão pronunciado quanto os divalentes ( $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ ), havendo no caso do  $\text{Na}^+$ , reversibilidade do processo quando o gel é saturado repetidas vezes com água livre de sais (JAMES; RICHARDS, 1986). Ânions tiveram pouco efeito na redução do intumescimento de hidrogéis (BOWMAN; EVANS; PAUL, 1990; WANG; GREGG, 1990).

Zhu, Barney e Erk (2015), realizaram estudos para verificar o intumescimento do hidrogel à base de acrilamida e acrilato de sódio em diferentes soluções salinas (contendo  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ ) e perceberam forte dependência da taxa de intumescimento com a concentração de acrilato de sódio e a densidade de reticulação. Para os autores, a maior concentração de grupos aniônicos dentro do hidrogel - característica diretamente proporcional à quantidade de acrilato - reflete na maior absorção de água pelo polímero em solução rica em sódio.

Ainda segundo os autores, as ligações cruzadas iônicas ocupadas pelos íons divalentes ( $\text{Ca}^{2+}$ ) exibiram redução na razão de dilatação de equilíbrio devido à retração da cadeia de rede, com acentuada magnitude de redução com o aumento do acrilato de sódio. Já os íons trivalentes ( $\text{Al}^{3+}$ ), causaram dois efeitos: a) retração da cadeia de rede, devido à formação de reticulações iônicas e b) alta densidade de reticulações iônicas, resultando em uma casca de superfície rígida e dificuldade na absorção de água. Esses efeitos corroboram a ideia de que a valência dos íons pode influenciar nas reações que ocorrem na estrutura do hidrogel.

Bogarim (2014) trabalhando com a utilização de hidrogel à base de acrilato de potássio para análise da retenção de água e/ou sais minerais percebeu que, em condições de sodicidade, houve a redução da capacidade de retenção de água pelo polímero devido a troca dos íons potássio presentes na estrutura do hidrogel e o sódio do solo. Por outro lado, Silva et al. (2018) testando água salina e a utilização do hidrogel no crescimento de mudas de pinha, perceberam que o polímero reduz o efeito osmótico dos sais. No entanto, não realizaram análises químicas para verificar se houve absorção dos íons na estrutura do polímero.

Mendonça et al. (2013) observaram que há liberação de  $K^+$ , a partir do momento que o hidrogel intumescce e a água começa a interagir com os sítios hidrofílicos do polímero, dissociando os pares iônicos formados entre polímero e o íon potássio, deixando-o livre para ser liberado do interior do gel para o meio externo. Dorraji, Golchin e Ahmadi (2010) relatam que a incorporação de hidrogel nos solos salinos melhora o crescimento das plantas de milho, pois houve maior acúmulo de biomassa das plantas em solos tratados com hidrogel do que no tratamento controle.

El-Sayed e El-Sayed (2011), relacionam a redução do crescimento, produção e rendimento de plantas sob estresse salino a gastos de energia na síntese de componentes orgânicos e inorgânicos para o ajuste osmótico. Em condições de salinidade, há redução na disponibilidade de água para as plantas e um ajuste osmótico é necessário. Teoricamente, o uso do polímero superabsorvente possibilita reduzir o efeito dos sais, pela maior disponibilidade de água e, dessa forma, reduzir a necessidade do gasto de energia das plantas para essa regulação.

Miranda et al., (2011) trabalhando com NEOSSOLO FLÚVICO Salino sódico, verificaram que a aplicação de hidrogel, do tipo aniônico à base de poliácridamida, promoveu o aumento em 16% na macroporosidade do solo, efeito atribuído pelos autores ao aumento no tamanho dos agregados como resultado da ação aglutinadora do polímero. Aly e Letey (1988) relatam aumento no grau de floculação e estabilidade dos agregados, e a redução da ruptura desses quando aplicado polímeros catiônico e aniônico, em solo com RAS iguais a 1; 5 e 15.

Devido a adsorção entre as cadeias poliméricas e as partículas de argila, os hidrogéis podem estabilizar a estrutura dos solos com a formação de agregados estáveis. O processo de adsorção pode ser resultado da interação entre os grupos funcionais presentes no gel com as bordas de carga dos minerais de argila, ou pela atuação de eletrólitos, formando pontes e contribuindo para melhorar a estrutura do solo (BEN-HUR, 2006; THENG, 1982).

Para Buchmann (2018), o entendimento sobre os mecanismos de formação de agregados por hidrogéis permanecem incompreendidos. Para os autores, não há um modelo fidedigno que explique os mecanismos de intumescimento do hidrogel e sua contribuição para

a estabilidade estrutural do solo. Isto resulta, principalmente, da falta de metodologia adequadas para estudar o intumescimento do hidrogel no solo, bem como das dificuldades de adaptação dos métodos disponíveis ao sistema solo/hidrogel e sua interpretação.

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Caracterização da área de coleta do solo

Foram coletadas amostras com estrutura não preservada em camada superficial e subsuperficial de um NEOSSOLO FLÚVICO Sódico típico, na Fazenda Experimental Vale do Curu (FEVC) pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, localizada no município de Pentecoste – CE, distante 90 km da cidade de Fortaleza- CE (Figura 2). Para Araújo et al., (2014), o solo coletado apresenta como característica principal sua origem associada à deposição de sedimentos aluviais.

Figura 2. Entrada da Fazenda Experimental Vale do Curu-CE, localizada no município de Pentecoste - CE.



Fonte: Vanessa Ohana G Moreira (2018)

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é BSw'h', clima quente e semiárido com chuvas irregulares distribuídas entre os meses de fevereiro a maio, precipitação média anual de 801 mm, potencial evapotranspirativo de 1.475 mm e a temperatura média anual em de 27,1 °C, seguida de uma umidade relativa média do ar de 73,7% (ARAÚJO et al., 2011).

A área caracterizava-se pelo predomínio de vegetação nativa, predominantemente xerófila, com presença de grande quantidade de serrapilheira sobre o solo. A coleta das amostras

foi realizada no mês de dezembro de 2018, antes do período chuvoso, em uma trincheira aberta localizada em região de relevo baixo (Figura 3). Foram coletadas amostras de solo em duas camadas, correspondentes a superficial (0 – 0,18 m) e subsuperficial (0,45 – 0,85 m).

Figura 3. Trincheira de coleta das amostras do NEOSSOLO FLÚVICO Sódico típico na Fazenda Experimental Vale do Curu - CE.



Fonte: Vanessa Ohana G. Moreira (2018)

## 5.2 Síntese do hidrogel poli(acrilamida-co-acrilato)

O hidrogel poli(acrilamida-co-acrilato) utilizado no experimento foi sintetizado pela polimerização de monômeros de acrilamida e acrilato de potássio no Laboratório de Polímeros (LABPOL) do Departamento de Química Orgânica e Inorgânica da Universidade Federal do Ceará com base na metodologia descrita por Bezerra (2015).

Primeiramente, em um reator de fundo redondo adicionou-se 2,558 g de acrilamida (0,036 mol) e 0,054 mol do acrilato de potássio, obtido anteriormente por neutralização de ácido acrílico e hidróxido de potássio, na presença de um agitador magnético e atmosfera de gás nitrogênio. Depois de 10 minutos, foi incluído no sistema reacional 48,6 mg do iniciador persulfato de potássio.

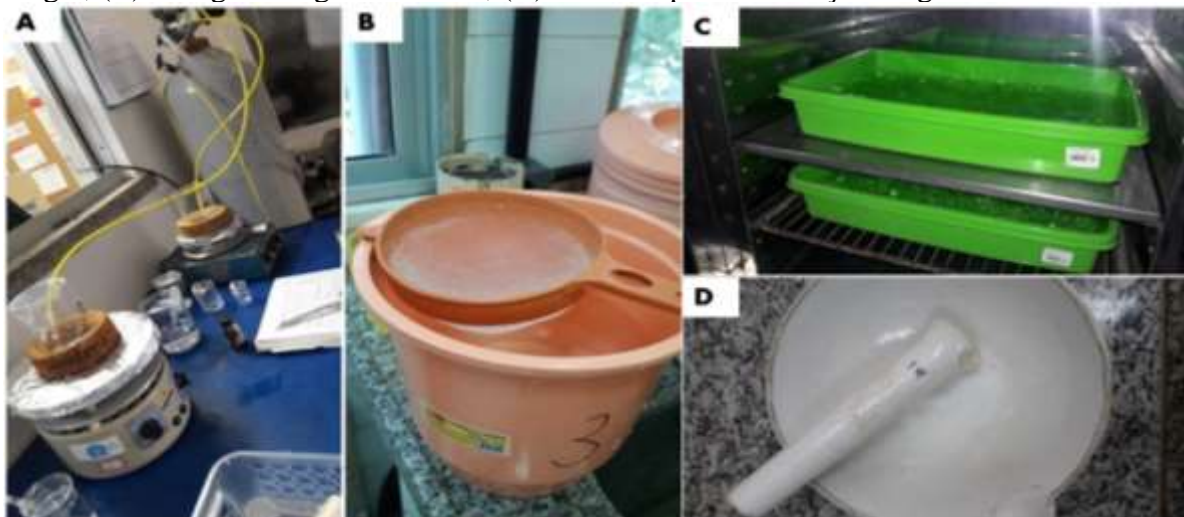


Passados mais 10 minutos, inseriu-se 27,0 mg do agente reticulante N,N'-metilenobisacrilamida (dissolvido em 1 ml de água destilada) e 150  $\mu$ l do acelerador N,N,N',N'-tetrametiletilenodiamino na concentração de 0,57 mol/l. Logo após a adição de cada um dos reagentes sólidos, seus respectivos recipientes foram lavados com água destilada e acrescentados ao sistema, para evitar perda de material, totalizando assim, um volume final de 90 ml no reator.

O sistema reacional permaneceu sob agitação magnética e atmosfera de nitrogênio até a observação da formação de um gel firme, após aproximadamente 45 minutos. O gel permaneceu em repouso por 24 horas, sendo posteriormente cortado com o auxílio de uma tesoura em pequenos pedaços e, logo após, foi iniciado o seu processo de lavagem para retirada de materiais solúveis que não reagiram.

O processo de lavagem consistiu em adicionar 10 litros de água destilada em um recipiente, onde adicionou-se o gel cortado, que ficou imerso durante uma hora. Repetiu-se o procedimento três vezes seguidas (tríplice lavagem). Após o processo de lavagem, o material obtido foi transferido para estufa com circulação de ar à temperatura de 65 °C, até a secagem completa (Figura 4).

Figura 4. Etapas da síntese do hidrogel: (A) Sistema utilizado para síntese; (B) Tríplice lavagem do gel; (C) Secagem do gel em estufa; (D) Material para maceração do gel seco.



Fonte: Vanessa Ohana G. Moreira (2019).

Logo em seguida, o gel foi raspado da bandeja e macerado com auxílio de um almofariz e pistilo, ambos de porcelana. Por fim, foram utilizadas peneiras de aço inox para separar o gel de acordo com duas granulometrias por meio de peneiras: > 24 até < 35 mesh e > 35 até < 48 mesh. Essa última granulometria foi a utilizada no experimento.

### 5.3 Características do hidrogel sintetizado

Para auxiliar no entendimento da absorção de água pelo hidrogel em questão, procedeu-se a análise da cinética de intumescimento (W) em água destilada. O grau de intumescimento foi definido pelo ganho de massa no gel intumescido em relação a massa do gel seco em um determinado tempo t. Cada análise desse parâmetro foi realizada em triplicata. A cinética de intumescimento do gel sintetizado resultou em torno de 600 g/g, sendo obtido pela equação 1 (WEIAN et al., 2005):

$$W = \frac{W_t - W_0}{W_0} \quad (1)$$

Em que:

W= Cinética de intumescimento

$W_0$  = representa a massa (g) do hidrogel seco;

$W_t$  = é a massa (g) de hidrogel dilatado no tempo t.

A porcentagem de monômeros utilizados na síntese foi 40% de acrilamida e 60% acrilato de potássio, resultando em uma razão acrilamida/acrilato de potássio de 2/3.

Na análise de caracterização do hidrogel também foi avaliada a concentração de  $K^+$  e  $Na^+$ , resultando em valores de 201 g  $L^{-1}$  e 27,8 g  $L^{-1}$ , respectivamente.

### 5.4 Local do experimento, período e caracterização do solo

O estudo foi realizado em casa de vegetação, pertencente ao Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará (latitude 3°44'25.45"S, longitude 38°34'31.62"O), Fortaleza – CE. Segundo a classificação de Köppen, o local de realização do estudo apresenta clima do tipo Aw', considerado tropical chuvoso (AQUINO et al., 2007; CAJAZEIRA; ASSIS JÚNIOR, 2011).

O experimento teve duração de 12 meses, tendo início no mês de fevereiro de 2019 e sendo finalizado em fevereiro de 2020. Antes da instalação do experimento, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm de abertura para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Após isso, foram realizadas as análises químicas e físicas para caracterização do solo, segundo metodologia sugerida por Teixeira et al., (2017).

Na tabela 1 estão apresentados os resultados dos atributos químicos e físicos do solo na camada superficial P1 (0 – 0,18 m) e subsuperficial P2 (0,45 – 0,85 m).

Tabela 1. Atributos físicos e químicos das amostras de solo nas diferentes camadas coletadas.

Parâmetros avaliados	Camadas	
	P1 (0 – 0,18 m)	P2 (0,45 – 0,85 m)
CE (dS.m <sup>-1</sup> )	0,4222	0,63399
pH	7,51	8,0
Ca <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	10,9	10,6
Mg <sup>2+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	7,4	6,8
Na <sup>+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	1,12	3,70
K <sup>+</sup> (cmolc kg <sup>-1</sup> )	0,256	0,133
H <sup>+</sup> + Al <sup>3+</sup>	0,666	0,166
Na <sup>+</sup> (s) (mg L <sup>-1</sup> )	312,7	775,6
K <sup>+</sup> (s) (mg L <sup>-1</sup> )	26,90	19,2
PST (%)	5,47	16,8
SB (cmolc dm <sup>-3</sup> )	19,806	21,433
CTC (cmolc dm <sup>-3</sup> )	20,472	21,928
Areia (%)	10,21	5,31
Argila (%)	36,47	46,36
Silte (%)	53,32	48,33
Argila Dispersa – ADA (%)	33,97	44,26
Grau de floculação (%)	5,6	4,0
Condutividade hidráulica (cm.h <sup>-1</sup> )	-	-
Porosidade Total (cm cm <sup>-3</sup> )	0,5438	0,5581
Macroporosidade (cm cm <sup>-3</sup> )	0,0128	0,00108
Microporosidade (cm cm <sup>-3</sup> )	0,5298	0,5570
Classificação Textural	Franco Argilo – siltosa	Argilo – siltosa

CE: Condutividade elétrica do extrato de saturação (1:1); pH em água (1:1); Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup> trocáveis; Al<sup>3+</sup> e H<sup>+</sup>: alumínio e hidrogênio trocáveis; Na<sup>+</sup>(s) e K<sup>+</sup>(s) no extrato de saturação (1:1); PST: porcentagem de sódio trocável; SB: soma de bases; CTC: Capacidade de troca de cátions (a pH 7,0).

## 5.5 Preparo das amostras e incubação do solo com hidrogel

O hidrogel foi homogeneizado ao solo após ser intumescido em água destilada. Para isso, 2g do polímero seco foram dissolvidos em 7,5 L de água destilada em balde de 10L. Após 3 horas, foi realizada a passagem do conteúdo do balde em uma peneira para coleta apenas do hidrogel intumescido.

Após esse procedimento, o gel intumescido foi misturado com 2kg de terra fina seca ao ar (TFSA) do solo das camadas coletadas, até uniformização completa da mistura, resultando em um substrato (gel + solo) (Figura 5).

Figura 5. Intumescimento do hidrogel em água destilada e homogeneização ao solo em estudo.



Fonte: Vanessa Ohana G. Moreira (2019).

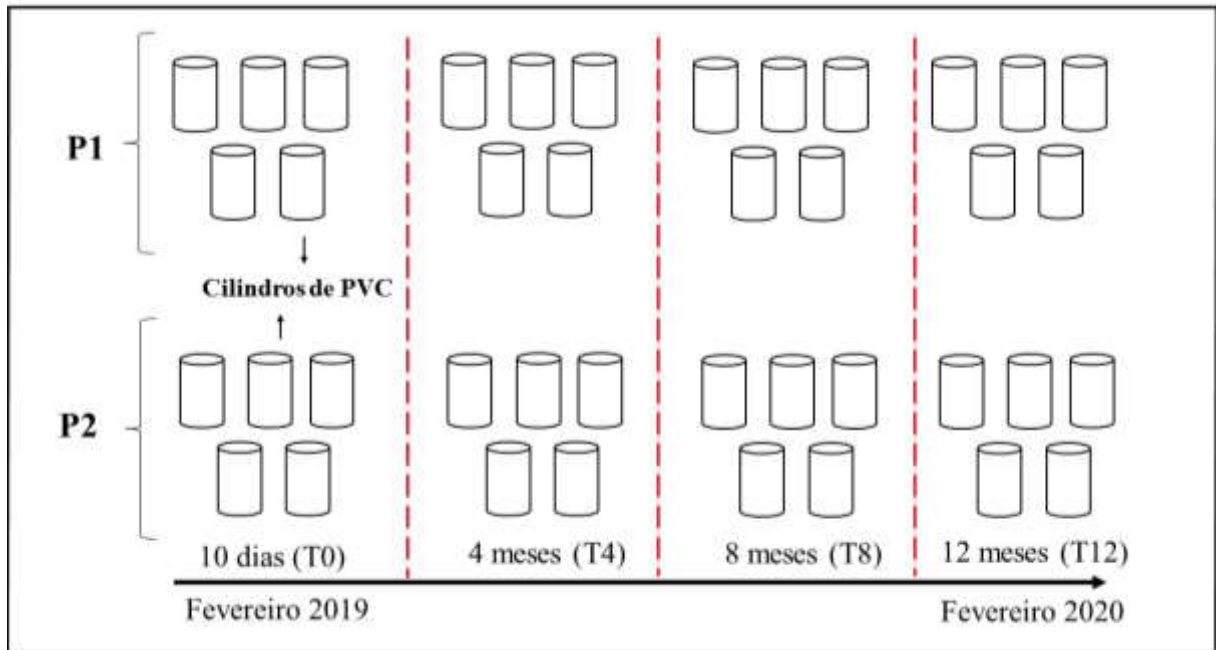
## 5.6 Delineamento experimental e tratamentos

Adotou-se o delineamento inteiramente aleatorizado em esquema fatorial 2 x 4, isto é, com 2 camadas: superficial (0 – 0,18 m) e subsuperficial (0,45 – 0,85 m) - e quatro tempos de incubação: T0, T4, T8 e T12 (10 dias; 4 meses, 8 meses e 12 meses, respectivamente). Com isso, as parcelas, representadas pelos cilindros de PVC, foram distribuídas aleatoriamente sobre a bancada da casa de vegetação, a 88 cm de altura do solo. Foram realizadas cinco repetições para cada tratamento, totalizando 40 unidades experimentais (Figura 6 e 7).

Utilizou-se 2kg do substrato para o preenchimento dos cilindros, que por sua vez, tinha dimensão de 10 x 20 cm. Foi utilizada uma densidade global de  $1,3 \text{ g.cm}^{-3}$  em todas as parcelas experimentais para preenchimento dos cilindros de PVC (Figura 6 e 7).

Tomou-se o cuidado de deixar dois centímetros na extremidade superior dos cilindros, para que não acontecesse perdas de material caso houvesse a expansão do polímero durante o tempo de realização do experimento.

Figura 6. Esquema ilustrativo com os respectivos períodos de análise T0, T4, T8 e T12, para as camadas P1 e P2 do solo com as cinco repetições de cada tratamento.



Elaborado por Vanessa Ohana G Moreira (2019).

Figura 7. Experimento instalado em casa de vegetação com 40 parcelas experimentais representadas por cilindros de PVC.



Fonte: Vanessa Ohana G Moreira (2019).

Os cilindros de PVC foram protegidos na extremidade inferior com pano e liga de borracha, e sobrepostos em pratos plásticos. A pesagem dos cilindros foi realizada periodicamente (pelo menos a cada três dias) para manutenção da umidade do solo em condições de 80% da sua capacidade de campo, previamente determinada em laboratório em mesa de tensão, submetendo as amostras a tensão de 10kPa (MEZZOMO et al., 2018).

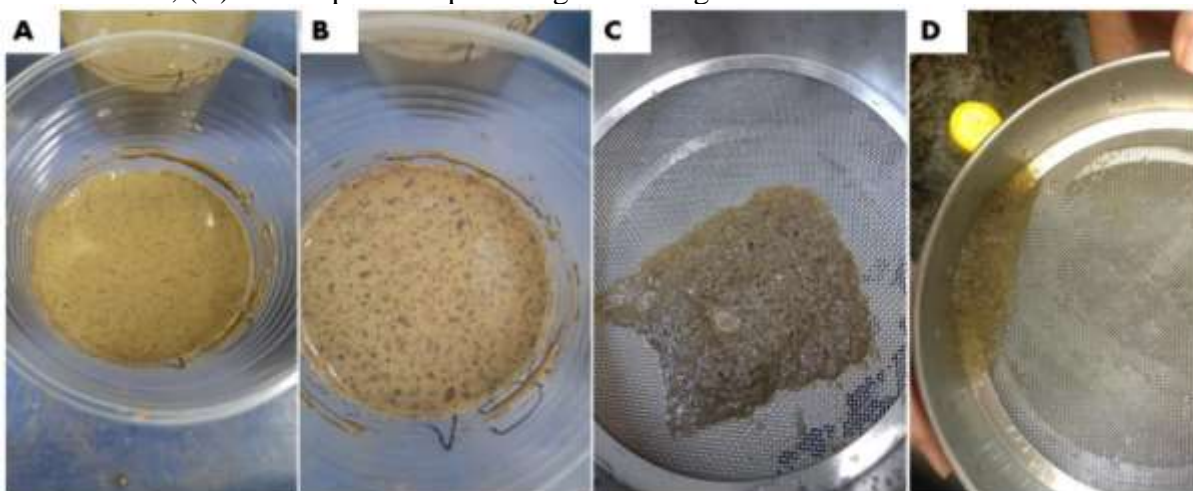
As parcelas avaliadas nos períodos determinados eram retiradas do experimento e levadas aos laboratórios de análise para avaliação dos respectivos atributos, permanecendo apenas aquelas dos tratamentos referentes aos meses subsequentes. Em laboratório foram realizadas análises que consistiram na avaliação dos atributos físicos e químicos do substrato e atributos químicos do hidrogel.

## 5.7 Avaliação dos atributos químicos

### 5.7.1 Concentração de $Na^+$ e $K^+$ no hidrogel

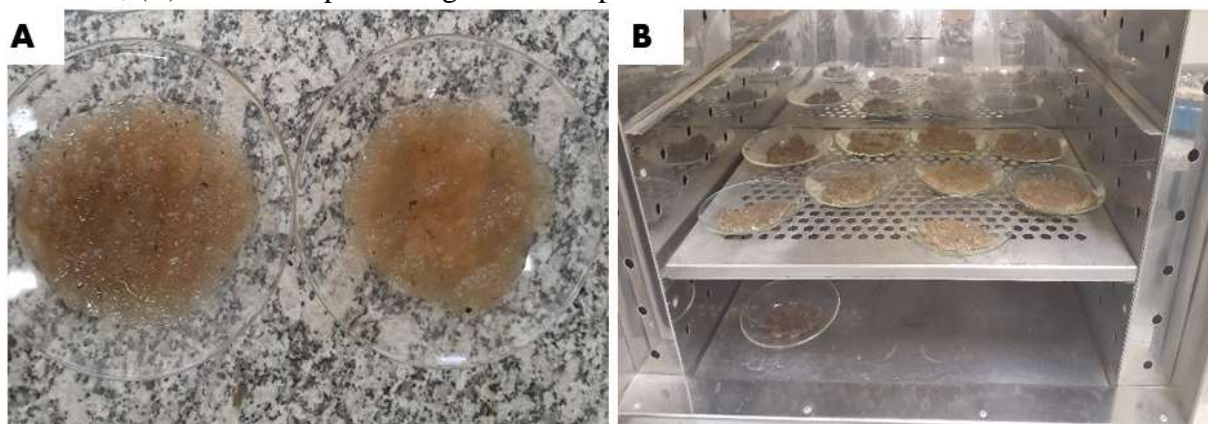
Para o procedimento de obtenção do hidrogel isolado do substrato, misturou-se 50g do substrato com 50 ml de água destilada (extrato 1:1). Esperou-se 1 (uma) hora em repouso e, após isso, o sobrenadante foi vertido em peneira com malha de 1 mm. O gel coletado na peneira foi lavado com água destilada para remoção do excesso de solo e depois seco em estufa a 65°C por 24 horas (Figura 8 e 9).

Figura 8. Etapas da separação do gel e solo: (A) Extrato (1:1) do substrato; (B) Extrato (1:1) após 1 hora em repouso; (C) Gel acumulado na peneira de 1mm após passagem do sobrenadante; (D) Gel na peneira após lavagem com água destilada.



Fonte: Vanessa Ohana G Moreira (2019).

Figura 9. Processo de secagem do hidrogel em estufa: (A) Após lavagem com água destilada; (B) Em estufa para secagem a 65°C por 24 horas.



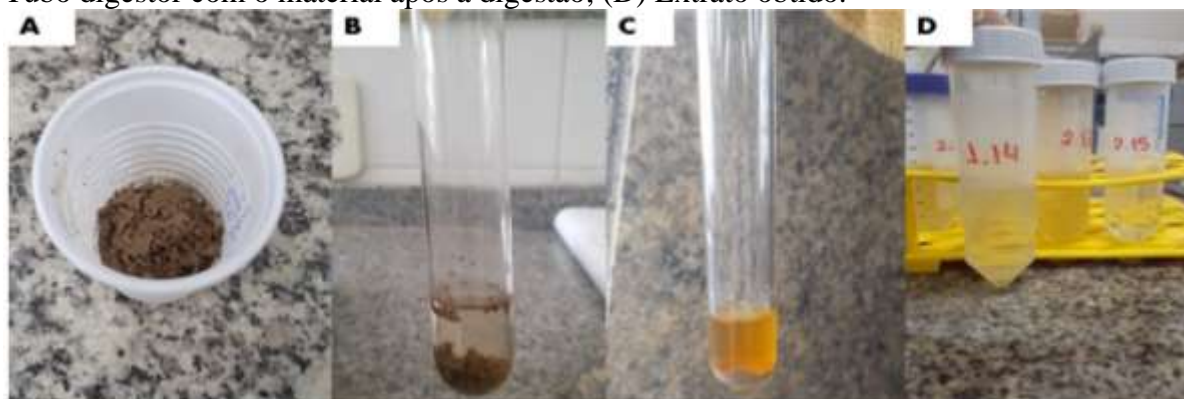
Fonte: Vanessa Ohana G Moreira (2019).

Após seco em estufa a 65°C por 24 horas, foi realizada a decomposição do gel e obtenção do “extrato de decomposição” por metodologia adaptada de Silva (2017). A análise para obtenção do extrato de decomposição foi realizada no Laboratório de Estudos em Química Aplicada (LEQA), pertencente a Universidade Federal do Ceará.

O extrato foi obtido com a utilização de 8 ml de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) 65%, - por ser um ácido oxidante forte e bastante utilizado para total solubilização de variados tipos de amostras - e 250 mg do hidrogel seco na estufa.

A mistura ficou por 3h em bloco digestor a 120°C e, após isso, foi realizada a diluição para 25 ml utilizando água ultrapura, obtida no Laboratório Núcleo de Águas (LANAGUA), pertencente ao Departamento de Química Analítica e Físico-Química da Universidade Federal do Ceará. Após obtenção do extrato foi realizada filtragem e a determinação de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  por meio de fotômetro de chama (Figura 10).

Figura 10. Etapas de obtenção do “extrato de decomposição” do hidrogel: (A) Gel seco em estufa a 65°C por 24 horas; (B) Hidrogel e ácido nítrico em tubo digestor antes da digestão; (C) Tubo digestor com o material após a digestão; (D) Extrato obtido.



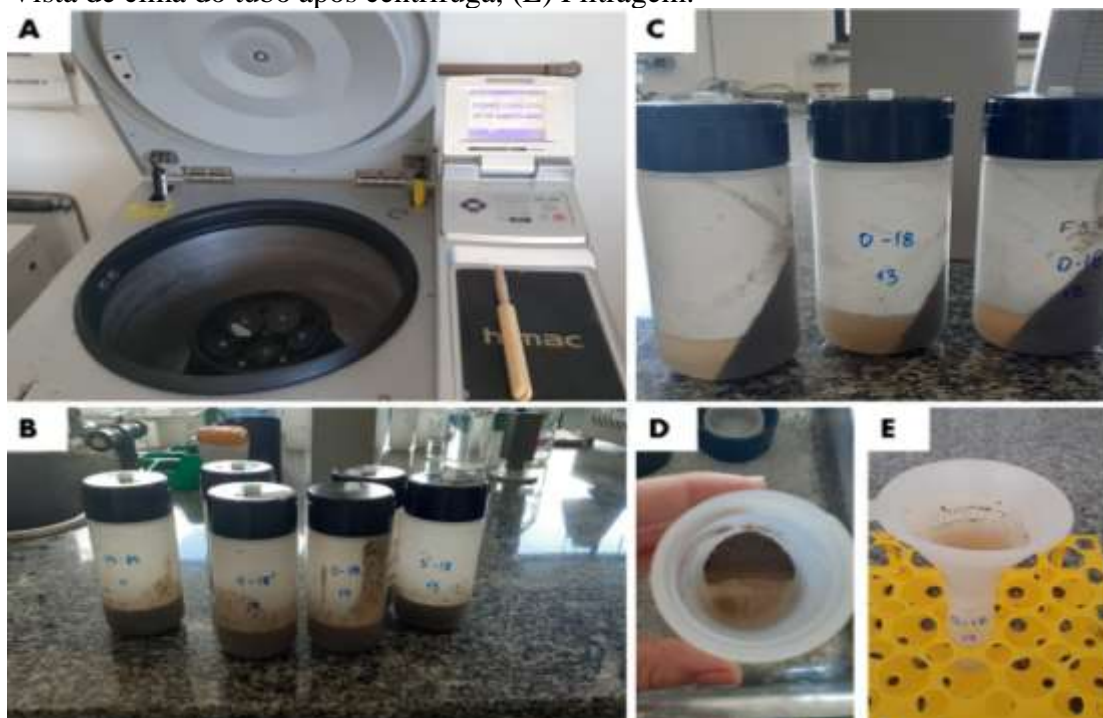
Fonte: Vanessa Ohana G Moreira (2019).

### 5.7.2 Concentração de $\text{Na}^+$ e $\text{K}^+$ no extrato solúvel do substrato

Foi realizada a obtenção do extrato solúvel (1:1) do substrato em estudo. Para isso, misturou-se 50g de substrato com 50 ml de água destilada (extrato 1:1). Esperou-se 1 (uma) hora em repouso e o material foi transferido para tubos de uma centrífuga do modelo Hitachi Medical Systems - CR22 GIII, pertencente ao Laboratório de Tecnologia da Biomassa da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA.

O substrato foi centrifugado à 10.000 rpm (12.000 rcf) durante 15 minutos a 25°C. Após a passagem na centrífuga, o extrato foi filtrado e analisado em fotômetro de chama para determinação da concentração de  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  (Figura 11).

Figura 11. Obtenção do extrato solúvel do substrato: (A) Centrífuga utilizada (B) Extrato (1:1) do solo em tubos da centrífuga; (C) Extrato (1:1) após 15 minutos a 10.000 rpm na centrífuga; (D) Vista de cima do tubo após centrifuga; (E) Filtragem.



Fonte: Vanessa Ohana G Moreira (2019).

## 5.8 Avaliação dos atributos físicos no substrato

### 5.8.1 Condutividade hidráulica saturada

A condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) ( $\text{cm h}^{-1}$ ) foi determinada pelo método do permeâmetro de carga constante (YOUNGS, 1991). O método consiste basicamente em



manter uma carga hidráulica constante, utilizando-se um Frasco de Mariotte, medindo o volume da solução drenado em função do tempo, isto é, a vazão.

Para isso, cilindros de PVC de dimensão 4,3 x 5 cm foram utilizados para a coleta de amostras de estrutura preservada dos cilindros de PVC maiores, correspondentes as parcelas do experimento. Após a coleta, na extremidade inferior dos cilindros menores, foi colocado um pano, convenientemente preso com uma liga para proteção do substrato. Na parte superior, foi colocado um cilindro de mesmo diâmetro e com altura de 2,5 cm, denominado cilindro de recarga, unidos e vedados com fita adesiva à prova d'água.

As amostras foram colocadas em bandejas durante um período entre 72 - 96 horas para saturação por capilaridade, ou seja, condição em que todo o espaço poroso do corpo de prova permanece preenchido por água (Figura 12).

Figura 12. Cilindros com dimensão de 4,3 x 5cm utilizados na avaliação da condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_{sat}$ ).



Fonte: Vanessa Ohana G Moreira (2019).

O volume de água coletado na avaliação foi medido com proveta em intervalos de tempos determinados. Com três medições consecutivas de vazão com resultados semelhantes foi considerado fluxo constante. Com isso, foram necessárias em média 7 - 8 horas para verificar constância do fluxo nas amostras. Para as condições experimentais, o cálculo da condutividade hidráulica do substrato saturado se deu pela equação 2 a seguir.

$$K_{sat} = \frac{V_a.L}{[(A.t.(L+h))]} \quad (2)$$

em que:

K<sub>sat</sub>: condutividade hidráulica saturada [cm.h<sup>-1</sup>];

V<sub>a</sub>: volume de água coletado no intervalo de tempo “t” [ml];

L: comprimento da amostra [cm];

A: área da seção transversal da amostra [cm<sup>2</sup>];

H: potencial de pressão no topo da amostra [cm]

t: tempo de coleta (h)

### **5.8.2 Densidade do substrato**

Determinada a partir de amostras com estrutura preservada, mediante coletada nos cilindros de dimensão 4,3 x 5 cm, e secas a 105°C até massa constante (EMBRAPA, 1997).

### **5.8.3 Porosidade e distribuição dos poros**

A quantificação dos valores de macroporosidade (poros com diâmetro  $\geq 50 \mu\text{m}$ ) e microporosidade (poros com diâmetro  $< 50 \mu\text{m}$ ) (cm<sup>3</sup>m<sup>-3</sup>) foi obtida submetendo amostras do substrato com estrutura preservada e saturadas em cilindros com dimensão 4,3 x 5 cm, ao potencial de 6 kPa, utilizando a mesa de tensão. Para a obtenção da massa do solo seco, as amostras foram secas em estufa a 105°C.

A determinação da porosidade total do substrato (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) foi calculada a partir da relação entre a densidade de partículas e a densidade do substrato (EMBRAPA, 1997). A análise de porosidade e distribuição de poros por tamanho foi realizada nos períodos T4, T8 e T12.

### **5.8.4 Argila dispersa em água**

Para análise da argila dispersa em água, foi realizado o mesmo procedimento adotado em análise granulométrica pelo método da pipeta, distinguindo-se apenas por não realizar a dispersão das partículas. Portanto, não se utilizou o NaOH 1N como dispersante químico (EMBRAPA, 1997).

### 5.8.5 Grau de Flocculação

O Grau de flocculação das argilas (GF) foi calculado a partir da argila total determinada na análise granulométrica e da argila dispersa em água, segundo a equação 3 (EMBRAPA, 1997):

$$GF(\%) = \frac{(\text{argila total} - \text{argila dispersa em água})}{\text{argila total}} (100) \quad (3)$$

### 5.8.6 Estabilidade dos agregados

Determinada seguindo o método por via úmida para mensurar a quantidade e distribuição das classes de agregados baseado em Yoder (1936) e suas modificações (KEMPER;CHEPIL, 1965; KEMPER; ROSENAU,1986).

Para isso, utilizou-se 25g de agregados de cada amostra, retidos em peneira de 4,76 mm, colocados em vidro de relógio e umedecidos lentamente com auxílio de um atomizador manual por 10 vezes com intervalos de 10 minutos. Depois de passadas as 16 horas em repouso em temperatura ambiente, os agregados umedecidos foram transferidos para o aparelho de oscilação vertical, adaptado com um conjunto de peneiras para realização da tamisação.

Após o término das oscilações (5 minutos), as amostras foram transferidas para latas de alumínio numeradas e de peso conhecido, para posterior secagem em estufa com temperatura entre 105 °C durante 24 horas e obtenção da massa dos agregados aparentes. Após isso, foi realizada a dispersão das amostras com NaOH 1N durante 12 horas e posterior agitação do material durante 5 minutos em copo agitador. Depois, passou-se o material nas peneiras lavando-a em água corrente de maneira que ficasse somente as frações individualizadas.

A massa de agregados em cada peneira foi expressa em cinco classes de diâmetro (> 4,76mm; 4,76 - 2,00 mm; 2,00 - 1,00 mm; 1,00 - 0,50 mm e 0,50 - 0,25 mm). A estabilidade dos agregados nas diferentes classes foi determinada pela Equação 4:

$$\% \text{ agregados estáveis por classe} = \frac{M_a - M_p}{M_s - M_w - \Sigma M_p} \times 100 \quad (4)$$

Sendo:

Ma: a massa dos agregados aparentes na classe [ g ]

Mp: a massa das partículas primárias na classe [ g ]

Mas: a massa da amostra original antes da tamisagem [ g ]

Mw: a massa de água na amostra [ g ].

A análise de estabilidade dos agregados do substrato foi realizada nos períodos T4, T8 e T12.

### 5.8.7 Diâmetro médio ponderado (DMP) e Diâmetro médio geométrico (DMG)

O diâmetro médio ponderado foi calculado considerando a proporção em massa  $W_i$  de um determinado tamanho de fração multiplicada pelo diâmetro médio  $X_i$  dessa fração. As equações utilizadas para cálculo estão apresentadas nas equações 5 e 6, respectivamente, e foram sugeridas por Youker e McGuinness (1957) e Castro Filho, Muzilli e Podanoschi (1998):

$$DMP = \sum_{i=1}^n (X_i * W_i) \quad (5)$$

Em que:

DMP: diâmetro médio ponderado (mm);

$X_i$ : diâmetro médio das classes (mm);

$W_i$ : proporção (%) de cada classe de agregados em relação ao total de classes.

$$DMG = \text{EXP} \frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cdot \log X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (6)$$

Em que:

DMG: diâmetro médio geométrico (mm);

$W_i$ : proporção (%) de cada classe de agregados em relação ao total de classes;

$\log X_i$ : logaritmo natural do diâmetro médio das classes (mm);

A análise dos parâmetros diâmetro médio ponderado e diâmetro médio geométrico foi realizada nos períodos T4, T8 e T12.

## **6 ANÁLISE ESTATÍSTICA**

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANAVA) pelo teste F a 1% utilizando o software SISVAR versão 5.6 (FERREIRA, 2013). Mediante constatação de diferença significativa, foi aplicado o teste de Tukey ao nível de significância ( $p < 0,01$ ) para comparação de médias do fator qualitativo e análise de regressão para fator quantitativo. Quando a interação foi significativa fez-se os desdobramentos para análise das médias. Na análise de regressão, procurou-se escolher o modelo matemático que melhor se ajustou aos dados, levando em consideração o  $R^2$ .

A confecção dos gráficos foi realizada com a utilização do software SIGMAPLOT versão 14.0.

## **7 INFRAESTRUTURA UTILIZADA**

A infraestrutura necessária para a realização do estudo foi disponibilizada pelos Laboratórios de Física e Química e Fertilidade do Solo do Departamento de Ciência do Solo; Laboratório de Polímeros (LABPOL) do Departamento de Química Orgânica e Inorgânica e Laboratório de Estudos em Química Aplicada (LEQA), todos pertencente a Universidade Federal do Ceará – UFC; e Laboratório de Tecnologia de Biomassa pertencente a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA.

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 8.1 Atributos químicos avaliados

#### 8.1.1 Concentração de $Na^+$ e $K^+$ no hidrogel e no substrato

A análise de variância (ANAVA) para a concentração de  $Na^+$  e  $K^+$  na composição do hidrogel e no substrato analisados em resposta aos tempos de incubação do solo (T) e as camadas (P), revelou diferenças significativas ( $p < 0,01$ ) em todas as variáveis avaliadas para os fatores (T) e (P) e para a interação entre os fatores (T\*P) (Tabela 2).

Tabela 2. Resumo da análise de variância (ANAVA) para as concentrações de  $Na^+$  e  $K^+$  na composição do hidrogel e na composição do extrato solúvel do substrato.

VALORES F					
Fontes de Variação	G.L	$Na^+_{(e)}$	$K^+_{(e)}$	$Na^+_{(H)}$	$K^+_{(H)}$
Tempo (T)	3	22,47**	158,74**	690,308**	3825,53**
Camadas (P)	1	1114,50**	806,24**	230,43**	12,34**
T*P	3	19,78**	148,63**	39,09**	43,21**
Total	39	-	-	-	-
C.V (%)	-	8,98	14,03	12,61	5,21

$Na^+_{(e)}$  e  $K^+_{(e)}$ :  $Na^+$  e  $K^+$  no extrato de saturação (1:1), respectivamente;  $Na^+_{(H)}$  e  $K^+_{(H)}$ :  $Na^+$  e  $K^+$  na composição do hidrogel, respectivamente. C.V(%); coeficiente de variação; G.L: Grau de liberdade; \*\* significativo a 1% pelo teste F.

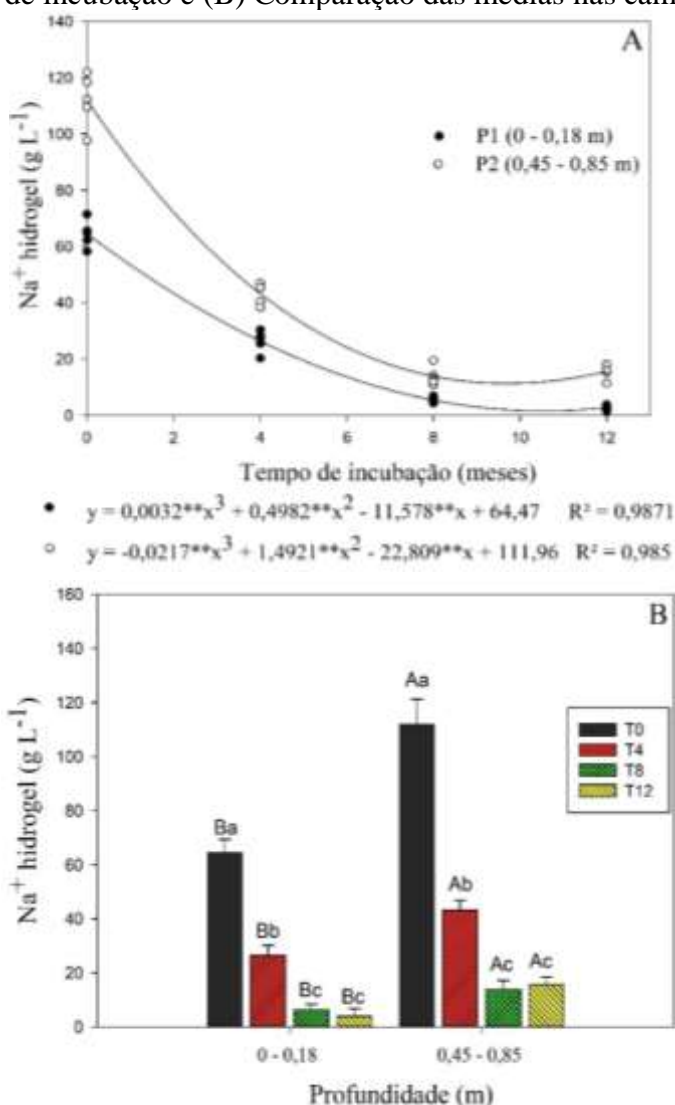
##### 8.1.1.1 Sódio ( $Na^+$ )

Para a concentração de  $Na^+$  na composição química do hidrogel em função do tempo de incubação, o efeito polinomial de ordem 3 apresentou melhor ajuste na regressão para a camada superficial P1 e camada subsuperficial P2 (Figura 13A). As maiores médias foram encontradas em T0, sendo significativamente superior as demais, em ambas as camadas.

Acredita-se que a diferença de concentração do sódio, preliminarmente encontrada no solo nas camadas P1 e P2 (ver tabela 1), contribuiu para a diferença significativa da concentração desse elemento no período inicial de avaliação, resultando em médias iguais a 65,07 e 111,96 g L<sup>-1</sup> para P1 e P2, respectivamente (Figura 13B), ou seja, o  $Na^+$  foi absorvido pelo gel em maior quantidade no tratamento das amostras de solo da P2 e menor em P1.

Em outras palavras, dez dias de incubação do hidrogel com o solo, correspondente ao tratamento T0, foi período suficiente para a ocorrência de interação química entre o substrato e a absorção de  $\text{Na}^+$  pelo polímero, sendo essa interação dependente da concentração de  $\text{Na}^+$  no solo. Isso pode ser evidenciado pela maior presença do íon  $\text{Na}^+$  no hidrogel em P2 e menor em P1, como já mencionado.

Figura 13. Concentração de  $\text{Na}^+$  ( $\text{g L}^{-1}$ ): (A)  $\text{Na}^+$  na composição do hidrogel das camadas em função dos períodos de incubação e (B) Comparação das médias nas camadas avaliadas.



Letras minúsculas comparam médias em uma mesma camada; letras maiúsculas comparam médias entre as camadas. \*Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 1% de significância. As barras representam o erro padrão das médias.

Em experimento semelhante, com uso de hidrogel a base de borato aplicado para remoção de cátions de uma amostra de solo altamente salino e sódico, observou-se que a condutividade elétrica das amostras de solo diminuiu devido a redução dos cátions no solo. No

entanto, os valores de RAS e PST indicaram que o solo ainda era sódico, que, segundo os autores, se deve ao alto teor de  $\text{Na}^+$  presente no solo (ABDEEN; SAEED, 2019). Apesar disso, os autores relatam redução de 7,43, 6,84, 6,08 e 2,36 vezes na concentração de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e  $\text{Ca}^{2+}$ , respectivamente, e relacionam a dependência da absorção pelo polímero com a quantidade dos sais disponíveis na amostra do solo, corroborando os dados encontrados nesse estudo.

Sabe-se que a complexação, a troca iônica e a interação eletrostática desempenham um papel na retenção de íons por hidrogéis a base de acrilato e acrilamida, contudo a importância relativa de cada um desses mecanismos na capacidade de absorção e eficiência de remoção de cátions pelo gel, depende do pH da solução, concentração de íon no meio e dosagem do polímero (HE et al., 2016), assim como para hidrogéis sintetizados a base de outros materiais (JIN; BAI, 2002; SUN et al., 2019; AKKAS et al., 1999).

Relata-se na literatura que, em solução sódica, os cátions de sódio ( $\text{Na}^+$ ) podem interagir com os grupos carboxílicos do gel formando complexos iônicos ( $-\text{COO}-\text{Na}^+$ ), reduzindo a repulsão eletrostática entre as cadeias poliméricas. Isso diminui o fenômeno de expansão das cadeias formadoras dos hidrogéis e, conseqüentemente, a absorção de água - com possível fenômeno de contração em condições extremas de salinidade (BORTOLIN, et al., 2016; GARCIA; MOURA; AOUADA, 2019).

Apesar da maior concentração de  $\text{Na}^+$  no período inicial do experimento na camada subsuperficial P2, houve redução estatisticamente significativa desse cátion na composição do polímero à medida que o tempo transcorreu, até que a diferença entre as médias se tornou invariável, fato esse que ocorreu a partir de 8 meses de incubação, ou seja, não foram observadas diferenças significativas na concentração do elemento  $\text{Na}^+$  entre T8 e T12 (13,69 e 15,68  $\text{g L}^{-1}$ , respectivamente). O mesmo comportamento ocorreu na camada superficial P1 para os tratamentos T8 e T12 (5,36 e 2,8  $\text{g L}^{-1}$ , respectivamente).

Esses resultados permitem inferir que os íons de  $\text{Na}^+$  entraram na estrutura do hidrogel à medida que a água o penetrou. A partir daí, os íons de sódio atuaram dentro da cadeia polimérica de alguma forma, isto é, livres ou adsorvidos aos grupos funcionais. Percebe-se, também, que o tempo também é fator que causa implicações na absorção pelo hidrogel, pois a quantidade de  $\text{Na}^+$  absorvida reduziu significativamente em função dos meses de incubação, até alcançar uma estabilização, comportamento verificado em ambas as camadas avaliadas.

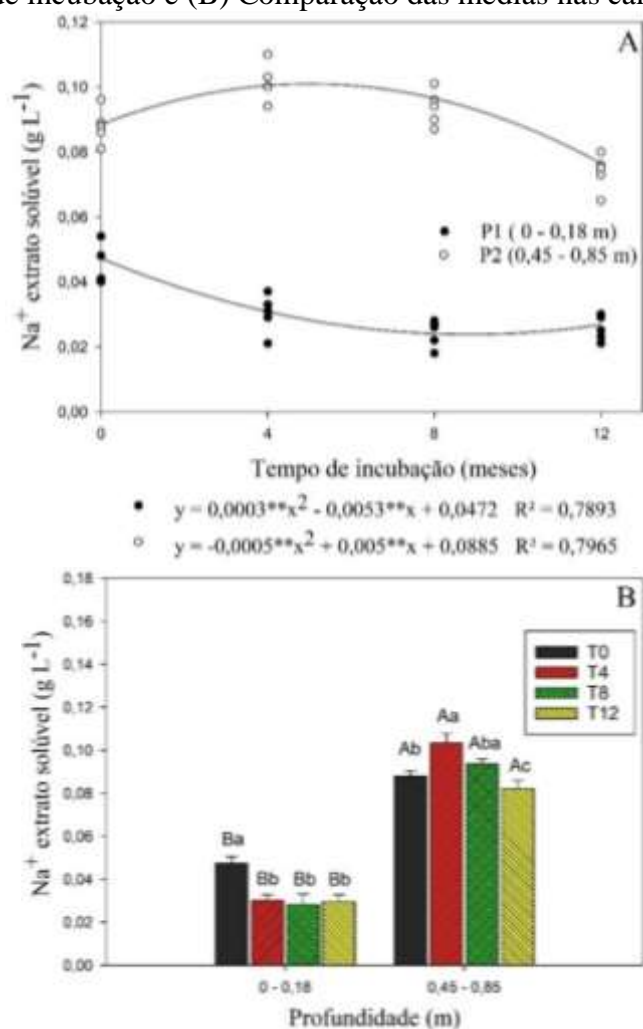
No extrato solúvel do substrato, a concentração de  $\text{Na}^+$  apresentou melhor ajuste para o modelo quadrático de regressão em ambas as camadas (Figura 14A). Houve diferenças significativas entre as médias dentro das camadas. As maiores médias da concentração de  $\text{Na}^+$



dos extratos avaliados foram encontradas no tratamento T0 para P1 (0,048 g L<sup>-1</sup>) e em T4 para P2 (0,099 g L<sup>-1</sup>) (Figura 14B).

Além da concentração inicial de Na<sup>+</sup> no hidrogel (ver item 5.3), cabe destacar que os íons de Na<sup>+</sup> adsorvidos aos colóides no solo podem ter sido liberados para a solução do solo devido a troca a partir do K<sup>+</sup> liberado, presente em maior quantidade, pelo gel. Isso pode explicar a maior presença de Na<sup>+</sup> no gel quando comparado ao valor do Na<sup>+</sup> do extrato solúvel da análise de caracterização (ver tabela 1).

Figura 14. Concentração de Na<sup>+</sup> (g L<sup>-1</sup>): (A) Na composição do extrato solúvel do substrato em função dos períodos de incubação e (B) Comparação das médias nas camadas avaliadas.



Letras minúsculas comparam médias em uma mesma camada; letras maiúsculas comparam médias entre as camadas. \*Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 1% de significância. As barras representam o erro padrão das médias.

Apesar da maior média da concentração do íon Na<sup>+</sup> na camada superficial P1 ter sido no tratamento T0, houve redução significativa entre T0 e T4. Após isso, foi verificada uma estabilização da concentração do elemento no extrato solúvel em reposta ao tempo de

incubação, não havendo diferença significativa entre os tratamentos T4, T8 e T12 (0,0298, 0,0244, 0,0272 g L<sup>-1</sup>, respectivamente).

Em relação a camada subsuperficial P2, houve aumento da concentração de Na<sup>+</sup> no extrato solúvel do substrato. Esse acréscimo, com a maior média obtida aos 4,8 meses, correspondeu a 10% a mais de sódio em relação ao início do experimento, permanecendo sem alteração significativa no terceiro período de avaliação. No entanto, aos 12 meses de experimento, foi verificada redução significativa da presença do íon no extrato solúvel com a menor média igual a 0,0772 g L<sup>-1</sup> (Figura 14A). Apesar do resultado indicar um aumento significativo, a diferença entre a maior e a menor média (0,099 e 0,0772 g L<sup>-1</sup>, respectivamente) obtida nas avaliações de P2 é pequena e não deve ser considerada em termos práticos.

Levando em consideração a redução da concentração do Na<sup>+</sup> na composição do hidrogel, demonstrada anteriormente, acredita-se que o aumento da presença desse cátion no extrato de saturação do substrato da camada subsuperficial P2 deve-se em parte, a liberação do Na<sup>+</sup> do polímero. Esse fato, contribui para a aceitação da hipótese que o hidrogel é capaz de absorver Na<sup>+</sup> em um primeiro momento, porém perde a capacidade de absorção de água e íons a longo prazo, liberando o íon Na<sup>+</sup> novamente para o meio externo.

O contrário ocorreu na camada superficial em P1, mesmo com a redução de Na<sup>+</sup> da composição do hidrogel, houve menor presença do íon no extrato de saturação do substrato, permanecendo uma concentração constante, resultado que pode ser explicado pela adsorção do íon Na<sup>+</sup> às cargas presentes nas partículas carregadas negativamente do complexo sortivo do solo que, por sua vez, não estava saturado por sódio (ver tabela 1).

Em experimento realizado com polímero a base de acrilamida na correção de solo salino-sódico, Miranda et al. (2011) concluíram que os teores de Na<sup>+</sup> no extrato de saturação permaneceram altos, não diferindo da testemunha, aos 70 dias de aplicação. Para os autores, o polímero não foi efetivo na correção do solo. Contudo, a menor capacidade de absorção da poliacrilamida não iônica utilizada no experimento pode explicar esse resultado.

Uma investigação sobre o envelhecimento do polímero sob repetidos ciclos de umedecimento-secagem durante um período de 6 meses no campo e uma investigação sistemática da influência de sais na absorção de água pelo polímero mostrou que os sais reduziram muito a capacidade de intumescimento. Além disso, os autores enfatizam a perda da capacidade de absorção com o envelhecimento do gel (BANEDJSCHAFIE; DURNER, 2015).

Na aplicação de hidrogel em restauração ambiental, Holliman et al. (2005) concluíram que a capacidade de retenção de água e a eficiência do hidrogel é dependente da temperatura, dos ciclos de umedecimento e secagem e do tempo de ação no solo ou “idade do

gel". Os autores relatam que a capacidade de retenção do hidrogel é reduzida drasticamente após 18 meses de contato com o solo, mesmo em condições não salinas, o que também levantou questões sobre a eficácia do polímero a longo prazo, concordando com os resultados encontrados nesse estudo.

Resultados contrários foram obtido por Chen et al. (2004), os quais relatam eficiência na aplicação de hidrogel, sintetizado com poliacrilamida reticulada, resultando no aumento da sobrevivência e do crescimento de uma espécie lenhosa cultivada em solo salino, rico em potássio ( $K^+$ ), por um período de 2 anos.

Pushpamalar et al. (2013) explicam que a capacidade de absorção de água dos hidrogéis depende da extensão e quantidade de reticulação, isto é, da forma de síntese do polímero. Para a Agaba et al. (2010), a eficiência do hidrogel no solo também depende de características intrínsecas ao meio externo. Essa pode ser um explicação plausível para a diversidade de resultados encontrados na literatura a respeito do comportamento do hidrogel, quanto a absorção de água, depois de aplicado aos solos, sejam esses afetados por sais ou não.

A influência dos íons no intumescimento do hidrogel ainda não é bem compreendida, em particular no que diz respeito aos efeitos iônicos dos cátions (ANDERSEN; IBSEN; BIRKEDAL, 2018). Sabe-se que ânions e cátions da solução influenciam negativamente o processo de hidratação do hidrogel, sendo o efeito mais pronunciado para aqueles com a maior valência (NEVES et al., 2020; GARCIA; MOURA; AOUADA 2019).

Bo et al. (2012) relataram que a maior valência catiônica, a maior concentração e o maior raio iônico, ou seja, a sequência:  $Cu^{2+} > Al^{3+} > Fe^{3+} > Fe^{2+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$ , reduz notavelmente a absorção de água dos polímeros superabsorventes. Em outras palavras, os íons de maior valência podem ser, preferencialmente, adsorvidos aos grupos funcionais existentes na estrutura polimérica, resultando em menor absorção de água pelo hidrogel.

Os colóides dos solos adsorvem íons de forma semelhante, ou seja, devido as valências, raio e propriedades hidratantes, cátions são adsorvidos nas micelas carregadas negativamente com diferentes graus de preferência, seguindo a ordem:  $Al^{3+} > Ca^{2+} > Mg^{2+} > NH_4^+ > K^+ > Na^+ > Li^+$  (FERREIRA; SILVA; RUIZ, 2016).

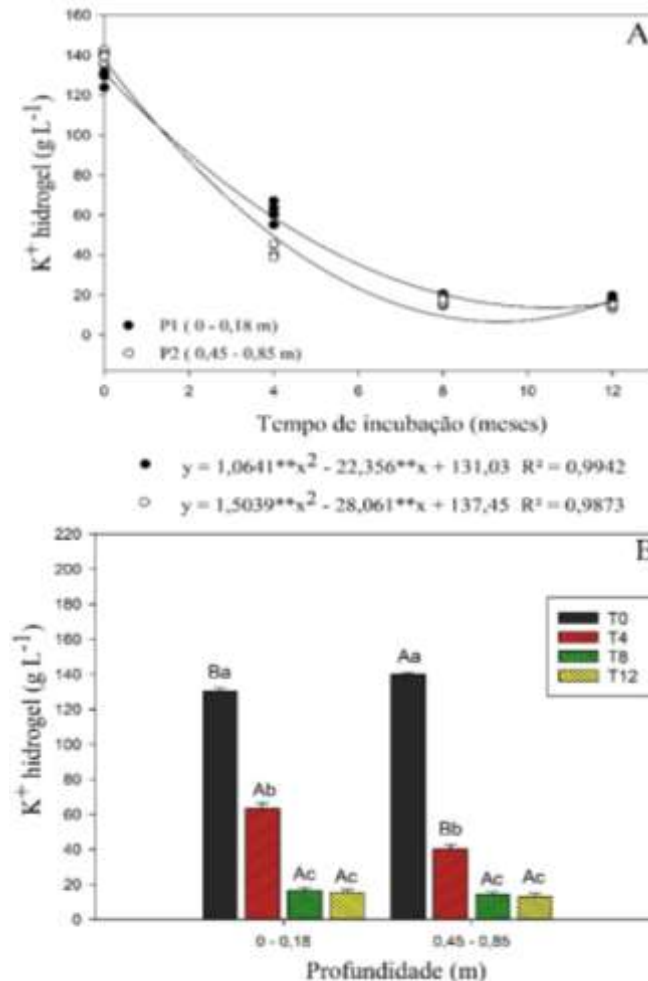
No entanto, quando em alta concentração no solo, o  $Na^+$  apesar de possui menor poder de troca, consegue deslocar outros cátions por ação de massa e passa a ocupar as micelas eletrostaticamente carregadas dos colóides (RIBEIRO; RIBEIRO FILHO; JACOMINE, 2016), o que pode explicar a menor concentração e a estabilização do  $Na^+$  no extrato de saturação de P1 em T8 e T12.

### 8.1.1.2 Potássio ( $K^+$ )

A concentração de  $K^+$  na composição do hidrogel em função do tempo de incubação ajustou-se ao modelo quadrático da regressão na camada superficial P1 e subsuperficial P2. As maiores médias da concentração do elemento em P1 e P2 ( $129,59$  e  $139,8$   $g L^{-1}$ , respectivamente) foram encontradas em T0, com posterior redução significativa com o decorrer do tempo de incubação (Figura 15A).

A maior média de  $K^+$  foi encontrada no gel coletado da camada subsuperficial P2, apesar de haver menor quantidade do íon no extrato de saturação antes da incubação no solo dessa camada (ver tabela 1). Já na camada P1, a presença do íon  $K^+$ , em T0, no gel foi significativamente menor em relação a P2 (Figura 15B).

Figura 15. Concentração de  $K^+$  ( $g L^{-1}$ ): (A) Na composição do hidrogel das camadas em função do tempo de incubação e (B) Comparação das médias das camadas avaliadas.



Letras minúsculas comparam médias em uma mesma camada; letras maiúsculas comparam médias entre as camadas. \*Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 1% de significância. As barras representam o erro padrão das médias.

Os resultados também indicam redução significativa da concentração do elemento  $K^+$  no gel em função do tempo, resultando nas menores médias obtida os 12 meses de avaliação (T12) com valores de 17,62 e 16,06  $g L^{-1}$ , para a camada P1 e P2, respectivamente. Não houve diferença significativa entre T8 e T12 nas camadas e entre elas, sugerindo uma estabilização da concentração de  $K^+$  no gel após 8 meses de incubação.

O comportamento de liberação do potássio por hidrogéis no solo já foi investigado, contudo, em menor período comparado ao realizado nesse estudo. Para Mendonça et al. (2013), esse fenômeno ocorre após o intumescimento do hidrogel seco, pois as moléculas de água se difundem para o interior do material e interagem com os sítios hidrofílicos do polímero, liberando os íons de  $K^+$ , para se difundirem do interior do gel para o meio externo.

Sabe-se que a concentração dos elementos-traço na solução do solo, sua biodisponibilidade e mobilidade são controladas por reações de adsorção e dessorção na superfície dos colóides do solo (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001). Esses processos, por sua vez, são afetados por vários fatores, dentro os quais a concentração salina, pois a força iônica está relacionada com a concentração de eletrólitos no meio e, com isso, com a atividade dos íons em solução (PIERANGLI et al., 2001; WAKEEL, 2013; HUSSAIN et al., 2013).

Como isotermas de Langmuir já foram relacionadas aos processos de adsorção e dessorção de hidrogéis, e, por sua vez, tem sido utilizada para explicar reações entre os constituintes do solo e da solução, é de se esperar que comportamentos semelhantes de troca que ocorrem no solo também ocorram na matriz polimérica aniônica do gel (DURAN; SOLPAN; GUVEN, 1999; HE et al., 2016; TANG; ZHOU; ZHANG, 2012). Esses comportamentos podem explicar o fato do íon  $K^+$  ser menos liberado pelo gel em T0 da camada subsuperficial P2, isto é, devido a saturação pelo  $Na^+$  no meio externo.

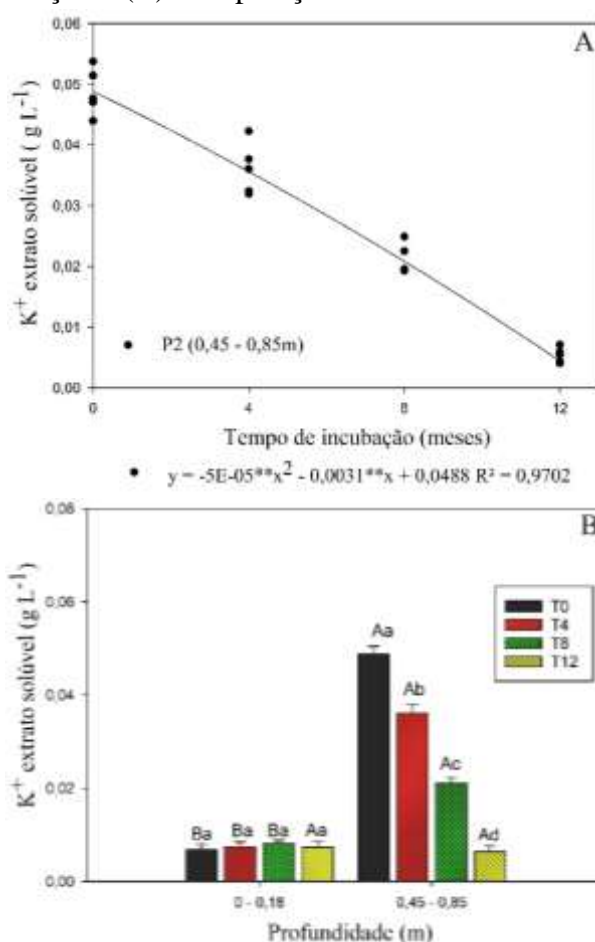
Vale ressaltar que, a maior quantidade liberada do íon  $K^+$  pelo hidrogel - comparado a quantidade de  $Na^+$  - deve-se a maior presença do íon potássio na constituição do polímero, que, por sua vez, foi sintetizado com acrilato de potássio. Resultados semelhantes são relatados por Aouada et al. (2008).

Em solução aquosa, a cinética de liberação controlada de  $K^+$ , a partir de hidrogéis, indica alta liberação de  $K^+$  nas primeiras horas, relata-se que os hidrogéis não liberam a totalidade do  $K^+$  fixado em sua matriz, devido: a) a forte interação entre o  $K^+$  e a matriz polimérica; e b) a quantidade relativamente baixa de  $K^+$ , formando um baixo gradiente de concentração (AOUADA et al., 2008; JAMNONGKAN; KAEWPIROM, 2010). Além disso, a contração/expansão da rede polimérica exerce importante papel no processo de liberação de água e íons pelo polímero (AOUADA et al., 2008).

Em hidrogéis copolímeros a base de quitosana e poliacrilamida, o mecanismo de liberação de potássio em água foi por difusão não-Fickiana. Já com aumento dos íons no meio de intumescimento, o mecanismo passou a ser anômalo, isto é, indica ser controlado tanto por difusão como pelo inchamento/relaxamento das cadeias poliméricas do gel, processo que exerce efeito pronunciado na cinética de liberação de substâncias (JAMNONGKAN; KAEWPIROM, 2010; LOPES; LOBO; COSTA, 2005; BORTOLIN, et al., 2012). Como a presença de  $\text{Na}^+$  em excesso na solução reduz o intumescimento do polímero, a liberação de  $\text{K}^+$  em P2 também pode ter sido prejudicado por esse fato.

No extrato solúvel do substrato, a concentração de  $\text{K}^+$  apresentou melhor ajuste para o modelo quadrático de regressão na camada subsuperficial P2 (Figura 16A). Não houve diferença entre as médias para a camada superficial P1 nos períodos avaliados. Em relação as médias de P2, houve diferenças significativas entre os períodos avaliados (Figura 16B).

Figura 16. Concentração de  $\text{K}^+$  ( $\text{g L}^{-1}$ ): (A) No extrato solúvel do substrato da camada P2 em função do tempo de incubação e (B) Comparação das médias obtidas nas camadas P1 e P2.



Letras minúsculas comparam médias em uma mesma camada; letras maiúsculas comparam médias entre as camadas. \*Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 1% de significância. As barras representam o erro padrão das médias.

Na camada superficial P1, não houve diferença entre as médias da concentração de  $K^+$ , assim como o íon  $Na^+$  - a partir de T4. Isso corrobora a hipótese de que esses íons foram adsorvidos pelas cargas eletrostaticamente ativas dos colóides presente no solo que compõe o complexo de troca que, por sua vez, encontravam-se menos saturada por sódio, resultando em concentração invariável no extrato solúvel com o transcorrer do tempo de realização do estudo (ERNANI et al., 2007; FERREIRA; SILVA; RUIZ, 2016).

A maior média da concentração de  $K^+$  do extrato solúvel da camada subsuperficial P2 foi encontrada no tratamento T0 (0,0487 g L<sup>-1</sup>) e a menor encontrada no tratamento T12 (0,00473 g L<sup>-1</sup>), redução de 91,46% quando comparado à concentração no início do experimento. Vale ressaltar que, no último período de avaliação (T12), não houve diferença significativa das médias de  $K^+$  do extrato solúvel entre as camadas P1 e P2.

Apesar da liberação de  $K^+$  pelo hidrogel, houve menor concentração desse íon no extrato solúvel do substrato em P1 e maior em P2, apoiando a hipótese que a menor saturação por sódio em P1 favoreceu a adsorção dos íons  $K^+$  às cargas eletrostaticamente ativas dos colóides do solo, reduzindo a concentração desse íon no extrato solúvel.

Em relação a camada subsuperficial P2, percebe-se aumento de 62% da concentração do íon  $K^+$  no extrato solúvel do substrato na primeira avaliação (T0), quando comparado ao solo antes da incubação (ver tabela 1). Esses resultados corroboram com os dados encontrados por Zonatto et al. (2017) e Albuquerque (2019), que relatam aumento de aproximadamente 40% de  $K^+$  no solo em relação ao tratamento sem hidrogel. Outros resultados semelhantes aos encontrados nesse estudo já foram relatados ao utilizar hidrogéis para liberação de  $K^+$  (MI et al., 2010; PUSHPAMALAR, 2013; SENNA et al., 2015; ZONATTO et al., 2017).

No entanto, houve redução do íon  $K^+$  no extrato solúvel, em função do tempo de incubação. Esse comportamento pode ser explicado pelo processo de eliminação do íon  $K^+$  por lixiviação na água que, porventura, foi aplicada aos cilindros de PVC. O potássio, por ser um íon muito móvel, pode ser facilmente lixiviado (ALFARO; JARVIS; GREGORY, 2004). Em estudo semelhante, autores concluíram que a elevação dos teores de  $K^+$  no solo favoreceu a lixiviação desse elemento, mesmo em solos mais argilosos e com alta CTC (WERLE; GARCIA; ROSOLEM, 2008).

Além disso, sabe-se que, a adsorção de  $K^+$  às cargas negativas do solo, depende da natureza das superfícies de troca (tipo de argila, matéria orgânica, óxidos e hidróxidos), determinando o coeficiente de seletividade, e da atividade iônica do  $K^+$  em relação aos demais cátions que se ligam significativamente por complexos de esfera externa à fase sólida (NEVES et al., 2009).

Em avaliação do comportamento de solo sódico, baixos níveis dos íons de  $K^+$  foram encontrados, devido, principalmente, a competição decorrente da presença dominante do  $Na^+$  (VITAL et al., 2005; ALBUQUERQUE et al., 2018). Embora a maioria dos solos tenha quantidades adequadas de  $K^+$ , em muitos, tornou-se insuficiente por causa da grande quantidade removida pelas culturas, sendo esse um problema sério sob condições de solo sódico ou salino-sódico, aumentando a competição entre os íons (WAKEEL, 2013; ASHRAF et al., 2011).

## 8.2 Atributos físicos avaliados

### 8.2.1 Densidade do substrato, Porosidade e Distribuição de Poros

Em resposta aos tempos de incubação (T) e as camadas (P) houve diferenças significativas ( $p < 0,01$ ) para os fatores isoladamente e para interação entre fatores (T\*P) para o parâmetro densidade do substrato (Ds) (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo da análise de variância (ANAVA) para o parâmetro de densidade do substrato.

Fonte de Variação	G.L	VALORES F
		Ds
Tempo (T)	2	231,16**
Camada (P)	1	47,62**
T*P	2	6,845**
Total	39	-
C.V (%)	-	2,08

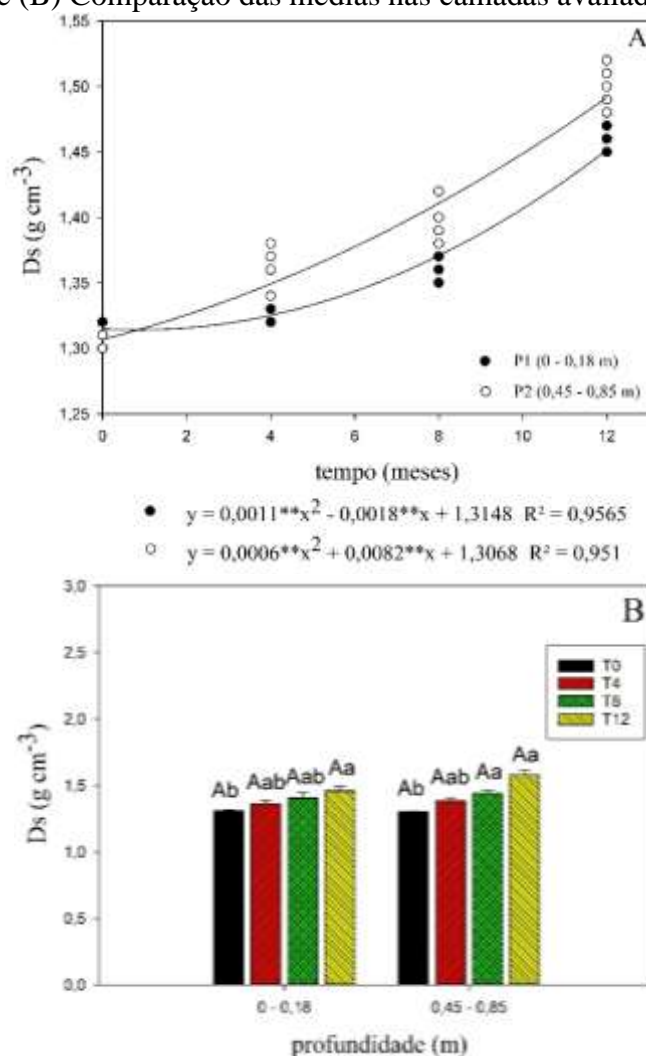
Ds: Densidade do substrato C.V(%); coeficiente de variação; G.L: Grau de liberdade; \*\* significativo a 1% pelo teste F.

Houve aumento significativo da densidade do substrato em função do tempo de incubação, ajustando-se melhor ao modelo quadrático de regressão em ambas as camadas avaliadas (Figura 17A).

Ao observar a variação das médias de Ds entre T0 e T12, os incrementos na densidade do solo foram de 1,26 para 1,53  $g\ cm^{-3}$  e 1,27 para 1,66  $g\ cm^{-3}$  nas camadas superficial P1 e subsuperficial P2, respectivamente (Figura 17B). Esses valores correspondem a aumentos de 17,65% e 23,5%, para P1 e P2, respectivamente.



Figura 17. Densidade do substrato ( $D_s$ ) ( $\text{g cm}^{-3}$ ): (A) Em função do tempo de incubação com hidrogel em P1 e P2 e (B) Comparação das médias nas camadas avaliadas no estudo.



Letras minúsculas comparam médias em uma mesma camada; letras maiúsculas comparam médias entre as camadas. \*Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 1% de significância. As barras representam o erro padrão das médias.

Apesar do aumento da densidade do substrato, os valores das médias encontrados no último período de avaliação desse estudo (T12) são condizentes com os relatados na literatura para solo da mesma classe, com excesso de sódio trocável, coletado na mesma região (ARAÚJO et al., 2011), sugerindo que o hidrogel não influenciou na melhoria da densidade do solo.

Como foram coletadas amostras de estrutura não preservada e o substrato foi adicionado aos cilindros de PVC, esse comportamento pode ser comparado ao destorroamento de solo sódico com uso de subsolador ou escarificador, isto é, trata-se de um efeito temporário. Com o decorrer do tempo, as partículas podem ter se rearranjado e a densidade do solo

aumentou, devido ao efeito negativo do sódio trocável em excesso e a dispersão das partículas, sendo o aumento maior na camada P2.

Há estudos em que foi identificada redução na densidade do solo com a aplicação de polímero superabsorvente, porém os solos não eram sódicos (EL-HADY; ABO-SEDERA, 2006; BAI et al., 2010; HOU et al., 2018; ABDALLAH, 2019). Outros estudos concluíram que o hidrogel não causa efeito significativo na densidade do solo (SIWEK; DOMAGAŁA-ŚWIĄTKIEWICZ; KALISZ1, 2015; FERNANDES, 2016).

Sabe-se que, os efeitos de polímero superabsorventes sobre a retenção de água e outras propriedades do solo variam conforme o tipo e a estrutura do polímero (BAI et al., 2010). Os efeitos também são dependentes de condições e atributos intrínsecos aos diferentes tipos de solos (ABEDI- KOUPAI; SOHRAB; SWARBRICK, 2008). Diante dos resultados desse estudo, infere-se que em solo degradado por sódio, o polímero não é eficiente para melhorar a densidade do solo em camada superficial e subsuperficial.

A densidade do solo é afetada por cultivos, manejo ou fatores que alteram a sua estrutura e, por consequência, o arranjo e o volume dos poros. Essas alterações influem em propriedades físico-hídricas importantes, tais como: a porosidade do solo e a retenção de água no solo (TORMENA et al., 1998; KLEIN, LIBARDI, 2002).

Em resposta aos tempos de incubação (T) e as camadas (P), houve diferenças significativas ( $p < 0,01$ ) para os fatores isoladamente e para interação entre fatores de (T\*P) com relação aos parâmetros porosidade total (PT), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) (Tabela 4).

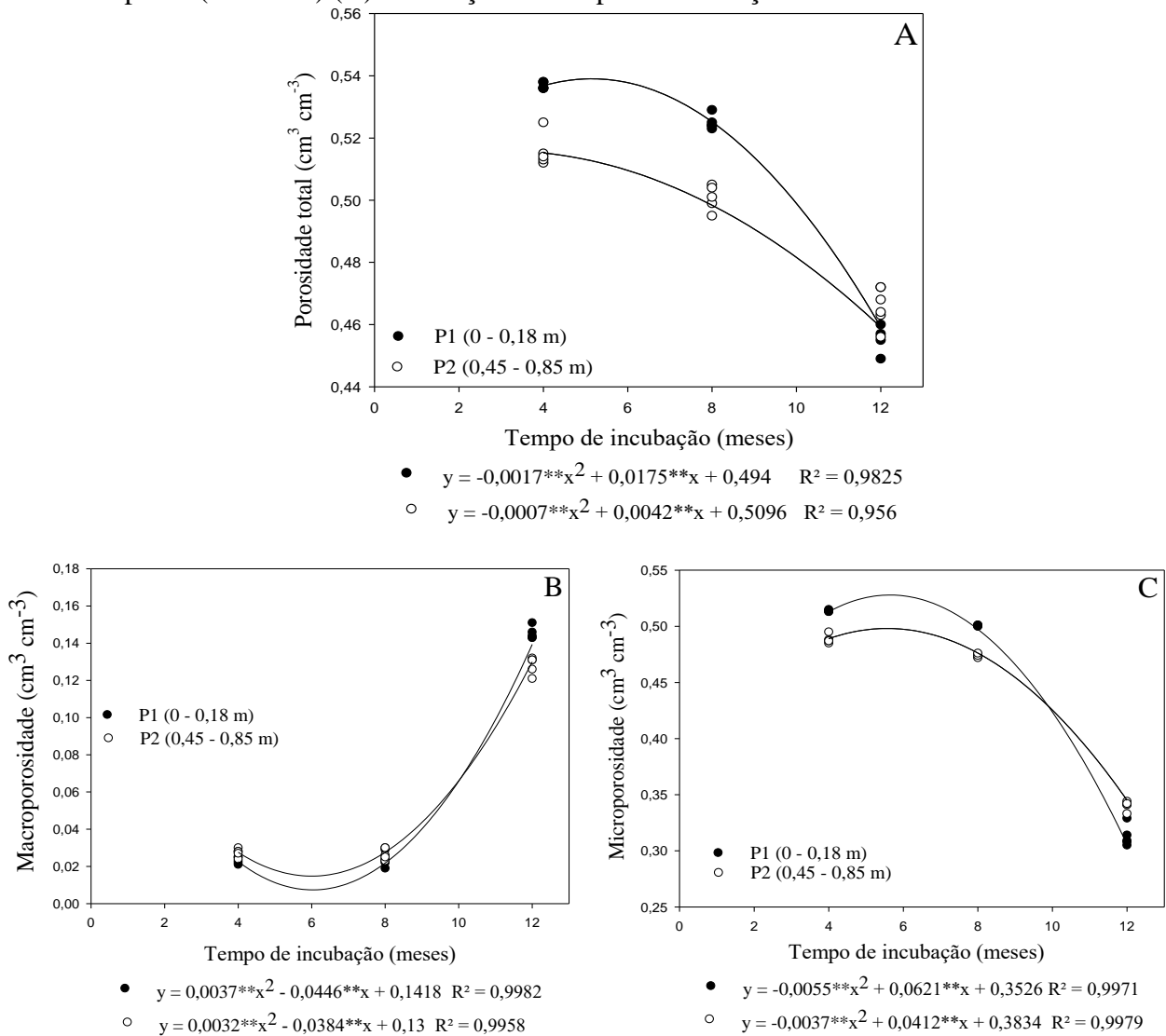
Tabela 4. Resumo da análise de variância (ANAVA) para os parâmetros de porosidade total (PT), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro).

Fonte de variação	VALORES F			
	G.L.	PT	Macro	Micro
Tempo (T)	2	428,37**	4275,47**	4463,65**
Camada (P)	1	40,571**	9,68**	24,31**
T*P	2	35,050**	36,43**	111,91**
Total	29	-	-	-
C.V (%)	-	1,01	4,79	1,05

C.V(%); coeficiente de variação; G.L: Grau de liberdade; \*\* significativo a 1% pelo teste F.

A porosidade total (Figura 18A), macroporosidade (Figura 18B) e microporosidade (Figura 18C) ajustaram-se ao modelo quadrático da regressão para ambas as camadas em função do tempo de incubação.

Figura 18. Porosidade total (A) e distribuição de poros por tamanho em macroporos (B) e microporos ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) (D) em função do tempo de incubação.



Conforme as análises iniciais, as médias de PT em T4 foram semelhantes para o solo (ver tabela 1) em ambas as camadas avaliadas. Porém, houve redução da PT em função do tempo de incubação. Sendo assim, as menores médias da porosidade total foram encontradas em T12, para P1 e P2.

A variação das médias de PT entre T4 e T12 foi de 0,5368 para 0,4586  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  e de 0,5158 para 0,4686  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  na camada superficial P1 e subsuperficial P2,

respectivamente (Figura 18A). Essa redução foi equivalente a 14,57% e 9,16%, para P1 e P2, respectivamente, comparando com o período inicial de avaliação que, por sua vez, resultou em valores de PT semelhantes ao solo (sem a aplicação do gel).

Em solos não sódicos, houve aumento da porosidade total do solo com a utilização de polímero superabsorvente (PALUSKEK, 2011; HUSSIEN et al., 2012; HELALIA; EL-ALMIR; SHAWKY, 1992; THOMBARE et al., 2018; BHARDWAJ et al., 2007).

Em solos com excesso de sódio, a dispersão das partículas do solo promove a obstrução dos poros, tornando o solo impermeável, conduzindo a diversos problemas como a redução da taxa de infiltração, redução da condutividade hidráulica e formação de crostas na superfície dos solos (PAES et al., 2013; VASCONCELOS et al., 2013; SILVEIRA et al., 2008).

A porosidade total não foi alterada pela adição do hidrogel em solo ligeiramente sódico com textura franco argilo arenosa. A elevada densidade e a maior dispersão do solo pode reduzir o efeito de dilatação e contração do polímero e, com isso, sua influência na melhoria de atributos físicos do solo (HUSSIEN et al., 2012). Isso pode explicar os resultados encontrados nesse estudo, referente a redução da porosidade total e ao aumento da densidade do substrato em função do tempo, já que amostras não preservadas do solo (TFSA) foram utilizadas para o preenchimento dos canos de PVC.

Em relação a distribuição de poros por tamanho, foi observado aumento significativo na quantidade de poros de maior tamanho (macroporos) e a redução significativa do número de poros menores (microporos) em ambas as camadas avaliadas em função do tempo de incubação (Figura 18B) (Figura 18C).

As maiores médias da quantidade de macroporos ( $0,1454$  e  $0,1282 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  para P1 e P2, respectivamente) foram encontradas em T12 que, por sua vez, foi o período de avaliação que resultou nas menores média da quantidade de microporos em P1 ( $0,3139 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) e P2 ( $0,3402 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) (Figura 18C).

Percebe-se que, apesar da redução da porosidade total, houve aumento de poros de maior tamanho e redução de poros de menor tamanho no solo. Esse comportamento apoia a hipótese de que o processo de intumescimento do gel em condições úmidas contribui para o aumento da formação de poros maiores, pois à medida que o solo seca, devido a drenagem ou a evaporação, há formação de espaços vazios, que podem ser levemente considerados macroporos nos resultados das análises. Resultados semelhantes já foram relatados na literatura (PICCOLI et al., 2020; ALBUQUERQUE, 2019).

Para Demitri et al. (2013) como os grânulos de hidrogel (que na forma seca têm quase as mesmas dimensões dos grânulos do substrato) aumentam seu tamanho após o

intumescimento, há contribuição no aumento de espaços vazios do substrato, à medida que o gel perde umidade, proporcionando uma melhor oxigenação às raízes das plantas.

Os microporos são responsáveis pela retenção da água no solo, já os macroporos têm como objetivo a drenagem e a aeração, além de permitir o desenvolvimento radicular e abrigar os microrganismos. Para Han et al., (2013), além do tamanho, a geometria dos poros influencia na transmissão e preservação da umidade no solo, sendo que o predomínio de formas mais irregulares resulta em um processo de transporte de água mais lento. Para Souza et al., (2006), a menor condução de água, também é resultado da baixa conectividade entre esses poros e, por consequência, menor permeabilidade.

### 8.2.2 Condutividade Hidráulica - *K<sub>sat</sub>*

Os resultados da avaliação da condutividade hidráulica em meio saturado (*K<sub>sat</sub>*) das amostras está apresentado na tabela 5. As médias da condutividade hidráulica na camada superficial P1 nos períodos T0 e T4 não diferiram significativamente, porém foi nula nos demais períodos avaliados (T8 e T12). Na camada superficial P2, a *K<sub>sat</sub>* foi nula do início ao fim das avaliações (Tabela 5).

Tabela 5. Médias de condutividade hidráulica ( $\text{cm h}^{-1}$ ) nas diferentes camadas em função dos intervalos de avaliação do experimento.

	Condutividade Hidráulica ( $\text{cm h}^{-1}$ )			
	T0	T4	T8	T12
P1	0,3333a	0,2253a	-	-
P2	-	-	-	-

letras minúsculas comparam médias em uma mesma camada; letras maiúsculas comparam médias entre as camadas. \*Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 1% de significância.

Conforme classificação da condutividade hidráulica em meio saturado sugerido por Freire (2003), os valores encontrados em T0 e T4 da camada superficial P1, classifica a *K<sub>sat</sub>* como lenta. Resultados semelhantes foram encontrados por esse autor, em outro estudo, na camada superficial da mesma classe de solo (Neossolo Flúvico) com excesso de sódio.

Apesar da *K<sub>sat</sub>* ser considerada lenta, foi maior em T4 e T8, na camada P1, quando comparado as amostras de solo, antes da aplicação do polímero (resultou em *K<sub>sat</sub>* nula), mostrando que o gel pode ter contribuído com o aumento da condutividade hidráulica, porém

reduziu em função do tempo de incubação. No entanto, esse comportamento é condizente com o aumento da densidade e a redução da porosidade total do solo em função do tempo.

Em estudo para investigar como as propriedades hidráulicas de solo arenoso não salino são afetadas pela adição de polímero superabsorventes em diferentes concentrações, percebeu-se que devido ao envelhecimento dos polímeros, após 6 meses, redução da efetividade do gel em função do seu tempo de atuação no solo (BANEDJSCHAFIE; DURNER, 2015).

O uso de hidrogel aniônico em um experimento em casa de vegetação resultou em aumento significativo da condutividade hidráulica de solo não salino, porém os efeitos benéficos diminuiriam com o tempo (SAFARI; ALIASGHARZAD; ASGHARI, 2015). Demais trabalhos, também relatam que a influência do gel em atributos físicos do solo, incluindo os hidráulicos, reduz-se gradualmente em função do tempo (LIAO et al., 2016; ASGHARI, 2017).

Ademais, segundo Reichardt (1985), a condutividade hidráulica depende de propriedades do espaço poroso, portanto, pode variar enormemente entre os solos, e para o mesmo solo com variações estruturais. Isto é, a forma e continuidade dos poros pode variar de um local a outro, e diferir entre as distintas orientações do solo. Por tanto, a  $K_{sat}$  pode descrever o sistema poroso de um solo, mas não a porosidade total, e nem mesmo a macro e a microporosidade do solo, consideradas separadamente (MESQUITA; MORAES, 2004).

Apesar da macroporosidade ser fator de extrema importância para esse parâmetro (SILVA; KATO, 1997; GONÇALVES; LIBARDI, 2013). Bouma (1982) explica que poros maiores em uma dada seção podem não contribuir para o fluxo quando apresentam descontinuidade no perfil. Dessa forma, a classificação dos poros por tamanho não necessariamente reflete o importante padrão de continuidade dos poros do solo (GONÇALVES; LIBARDI, 2013; MESQUITA; MORAES, 2004).

Essas explicações reforçam a hipótese, anteriormente mencionada, de que as partículas do hidrogel ao perderem água e sofrerem o processo de contração, promovem a formação de espaços vazios que, por sua vez, podem não apresentar continuidade e, dessa forma, não contribuem com fluxo de água no perfil, concordando com os resultados encontrados nesse estudo.

A redução da  $K_{sat}$  devido a adição de hidrogel ao solo já foi relatada anteriormente para Latossolo e Areias Quartzosas (PREVEDELLO; BALENA, 2000) e para solo arenoso não salino (Al-DARBY, 1996) (MOHAWESH; DUNER, 2019). Para Bhardwaj et al., (2007), a redução pode ser explicada pelo aumento do volume do solo, resultante do inchaço do polímero durante a saturação e bloqueio dos poros devido ao intumescimento dos grãos do gel.

Em estudo recente, Alkhasha, Al-Omran e Aly, (2018) concluíram que a aplicação de polímero superabsorvente reduziu a condutividade hidráulica de solo arenoso e aumentou a capacidade do solo de reter água. À medida que aumentou a concentração do polímero nos solos texturas franco-argilo arenosa e argilosa, ocorreu maior retenção de água, principalmente, nos potenciais matriciais mais elevados (OLIVEIRA et al., 2004). Para Lentz (2015), a influência do hidrogel na Ksat é fortemente influenciada pela concentração do polímero aplicada ao solo.

Para Zahow e Amrhein (1992) polímeros tiveram um efeito significativo no aumento da condutividade hidráulica saturada das amostras de solo com valores PST <15, mas não teve efeito significativo nas amostras com PST > 15. Os autores atribuem a ausência dos efeitos do gel em condições de sodicidade, à menor hidratação e maior dispersão do solo, reforçando o entendimento de que a concentração elevada de Na<sup>+</sup> prejudica os efeitos do polímero como melhorador da condutividade hidráulica de solos sódicos.

### 8.2.3 Grau de flocculação das argilas

A ANAVA para o grau de flocculação das argilas (GF) em resposta aos tempos de incubação (T) e as camadas (P) revelou diferenças significativas ( $p < 0,01$ ) para os fatores isoladamente e para interação entre fatores (T\*P) (Tabela 6).

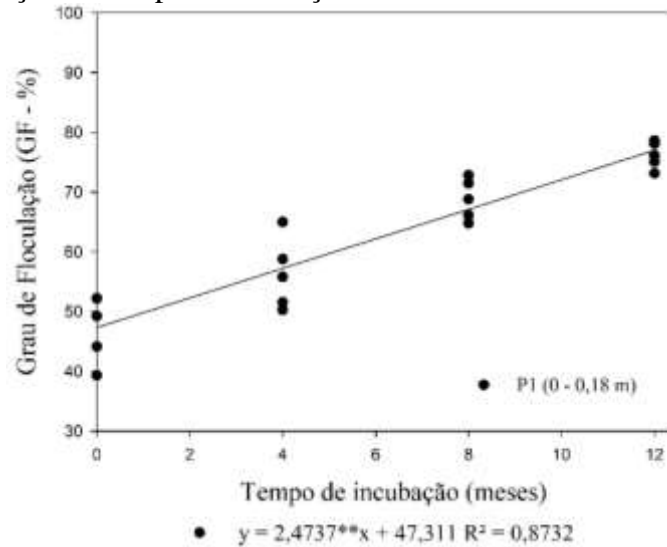
Tabela 6. Resumo da análise de variância (ANAVA) para o parâmetro grau de flocculação das argilas (GF).

VALOR F		
Fonte de variação	G.L.	G.F.
Tempo (T)	3	24,763**
Camada (P)	1	317,91**
T*P	3	48,167**
Total	39	-
C.V (%)	-	6,77

C.V(%); coeficiente de variação; G.L: Grau de liberdade; \*\* significativo a 1% pelo teste F.

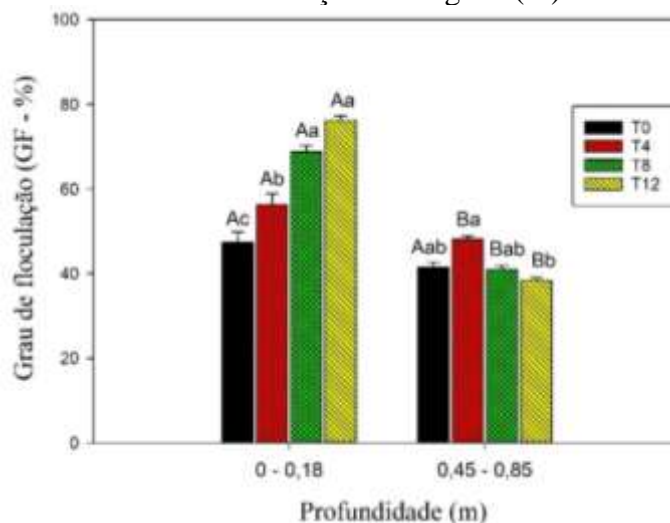
O aumento linear significativo da GF na camada superficial P1 correspondeu a 38,55% comparado ao tratamento inicial. Para camada subsuperficial P2, não houve diferença significativa entre a avaliação do início e do final do experimento (Figura 19).

Figura 19. Grau de flocculação (GF) (%) da camada avaliada P1 do Neossolo Flúvico incubado com hidrogel em função do tempo de avaliação.



A maior média de GF da camada P1 (76,99%) foi encontrada após 12 meses do início do experimento (T12), sendo estatisticamente diferente de T0 e T4. A menor média (47,31%) foi encontrada na avaliação de T0 que, por sua vez, foi estatisticamente diferente das demais. Os valores das médias para o grau de flocculação das argilas foram maiores, em todos os períodos de avaliação, na camada superficial P1 (Figura 20).

Figura 20. Médias do Grau de flocculação das argilas (%) nas camadas avaliadas.



Letras minúsculas comparam médias em uma mesma camada; letras maiúsculas comparam médias entre as camadas. \*Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 1% de significância. As barras representam o erro padrão das médias.



A elevada percentagem de sódio trocável no complexo de troca resulta em alta quantidade de argila dispersa em água, acarretando baixo grau de floculação, o que contribui para a manutenção de condições físicas desfavoráveis desses solos, notadamente quanto à permeabilidade à água e ao desenvolvimento de raízes (MOTA; OLIVEIRA, 1999).

A estrutura dos flóculos formados pelos pacotes de argila na presença do hidrogel tem direta relação com a ocorrência da adsorção do polímero na superfície externa das argilas, assim como, a concentração de eletrólitos no meio. Relata-se que, quanto maior a presença de cátions monovalentes, menor é a taxa de floculação de argilas (SWORSKA; LASKOWSKI; CYMERMAN, 2000; BEM-HUR et al., 1992).

Portanto, sugere-se que a maior concentração de  $\text{Na}^+$ , combinado com seu potencial de dispersão do solo, podem contribuir, também, para a redução da atuação do gel na floculação das argilas (WALLACE; WALLACE; ABOUZAMZAM, 1986), concordando com os dados encontrados de GF nesse estudo entre a camada superficial P1 (menor concentração de  $\text{Na}^+$ ) e a subsuperficial P2 (maior concentração de  $\text{Na}^+$ ).

Na literatura, destaca-se a ocorrência da formação de ponte catiônica (hidrogel -  $\text{Ca}^{2+}$  - argila) na presença do hidrogel (LAIRD, 1997). Contudo, deve-se considerar que cátions em excesso também podem competir pela adsorção nos sítios das argilas carregadas negativamente, impedindo o processo de floculação (BEM-HUR et al., 1992; ALY; LETEY, 1988). Esse fato pode explicar a ausência de eficiência do gel na floculação da camada subsuperficial P2 (elevada concentração de íon  $\text{Na}^+$ ).

A aproximação entre as partículas, devido ao processo de intumescimento e secagem do gel e a formação de pontes interpartículas, também são fatores que podem contribuir para o processo de floculação (ATTOU; BRUAND, 1998; LEVY; AGASSI, 1995). Os flóculos gerados por polímeros podem ser mais fortes do que aqueles produzidos por outros meios de aglomeração (GREGORY; BARANY, 2011). No entanto, em condições de sodicidade, como já mencionado, ocorre menor capacidade de intumescimento do gel.

Em determinações de como as propriedades físicas e químicas do solo afetam a floculação por polímeros hidrogel de acrilamida, verificou-se que a textura, mineralogia e pH do solo são fatores que podem afetar a eficiência desse material como agente floculador (MCLAUGHLIN; BARTHOLOMEW, 2007; WILKINSON et al., 2018; MITTAL et al., 2014), o que apoia a explicação para a diferença dos resultados entre as camadas avaliadas, pois apesar de constituírem camadas de um mesmo solo possuem diferenças entre esses atributos.

### 8.2.4 Estabilidade dos agregados

A análise de variância (ANAVA) para a estabilidade dos agregados em resposta aos tempos de incubação do solo (T) e camadas (P) revelou diferenças significativas ( $p < 0,01$ ) para todas as classes de diâmetro em relação ao fator camada. Em relação ao fator tempo, não houve diferença significativa para as classes III e IV. Para a interação dos fatores, houve diferença significativa apenas para as classes I e II (Tabela 7).

Tabela 7. Resumo da análise de variância (ANAVA) para o parâmetro estabilidade de agregados do substrato.

Fontes de variação	GL	VALORES F				
		Classe I (> 4,76mm)	Classe II (4,76 - 2,0 mm)	Classe III (2,0 - 1,0 mm)	Classe IV (1,0 - 0,5 mm)	Classe V (0,5 - 0,25 mm)
Tempo (T)	2	96,23 **	9,85**	0,44 <sup>NS</sup>	4,79 <sup>NS</sup>	7,35**
Camada (P)	1	125,2 **	14,20**	89,4**	64,82**	67,23**
T*P	2	22,60 **	32,92**	1,52 <sup>NS</sup>	1,79 <sup>NS</sup>	2,66 <sup>NS</sup>
Total	29	-	-	-	-	-
C.V (%)	-	11,30	18,7	13,85	17,49	13,55

C.V(%); coeficiente de variação; G.L: Grau de liberdade; \*\* significativo a 1% pelo teste F; NS = não significativo a 1% pelo teste de F.

Na camada superficial P1, houve aumento significativo de agregados estáveis da classe I (> 4,76 mm), sendo a maior média encontrada em T12 (73,93%). Houve redução da percentagem de agregados da classe II (4,76 – 2 mm), sendo essa redução associada a incrementos à classe de maior diâmetro. Não houve diferença significativa para as classes III (2,0 – 1,0 mm), IV (1,0 – 0,5 mm) e V (0,5 – 0,25 mm) em função do tempo. Esses resultados corroboram com o verificado em Neossolo Flúvico salino e sódico por Miranda (2009).

Na camada subsuperficial P2, o comportamento foi semelhante, houve aumento significativo de agregados estáveis nas classes de maior tamanho, ou seja, a classe I, com a maior média obtida em T12 (55,99%), porém não houve diferença significativa nas demais classes de agregados.

Comparando as médias entre as camadas, houve maior percentagem de agregados de maior tamanho na camada P1, enquanto na camada P2 foi maior a presença de agregados de menor tamanho. Diante disso, as médias foram significativamente maiores em P1 para a classe I, e em P2 nas classes II, III, IV e V (Tabela 8).

Tabela 8. Comparação das médias de estabilidade dos agregados do solo entre as camadas I e II e os diferentes períodos de incubação com hidrogel.

Classe de agregados	Camada I (0 - 0,18 m)			Camada II (0,45 - 0,85 m)		
	Tempo de incubação com Hidrogel					
	T4	T8	T12	T4	T8	T12
	----- % -----					
Classe I (>4,76 mm)	33,38Ab	66,90Aa	73,93Aa	23,78Ab	23,48Bb	55,99Ba
Classe II (4,76 - 2,0 mm)	14,58Aa	9,77Ab	4,64Bc	5,85Ba	7,07Aa	8,76Aa
Classe III (2,0 - 1,0 mm)	6,36Ba	5,20Ba	6,55Ba	10,11Aa	10,75Aa	10,48Aa
Classe IV (1,0 - 0,5 mm)	6,67Ba	4,50Ba	4,67Ba	10,23Aa	10,18Aa	8,22Aa
Classe V (0,5 - 0,25 mm)	3,85Ba	3,32Ba	3,17Ba	5,99Aa	5,98Aa	4,45Aa

\*letras minúsculas na mesma linha comparam médias em uma mesma camada; letras maiúsculas na mesma linha comparam médias entre as camadas. \*Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 1% de significância.

A maior estabilidade dos agregados > 4,76 mm, demonstrada nesse estudo, teoricamente caracteriza o hidrogel como eficiente para promover maior estabilidade dos macroagregados, tornando evidente o seu potencial para melhoria da agregação em camada superficial de solo degradado por sódio.

Na tentativa de compreender o impacto da dinâmica da umidade do solo nas propriedades de intumescimento de um hidrogel incorporado e suas implicações nas propriedades estruturais do solo, Buchman, Bentz e Scumnn (2015) verificaram, avaliando por relaxometria, que a estabilidade estrutural do solo aumentou claramente quando associado ao hidrogel. Para os autores, o processo de dilatação e contração no hidrogel explicam a natureza histórica e dependente do tempo para a estabilização estrutural.

As estruturas de hidrogel podem aumentar a estabilidade estrutural de solo sódico pela formação de uma rede polimérica flexível que interconecta as partículas minerais de forma eficaz. Porém esse efeito é dependente da viscosidade do hidrogel, do tempo de incubação, da textura do solo, de práticas de manejo agrícola e da presença de argila (BUCHMANN; SCHAUMANN, 2016; ABEND LAGALY, 2000; RENGASAMY; OLSSON, 1991).

Contudo, deve-se destacar que a maior estabilização de agregados da classe I na camada superficial P1, também pode ter sido influenciada pela maior presença de fatores que contribuem para a cimentação dos agregados, como a matéria orgânica. Para Salton et al., (2008), o que confere maior estabilidade aos agregados são os agentes cimentantes ligados a

aspectos biológicos, como a matéria orgânica. Para Barzergar et al., (1997) a matéria orgânica tem papel tão grande na agregação em solos sódicos quanto em solos não sódicos.

Estudos reportam que a presença de macroagregados é, de modo geral, associada positivamente com os conteúdos de matéria orgânica do solo (ANDERS et al., 2010; RAHIMI; PAZIRA; TAJIK, 2000) e que os microagregados são mantidos unidos por materiais orgânicos persistentes e substâncias poliméricas que, associados a outros materiais, formam e estabilizam os macroagregados (COSTA JÚNIOR et al., 2012).

No entanto, o efeito prejudicial do sódio trocável na estrutura do solo já foi observado por muitos pesquisadores (MELO et al., 2008; VASCONCELOS et al., 2013; ALBUQUERQUE et al., 2018; MIRANDA et al., 2017). Esses efeitos indicam que o excesso de  $\text{Na}^+$  é um dos fatores dominantes na redução da estabilidade dos agregados, a qual apresenta valores praticamente nulos (KEMPER; KOCK, 1966; PAULA et al., 1892). Além disso, a alta Relação de Adsorção de Sódio (RAS) já foi diretamente relacionada com a formação de agregados menores (LEBRON; SUAREZ; YOUSHIDA, 2002).

Apesar disso, na camada subsuperficial P2 houve aumento da presença de agregados de maior tamanho na última avaliação, como mencionado anteriormente, mesmo sendo uma camada subsuperficial onde, teoricamente, possui menor teor de matéria orgânica. Contudo, esse comportamento foi verificado apenas a partir dos 12 meses de incubação e com média estatisticamente inferior à camada P1.

Embora alguns trabalhos indiquem o papel benéfico do hidrogel na formação e estabilidade dos agregados do solo, poucos são os estudos que apresentam noções que avaliam o efeito do tempo nessas modificações e, além disso, em solos afetados por sais. Levando em consideração os resultados do presente estudo para a camada subsuperficial P2, que indicam não haver modificação na DS em função do tempo de incubação (até os 12 meses), sugere-se que não houve efeito benéfico do hidrogel na agregação para a respectiva camada. Esse fato corrobora a ideia, já mencionada, de que o  $\text{Na}^+$  em excesso prejudica o efeito do hidrogel como melhorador das propriedades do solo.

### **8.2.5 Diâmetro médio ponderado (DMP) e geométrico (DMG) dos agregados**

A análise de variância (ANAVA) para os valores de diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) em resposta aos tempos de incubação do solo (T) e camadas (P) revelou diferenças significativas ( $p < 0,01$ ) para os fatores isoladamente e para a interação entre os fatores (T\*P) (Tabela 9).

Tabela 9. Resumo da análise de variância (ANAVA) para os parâmetros de diâmetro médio ponderado e diâmetro médio geométrico.

VALORES F			
Fonte de variação	G.L	DMP	DMG
Tempo (T)	2	128,67**	116,03**
Camada (P)	1	168,11**	412,32**
T*P	2	31,78**	35,34**
Total	29	-	-
C.V (%)	-	8,95	4,81

C.V(%); coeficiente de variação; G.L: Grau de liberdade; \*\* significativo a 1% pelo teste F; NS = não significativo a 1% pelo teste de F.

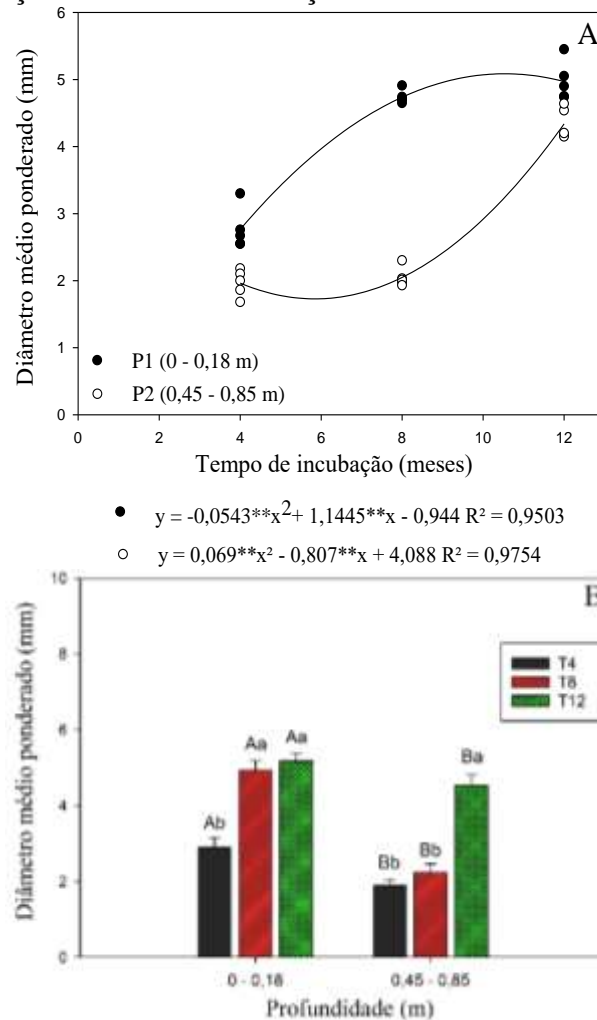
O DMP ajustou-se ao modelo quadrático da regressão em ambas as camadas avaliadas nesse estudo.

Na camada superficial P1, o valor máximo do diâmetro médio ponderado (5,05mm) foi obtido aos 10,6 meses, sendo 57,23% maior em relação ao valor obtido no início das avaliações (T4). Não houve diferença significativa entre as médias de DMP entre T8 (4,737mm) e T12 (4,970 mm). A menor média de DMP (2,76 mm) foi obtida na primeira avaliação (T4), diferindo significativamente das demais (Figura 21B).

Na camada subsuperficial P2, o valor máximo da média (4,3 mm) foi obtido aos 12 meses de incubação, resultando em um aumento de 54,51% em relação ao obtido em T4 (Figura 21A). Não houve diferença significativa entre as médias encontradas em T4 (1,964 mm) e T8 (2,048 mm). No entanto, houve aumento significativo aos 12 meses de incubação, resultando em média de DMP igual a 4,34 mm.

O comparativo das médias entre as camadas mostrou que o DMP foi significativamente maior na P1 em todos os períodos de avaliação (Figura 21B).

Figura 21. Diâmetro médio ponderado (mm): (A) Em função do tempo de incubação com o hidrogel e (B) Comparação das médias em função dos diferentes nas camadas avaliadas.



Letras minúsculas comparam médias em uma mesma camada; letras maiúsculas comparam médias entre as camadas. \*Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 1% de significância. As barras representam o erro padrão das médias.

Os valores de DMP encontradas na camada superficial e subsuperficial em todos os períodos de avaliação estão acima de 0,5 mm, considerado o limite de tamanho de agregado mais resistente a dispersão (KIEHL, 1979). Valores semelhantes foram encontrados por Melo et al., (2009) após aplicação de hidrogel em NEOSSOLO FLÚVICO Salino sódico. Segundo os autores, houve aumento de, aproximadamente, 70% quando comparado os valores de DMP do solo sem hidrogel e após a aplicação do polímero.

Teoricamente, o DMP pode refletir a resistência do solo à erosão, pois quanto maior for o agregado, maiores serão os valores de DMP e os espaços porosos entre os agregados, aumentando a infiltração e diminuindo a susceptibilidade do solo a erosão (CASTRO FILHO; MUZILLI; PODANOSCHI, 1998). Como houve aumento da predominância de agregados da

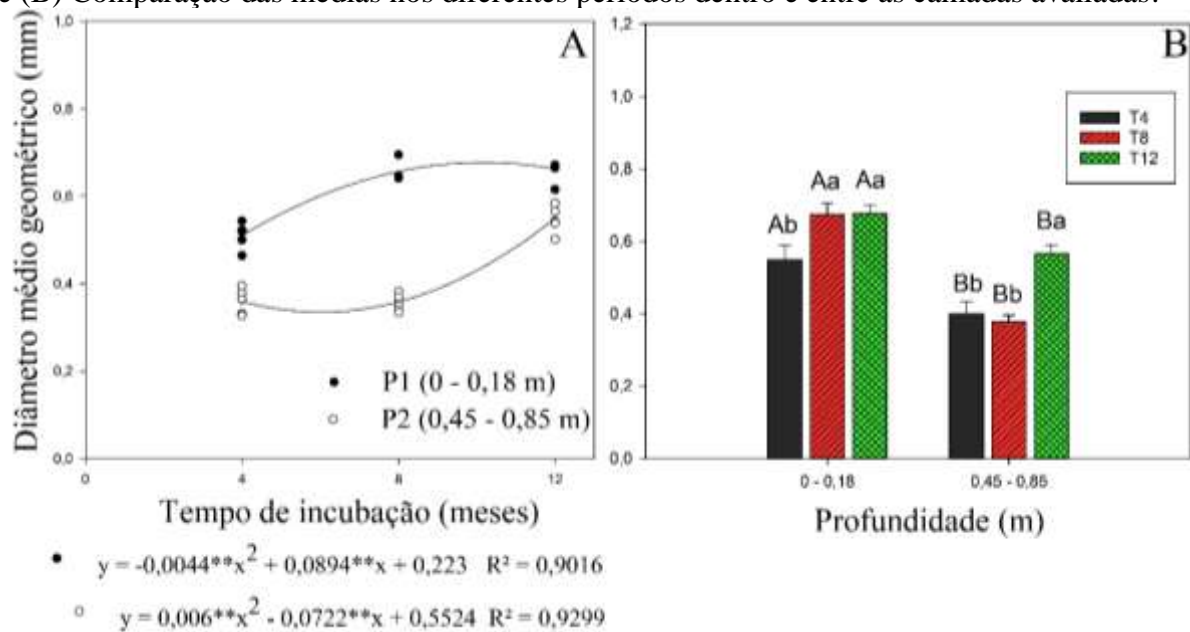
classe condizente ao tamanho  $> 4,76$  mm, era esperado que os valores de DMP aumentassem em função do tempo de incubação em ambas as camadas.

Prevedello e Balena (2000), em estudo com doses de hidrogel em solo não salino, relatam que à medida que as doses aplicadas do gel aumentavam, houve maior armazenagem de água no solo e aumento significativo do DMP dos agregados. Para os autores, o aumento no DMP foi correspondente a 4 vezes com a aplicação do hidrogel no solo.

O DMG melhor ajustou-se ao modelo quadrático da regressão, em ambas as camadas (Figura 22A). De acordo com o comportamento da curva de regressão, na camada superficial P1, a maior média de DMP (0,66 mm) foi encontrada aos 10,44 meses, correspondendo um aumento de 22,9% em relação ao valor obtido na primeira avaliação (T4).

Na camada subsuperficial P2, o valor máximo (0,55 mm) foi obtido aos 12 meses de incubação, resultando em um aumento de 54,51% em relação ao obtido na primeira avaliação (T4) (Figura 22A).

Figura 22. Diâmetro médio geométrico: (A) Em relação ao tempo de incubação com o hidrogel e (B) Comparação das médias nos diferentes períodos dentro e entre as camadas avaliadas.



Letras minúsculas comparam médias em uma mesma camada; letras maiúsculas comparam médias entre as camadas. \*Médias seguidas da mesma letra não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 1% de significância. As barras representam o erro padrão das médias.

Na comparação entre as médias da camada superficial P1, não houve diferença significativa entre as médias de DMG entre T8 (0,656 mm) e T12 (0,662 mm), sendo que a menor média de DMG (0,5102 mm) foi obtida na primeira avaliação (T4).

Na camada subsuperficial P2, não houve diferença significativa entre as médias de T4 (0,359mm) e T8 (0,357 mm). No entanto, houve aumento significativo em T12 (0,55mm) sendo estatisticamente superior as médias dos demais períodos de avaliação (Figura 22B).

O comparativo das médias entre as camadas mostra que o DMG, assim como o DMP, foi significativamente maior na camada superficial P1 em todos os períodos de avaliação (Figura 22B). Comportamento semelhante em relação a esses parâmetros são relatados em estudos com solos semelhantes (MISHRA et al., 2014; DODD et al., 2013).

Poucos são os estudos que relatam resultados em relação a atuação de hidrogel em parâmetros de DMG e DMP. Para Pontes Filho (2016), não houve diferença significativa dos valores de DMG em função das doses do polímero. No entanto, o hidrogel melhorou a estabilidade dos agregados, sendo mais evidente em agregados de maior tamanho, que são considerados indicativos de boa estrutura para a maioria dos propósitos agrônômicos, concordando com resultados encontrados nesse estudo.

### **8.3 Impactos sociais e econômicos da pesquisa**

A remediação de áreas degradadas é essencial para a sustentabilidade dos ecossistemas. No entanto, há a necessidade de recursos para a realização das práticas de recuperação dessas áreas, de um modo geral. Regiões que não possuem condições financeiras para remediar suas áreas degradadas têm seus recursos naturais comprometidos.

O impacto econômico da salinização dos solos não é fácil de avaliar, devido sua relação não linear entre salinização e produtividade (PEDROTTI et al., 2015). No entanto, sabe-se que é um sério tipo de degradação para o contexto ambiental de uma determinada região. Além de que, as técnicas de recuperação são, na maioria das vezes, inacessíveis aos produtores - devido aos elevados custos - resultando quase sempre no abandono de lotes em perímetros irrigados e, conseqüentemente, causando prejuízos à economia e sociedade local.

O uso do hidrogel além de aumentar a retenção da umidade do solo, sendo uma alternativa viável para regiões áridas e semiáridas, pode contribuir como uma alternativa para reduzir os efeitos dos sais para as plantas, gerando benefícios econômicos e sociais para a agricultura. Isso é fato, pois o aumento da umidade do solo auxilia na diluição dos sais em excesso e melhoria da absorção de água pelas raízes das plantas, sem a necessidade de elevados custos para a implementação de um sistema de drenagem, por exemplo.

Nos resultados desse estudo, de acordo com os dados supracitados, o gel não causou resultados significativos em alguns parâmetros para o solo em questão. No entanto, devido seus



diversos benefícios aos cultivos, já comprovados em pesquisas e mencionados no item 4 desse trabalho, sugere-se que seja avaliado seu uso com outra técnica de remediação.

Não é demais destacar que esse trabalho se configura como um dos pioneiros na avaliação do uso de hidrogel superabsorvente na remediação de solos degradados por sódio. Os resultados iniciais foram satisfatórios, elucidando algumas questões, porém abrindo um leque de outras dúvidas e levantamento de hipóteses. Isso é fundamental para o desenvolvimento da ciência e elaboração de demais estudos, objetivando-se aproveitar as potencialidades desse material da melhor maneira possível para utilização de sua máxima eficiência, em prol da atividade agrícola e sustentabilidade dos agroecossistemas.

## 9 CONCLUSÕES

1 – O hidrogel poli(acrilamida-co-acrilato) é capaz de absorver o íon  $\text{Na}^+$  presente em excesso no solo, logo após incorporação, porém transcorrendo o tempo de incubação, perde a capacidade de intumescimento, influenciando na absorção do  $\text{Na}^+$ .

2 – O hidrogel poli(acrilamida-co-acrilato) aumenta a macroporosidade, apesar de reduzir a porosidade total e a microporosidade do solo degradado por excesso de sódio. Além disso, não é capaz de influenciar na redução da densidade do solo e no aumento da condutividade hidráulica do solo saturado em camada superficial e subsuperficial.

3- O hidrogel poli(acrilamida-co-acrilato) aumenta a estabilidade de agregados de maior tamanho ( $> 4,76$  mm). No entanto, a partir dos resultados desse estudo, não é possível diferenciar a atuação do gel e da matéria orgânica na estabilização dos agregados do solo, em especial, na camada superficial.

4 – Sugere-se a realização de experimentos aliando o polímero com outra técnica de remediação e verificação das potencialidades em combinações com o polímero para redução dos efeitos do  $\text{Na}^+$  em atributos do solo e para as plantas.

## REFERÊNCIAS

- ABD EL-REHIM, H. A. A.; HEGAZY, E. A.; ABD EL-MOHDY, H. L.; Radiation synthesis of hydrogels to enhance sandy soils water retention and increase plant performance. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, v. 93, n.3, p.1360 – 1371, 2004.
- ABDEEN, Z. U.; SAEED, R.; Soil desalination via poly (vinyl alcohol) Borate hydrogel. **Theoretical Foundation of Chemical Engineering**, [S. l.], v. 53, n.6, p. 1094 – 1098, 2019.
- ABEDI-KOUPA, J.; SOHRAB, F.; SWARBRICK, G.; Evaluation of Hydrogel Application on Soil Water Retention Characteristics. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 31, n. 2, p. 317 – 331, 2008.
- ABEND, S.; LAGALY, G.; Sol-gel transitions of sodium montmorillonite dispersion. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 16, n. 3-4, p. 201 – 227, 2000.
- ABOBATTA, W.; Impact of hydrogel polymer in agriculture sector. **Advances in agriculture and environmental science**, [S. l.], v.1, n.2, p.59 – 64, 2018.
- ABDALLAH, A.; The effect of hydrogel particle size on water retention properties and availability under water stress. **International Soil and Water Conservation Research**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 275 – 285, 2019.
- AGABA, H.; ORIKIRIZA, L. J. B.; ESEGU, J. F. O.; OBUA, J.; KABASA, J. D.; HUTTERMANN, A.; Effect of Hydrogel Amendment to Different Soils on Plant Available water and Survival of Trees under Drought Conditions. **Clean Soil Air Water**, Wheinheim, v. 38, n.4, p. 328 – 335, 2010.
- AHMED, E. M.; Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A Review. **Journal of advanced research**. Cairo, v.6, p.105-121, 2015.
- AHMED, B. A.; MORITANI, I. S.; Effect of saline water irrigation and manure application on the available water. **Agricultural Water Management**. Amsterdam, v.97, n.1, p.165-170, 2010.
- AKKAS, P.; SARI, M.; SEN, M.; GUVEN, O; The effect of external stimuli on the Bovine Serum Albumin adsorption capacity of poly (acrylamide/maleic acid) hydrogels prepared by gamma rays. **Radiation Physics and Chemistry**, Oxfordshire, v.55, n.5-6, p. 717 – 721, 1999.
- AL - DARBY, A. M.; The hydraulic properties of a sandy soil treated with gel-forming soil conditioner. **Soil Technology**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 15-28, 1996.
- ALBUQUERQUE, G. H. S.; **Hidrogel de acrilamida e acrilato para estratégias de recuperação de um Argissolo em processo de degradação**. 2019. 124f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2019.
- ALBUQUERQUE, A. S.; FONSECA, N. C.; SANTOS, R. V.; MEDEIROS, W. P.; Atributos químicos em solo salino-sódico e efeito do ácido sulfúrico no crescimento da *Prosopis*

*juliflora*. **Revista de Ciência Agrárias**, Lisboa, v. 61, p. 1-8, 2018.

ALFARO, M.A.; JARVIS, S.C.; GREGORY, P.J.; Factors affecting potassium leaching in different soils. **Soil Use and Management**, Malden, v. 20, p.182-189, 2004.

AL-JABARI, M.; GHYADAH, R. A.; ALOKELY, R.; Recovery of hydrogel from baby diaper wastes and its application for enhancing soil irrigation management. **Journal of Environmental management**, London, v. 239, p. 255 – 261, 2019.

ALKHASHA, A.; AL-OMRAN, A.; ALY, A.; Effects of Biochar and Synthetic Polymer on the Hydro-Physical Properties of Sandy Soils. **Sustainability**, [S. l], v. 10, p.4246, 2018.

ALY, S. M.; LETEY, J.; Polymer and Water Quality Effects on Flocculation of Montmorillonite. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, n.5, p. 1453 – 1468, 1988.

ANDERSEN, A.; IBSEN, C. J. S.; BIRKEDAL, H.; Influence of metal Ions on the Melting Temperature, Modulus and Gelation Time of Gelatin Gels: Specific Ions Effects on Hydrogel Properties. **Journal of Physical Chemistry B**, Washington, v. 122, n. 43, p. 10062-10067, 2018.

ANDERS, M. M.; BECK, P. A.; WATKINS, B. K.; GUNTER, S. A.; LUSBY, K. S.; HUBBELL, D. S. Soil aggregates and their associated carbon and nitrogen content in winter annual pastures. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.74, p. 1339-1347, 2010.

ANDRADE, L. N. V. ; CRUCIANI, D. E.; Condutividade hidráulica no processo de eluição em um solo Bruno-não-cálcico. **Scientia Agricola**. Piracicaba. v. 53, n. 1, 43-50p. 1996.

ANDRY, H.; YAMAMOTO, I.; IRIE, T.; MORITAN, S.; INOVE, M.; FUJIYAMA, H.; Water retention, hydraulic conductivity of hydrophilic polymers in sandy soil as affected by temperature and water quality. **Journal of Hidrology**, Amsterdam, v. 373, n. 1-2, p. 177 – 183, 2009.

ANSETH, K. S.; BOWMAN, C. N.; BRANNON PEPPAS, L. B.; Mechanical properties of hydrogel and their experimental determination. **Biomaterials**, Oxford, v. 17, n. 17, p. 1647 – 1657, 1996.

AOUADA, F. A.; MATTOSO, L. H. C. **Hidrogéis biodegradáveis: Uma opção na aplicação como veículos carreadores de sistemas de liberação controlada de pesticidas**. (Boletim de Pesquisa). v. 3. São Carlos: EMBRAPA. 2009, 32p.

AOUADA, F. A.; MOURA, M. R.; MENEZES, E. A.; NOGUEIRA, A. R. A.; MATTOSO, L. H.C.; Síntese de hidrogéis e cinética de liberação de amônio e potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1643-1649, 2008.

AOUADA, F. A.; MUNIZ, E. C.; VAZ, C. M. P.; MATTOSO, L. H. C.; Correlação entre parâmetros da cinética de intumescimento com características estruturais e hidrofílicas de hidrogéis de poli(acrilamida e metilcelulose), **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 6, p. 1482 – 1490, 2009.

AQUINO, A. J. S.; LACERDA, C. F.; BEZERRA, M. A.; GOMES FILHO, E.; COSTA, R. N. T. Crescimento, partição de matéria seca e retenção de Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> e Cl<sup>-</sup> em dois genótipos de sorgo irrigados com águas salinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 961-971, 2007.

ARAÚJO, A. P. B.; COSTA, R. N. T.; LACERDA, C. F.; GHEYI, H. R.; Análise econômica de recuperação de um solo sódico no Perímetro irrigado Curu-Pentecoste, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n.4, p. 377 – 382, 2011.

ARAÚJO, D. R.; MION, R. L.; SOMBRA, W. A.; ANDRADE, R. R.; AMORIM, M. Q.; Variabilidade espacial de atributos físicos em solo submetido a diferentes tipos de uso de manejo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.27, n.2, p.101-115, 2014.

ASGHARI, S.; **Improving physical quality of a clay loam soil selected from semiarid region using polyacrylamide**. In: 1st International and 5th National Conference on Organic vs. Conventional Agriculture, 2017. Disponível em: <https://repository.uma.ac.ir/id/eprint/3833/1/E-00107-AD.pdf>. Acesso em 06.nov.2019.

ASHRAF, M.; AFZAL, M.; AHMAD, R.; ALI, S.; SHAHZAD, S. M.; AZIZ, A.; ALI, L.; Growth and yield components of wheat genotypes as influenced by potassium and farmyard manure on a saline sodic soil. **Soil and Environment**, Faisalabad, v. 30, n.2, p. 115 – 121, 2011.

ATTOU, F.; BRUAND, A. Experimental study of fragipans formation in soils: Role of clay dispersion and wetting-drying cycles. **Earth and Planetary Science**, Amsterdam, v. 326, n. 8, p. 545-552, 1998.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W.; **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, n. 29, 1991, 218p.

BAI, W.; ZHANG, H.; LIU, B.; WU, Y.; SONG, J.; Effects of superabsorbent polymers on the physical and chemical properties of soil following different wetting and drying cycles. **Soil Use and Management**, Malden, v. 26, n.3, p. 253 – 260, 2010.

BAJPAI, S. K.; SHUKLA, S. K.; BHANU, S.; KANKANE, S. Responsive polymers in controlled drug delivery. **Progress in polymer science**, Oxfordshire, v.33, n.11, p.1088-1118, 2008.

BANEDJSCHAFIE, S.; DURNER, W.; Water retention properties of a sandy soil with superabsorbent polymers as affected by aging and water quality. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 178, n.5, p. 798 – 806, 2015.

BAO, Y.; MA, J.; LI, N.; Synthesis and swelling behaviors of sodium carboxymethyl cellulose-g-poly (AA-co-AM-co-AMPS) MMT superabsorbent hydrogel. **Carbohydrate Polymers**, Oxfordshire, v.82, n.1, p. 76 – 82, 2011.

BARZEGAR, A. R.; NELSON, P. N.; OADES, J. M.; RENGASAMY, P. Organic matter, sodicity and clay type: Influence on soil aggregation. **Journal Soil Science Society of America**, Madison, v.61, p.1131-1137, 1997.

BEN-HUR, M. Using synthetic polymers as soil conditioners to control runoff and soil loss in arid and semiarid regions: A review. **Soil Research**, Melbourne, v. 44, n. 3, p. 191–204, 2006.

BEN-HUR, M.; MALIK, M.; LETEY, J.; MINGELGRIN, U.; Adsorption of polymers on clays as affected by clay charge and structure, polymer properties and water quality. **Soil Science**, Philadelphia, v. 153, n. 5, p 349-356, 1992.

BERNARDO, S.; **Manual de irrigação**. 6ed. Viçosa: Imprensa Universitária – UFV. 1995. 637p.

BEZERRA, M. N. **Hidrogéis superabsorventes compostos de poli(acrilamida-co-acrilato de potássio) e carbonatos para aplicação agrícola**. 2015. 137 f. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2015.

BHARDWAJ, A. K.; SHAINBERG, I.; GOLDSTEIN, D.; WARRINGTON, D.; LEVY, G. J.; Water Retention and Hydraulic Conductivity of Cross-Linked Polyacrylamides in Sandy Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, n. 2, p. 406 – 412, 2007.

BISWAS, A.; BISWAS, A.; Comprehensive approaches in rehabilitation salt affected soils: a review on Indian perspective. **Open Transactions on Geosciences**, [S. l], v.1, n. 1, p. 13 – 24, 2014.

BLANCO, F. F.; FOLEGATTI, M. V.; Recuperação de um solo salinizado após cultivo em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n.1, p. 76 – 80, 2001.

BO, Z.; RENKUAN, L.; YUNKAI, L.; TAO, G.; PEILING, Y.; JI, F.; WEIMIN, X.; ZHICHAO, Z.; Water-absorption characteristics of organic-inorganic composite superabsorbent polymers and its effect on summer maize root growth. **Journal Applied Polymer Science**, Hoboken, v. 126, n.2, p. 423 – 435, 2012.

BOGARIM, E.P.A.; **Uso de hidrogel no desenvolvimento de espécies nativas, visando aplicações em áreas degradadas**. 2014. 48f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) - Universidade Federal da Grande Dourados. Dourados, MS, 2014.

BOUMA, J. Measuring the conductivity of soil horizons with continuous macropores. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 2, p. 438-441, 1982.

BORTOLIN A.; SERAFIM A. R.; AOUADA F.A.; MATTOSO L. H. C.; RIBEIRO. C.; Macro-and Micronutrient Simultaneous Slow Release from Highly Swellable Nanocomposite Hydrogels. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 64, n. 16, p. 3133-3140, 2016.

BORTOLIN, A.; AOUADA, F. A.; LONGO, E.; MATTOSO, L. H. C.; Investigação do processo de absorção de água de hidrogéis de polissacarídeo: Efeito da carga iônica, presença de sais, concentrações de monômero e polissacarídeo. **Revista Polímeros**, São Carlos, v. 22, n.4, p. 311 – 317, 2012.

BORZACCHIELLO, A.; AMBROSIO, L.; Structure – Property Relationships in hydrogels. In: Barbucci, R.; **Hydrogels: Biological Properties and Applications**. Milano: Springer, 2009, p. 9 - 20.

BOWMAN, D.C.; EVANS, R.Y.; PAUL, J. L.; Fertilizer salts reduce hydration of polyacrylamide hydrogels and affect physical properties of gel-amended container media. **Journal American Society Horticultural Science**, [S. l] v. 115, p. 382-386, 1990.

BRITO, C. W. Q.; RODRIGUES, F. H. A.; FERNANDES, M. V.S.; SILVA, L. R. D.; RICARDO, N. M. P. S.; FEITOSA, J. P. A.; MUNIZ, E .C; Síntese e caracterização de hidrogéis compósitos a partir de copolímeros acrilamida-acrilato e caulim: Efeito da constituição de diferentes caulins do Nordeste brasileiro. **Química Nova**, São Paulo, v. 36, n. 1, p. 40 – 45, 2013.

BUCHMANN, C.; SCHAUMANN, G.E.; Effect of water entrapment by a hydrogel on the microstructural stability of artificial soils with various clay content. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 414, n. 1-2, p. 491-198, 2016.

BUCHMANN, C.; The swelling of interparticulate hydrogels in soil and their contribution to soil structural stability and soil-water interactions, 2018. Disponível em [file:///C:/Users/van\\_o/Downloads/Thesis\\_Buchmann.pdf](file:///C:/Users/van_o/Downloads/Thesis_Buchmann.pdf). Acesso em: 20.fev.2021

BUCHHOLZ F. L.; GRAHAM A. T.; **Modern superabsorbent polymer technology**. 1ed New York: Wiley-VCH, 1998, 304p.

CAJAZEIRA, J. P.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Variabilidade espacial das frações primárias e agregados de um Argissolo no estado do Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 258-267, 2011.

CAVALCANTE, L. F; SANTOS, R.V; HERNANDEZ, F. F. F.; GHEY, H. R.; DIAS, T. J.; NUNES, J. C.; LIMA, G. S.; Recuperação de solos afetados por sais. In: Ghey, H. R. Dias, N. S.; Lacerda, C. F.; Gomes Filho, E; **Manejo da salinidade na Agricultura: Estudos básicos e aplicados**. 2. ed. Fortaleza - CE: INCTSal. 2016. p. 461 - 477.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L.; Estabilidade dos agregados e sua relação como teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.3, p.527-538, 1998.

CHEN, S.; FRITZ, E.; HUTERMANN, A.; ZOMMORODI, M.; WANG, S.; Hydrogel modified uptake of salt ions and calcium in *Populus euphratica* under saline conditions. **Trees**, Berlin, v.18, n. 2. 175 - 183p. 2004.

CHHABRA, R.; **Soil salinity and Water Quality**. 1 ed. New York: CRC Press. 1996. 300p.

COSTA JÚNIOR, C.; PICCOLO, M. C.; SIQUEIRA NETO, M.; CAMARGO, P. B.; CERRI, C. C.; BERNOUZ, M.; Carbono em agregados do solo sob vegetação nativa, pastagem e sistemas agrícolas no bioma Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 4, p.1311 – 1321, 2012.

DAKER, A.; **A água na agricultura: Manual de hidráulica Agrícola**. 7 ed. Rio de Janeiro Freitas Bastos, 1988, 543p.

DALIAKOPOULOS, I. N.; TSANIS, I. K.; KOUTROLES, A.; KOURGIALAS, N. N.; VAROUCHAKIS, A. E.; KARATZAS, G. P.; RITSEMA, C. J.; The threat of soil salinity: A European scale review. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v. 573, p. 727 – 739, 2016.

DEMITRI, C.; SCALERA, F.; MADAGHIELE, M.; SANNINO, A.; MAFFEZZOLI, A.; Potential of cellulose-based superabsorbent hydrogels as water reservoir in agriculture. **International Journal of Polymer Science**, [S. l.], v. 2013, p. 1 – 6, 2013.

DIERICKX, W.R.; The salinity and alkalinity status of arid and semiarid lands. **Land use, Land cover and soil sciences**, [S. l.], v.5, 2015.

DIXON, J. B.; WEED, S. B.; DINAUER, R. C.; **Minerals in soil environments**. 2ed. Madison: Soil Science Society of America. 1989. 1244p.

DODD, K.; GUPPY, C. N.; LOCKWOOD, P. V.; ROCHESTER, I J.; The effect of sodicity on cotton: does soil chemistry or soil physical condition have the greater role? **Crop & Pasture Science**, [S. l.], v. 64, p. 806 – 815, 2013.

DORRAJI, S. S.; GOLCHI, A.; AHMADI, S.; The effects of hydrophilic polymer and soil salinity on corn growth in sandy and loamy soils. **Clean Soil Air Water**, Wheinheim, v.38, n.7, p. 584 – 591, 2010.

DURAN, S.; SOLPAN, D.; GUVEN, O.; Synthesis and characterization of acrylamide-acrylic acid hydrogels and adsorption of some textiles dyes. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B**, [S. l.], v.151, n. 1-4, p. 196 – 199, 1999.

EL – HADY, O. A.; ABO-SEDERA, S. A.; Conditioning effects of composts and acrylamide hydrogels on a sandy calcareous soil. II- Physico-bio-chemical properties of the soil. **International Journal of Agriculture and Biology**, Faisalabad, v. 8, n.6, p. 876 – 884, 2006.

EL-HALAH, A.; LOPEZ - CASQUERO, F.; CONTRERAS, J.; Applications of hydrogels in the adsorption of metallic ions. **Revista Ciência e Ingeniería**, Cauca, v. 39, n.1, p.57 – 70, 2018.

EL-SAYED, H.; EL SAYED, A.; Influence of salinity stress on growth parameters, photosynthetic activity, and cytological studies of Zea mays L. plant using hydrogel polymer. **Agriculture and Biology Journal of North America**, [S. l.], v. 2, n.6, p. 907 – 920, 2011.

EL-SAYED, H.; KIRKWOOD, R. C.; GRAHAM, N. B.; The effects of a hydrogel polymer on the growth of certain horticultural crops under saline conditions. **Journal of Experimental Botany**, Oxfordshire, v.42, n. 240, p. 891 – 899, 1991.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.



ERNANI, P. R.; BAYER, C.; ALMEIDA, J. A.; CASSOL, P. C.; Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p. 393 - 402, 2007

FASSBENDER, H. W.; BORNEMISZA, E.; **Química de suelos com énfasis em suelos de América Latina**. 2 ed. San José: IICA. 1987. 420p.

FERNANDES, A. C. O.; **Hidrogel e retenção de água em dois solos cultivados com feijão-caupi e girassol**. 2016, 53 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2016.

FERREIRA, D. F.; Sisvar: A computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2013.

FERREIRA, P. A.; SILVA, J. B. L.; RUIZ, H.A.; Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semiáridas. In: Ghey, H.R. Dias, N.S.; Lacerda, C.F.; Gomes Filho, E; **Manejo da salinidade na Agricultura: Estudos básicos e aplicados**. 2. ed. Fortaleza - CE: INCTSal. 2016. p. 18 – 34.

FREIRE, M. B. G. S.; FREIRE, F. J.; SOUZA, E. R.; Fitorremediação de solos afetados por sais. In: Ghey, H. R; Dias, N.S.; Lacerda, C.F.; Gomes Filho, E; **Manejo da salinidade na Agricultura: Estudos básicos e aplicados**. 2. ed. Fortaleza - CE: INCTSal. 2016. p. 409 – 501.

FREIRE, M. B. G. S.; RUIZ, H. A.; RIBEIRO, M. R.; FERREIRA, P. A.; ALVAREZ, V. H.; FREIRE, F. J.; Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, 2003.

GARCIA, J. A. F.; MOURA, M. R.; AOUADA, F. A.; Efeito do pH, espécie e concentração iônica na absorção de água de hidrogéis bionanocompósitos constituídos de CMC /PAAm /Laponite RDS. **Revista Química Nova**, São Paulo, v. 43, n.8, 2019.

GONÇALVES, A. D. M. A.; LIBARDI, P. L.; Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.5, p.1174-1184, 2013.

GUILHERME, M. R.; REIS, A. V.; PAULINO, A. T.; FAJARDO, A. R.; MUNIZ, E. C.; TAMBOURGI, E. B.; Superabsorbent hydrogel based on modified polysaccharide for removal of Pb<sup>2+</sup> and Cu<sup>2+</sup> from water with excellent performance. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, v.105, n.5, p. 2903-2909, 2007.

GREGORY, J.; BARANY, S.; Adsorption and flocculation by polymers and polymer mixtures. **Advances in Colloid and Interfaces Science**, [S. l], v. 169, n. 1, p.1–12, 2011.

HAN, Y.; YU, X.; YANG, P.; LI, B.; XU, L.; WANG, C.; Dynamic study on water diffusivity of soil with super-absorbent polymer application. **Environmental Earth Sciences**, New York, v. 69, p. 89–296, 2013.

HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; ALAN, M. M.; BHOWMIK, P.C.; HOSSAIN, M. A.;

PRASAD, M.N.V; OZTURK, M.; FUJITA, M.; Potential use of halophytes to remediate saline soils. **Biomed Research International**, [S. l], v. 8, p. 1 – 12, 2014.

HE, S.; ZHANG, F.; CHENG, S. WANG, W.; Synthesis of sodium acrylate and Acrylamide Copolymer /GO hydrogels and Their Effective Adsorption for Pb<sup>2+</sup> and Cd<sup>2+</sup>. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, Austin, v. 4, n. 7, p. 3948–3959, 2016.

HELALIA, A. M.; EL-ALMIR, S.; SHAWKY, M. E.; Effects of Acryhope and Aquastore polymers on water regime and porosity in sandy soil. **International Agrophysics**, Lublin, v.6 n. 1-2, p. 19–25, 1992.

HOFFMAN, A. S.; Hydrogels for biomedical applications. **Advanced Drug Delivery Reviews**, Amsterdam, v. 64, p. 18-23, 2012.

HOLLIMAN, P. J.; CLARK, J. A.; WILLIAMSON, J. C.; JONES, D. L.; Model and field studies of the degradation of cross-linked polyacrylamide gels used during the revegetation of slate waste. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 336, n. 1-3, p. 13 – 24, 2005.

HOSSAIN, M. S.; Present scenario of global salt affected soils, its management and importance of salinity research. **International Research Journal of Biological Sciences**, Indore, v. 1, n. 1, p. 1 – 3, 2019.

HUSSAIN, Z.; KHATTAK, R. A.; IRSHAD, M.; ENEJI, A. E.; Ameliorative effect of potassium sulphate on the growth and chemical composition of wheat (*Triticum aestivum L.*) in salt – affected soils. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Temuco, v. 12, n.2, p. 401 – 415, 2013.

HUSSIEN. R. A.; DONIA, A. M.; ATIA, A. A.; EL-SEDFY, O. F.; EL-HAMID, A. R. A.; RASHAD, R. T.; Studying some hydro-physical properties of two soils amended with kaolinite-modified cross-linked polyacrylamides. **Catena**, Amsterdam, v. 2, p. 172 – 178, 2012.

HOU, X.; LI, R.; HE, W.; DAI, X.; MA, K. LIANG, Y.; Superabsorbent polymers influence soil physical properties and increase potato tuber yield in a dry-farming region. **Journal of soils and sediments**, Heidelberg, v. 18, p. 816 – 826, 2018.

JAMES E. A.; RICHARDS D. The influence of iron source on the water holding properties of potting media amended with water-absorbing polymers. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v.28, n.3, p. 201-208, 1986.

JAMNONGKAN, T.; KAEWPIROM, S.; Potassium release kinetics and water retention of controlled-release fertilizers based on Chitosan Hydrogels. **Journal of Polymers and the Environment**, New York, v. 18, n.3, p. 413 – 421, 2010.

JESUS, J. M.; DANKO, A. S.; FIUZA, A.; BORGES, M. T.; Comparison of vegetative Bioremediation and Chemical amendments for Non-calcareous Highly saline-sodic soil remediation. **Water, Air and Soil Pollution**, [S. l], v. 229, n. 274, p. 2 – 10, 2018.

JIN, L.; BAI. R.; Mechanisms of lead adsorption on Chitosan/PVA Hydrogel Beads. **Langmuir**, Washington, v. 16, n. 25, p. 9765 – 9770, 2002.

KABATA-PENDIAS, A. & PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2001. 413p.

KARADAG, E.; SARAYDIN, D.; Swelling of superabsorbent Acrylamide/Sodium Acrylate Hydrogels Prepared Using Multifunctional Crosslinkers. **Turkish Journal of Chemistry**, Ankara, v. 26, n.6, p. 863 – 875, 2002.

KALEV, S. D.; TOOR, G. S.; The composition of soils and sediments. In: Torok, B.; Dransfield, T.; **Green Chemistry: An Inclusive Approach**. Boston: University of Massachusetts Boston. 2018., p. 339 – 357.

KEMPER, W. D.; CHEPIL, W. S. Size distribution of aggregates. In: Black, C. (ed); **Methods of soil analysis, Part I: Physical and mineralogical properties, including the statistics of measurement and sampling**. Madison: American Society of Agronomy, 1965, p. 499-510.

KEMPER, W. D.; KOCH, E. J.; **Aggregate stability of soils from Western United States and Canada**. Washington: USDA, 1966, 57p.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: Klute, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1986, p.425-442.

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. Piracicaba: Ceres, 1979. 264 p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L.; Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 26, n.4, p. 857-867, 2002.

KOVDA, V. A.; YARON, B.; SHALHEVET, Y.; Quality of irrigation water. In: Kouda, V. A.; Berg, C.; Hang, R. M. (eds); **International source book on irrigation, dranaige and salinity**. London: Hutchinson / FAO /UNESCO, 1973, p. 177-205.

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

LEBRON, I.; SUAREZ, D. L.; YOSHIDA, T.; Gypsum effect on the Aggregate Size and Geometry of Three Sodic Soils under Reclamation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, n. 1, p. 93 – 98, 2002.

LEITE, E. M.; CAVALCANTE, L. F.; DINIZ, A. A.; SANTO, R. V.; ALVES, G. S.; CAVALCANTE, I. H. L.; Correção da sodicidade de dois solos irrigados em reposta à aplicação de gesso agrícola. **Revista Irriga**, Botucatu, v. 12, n.2, p. 168 – 176, 2007.

LENTZ, R. D.; Polyacrylamide and biopolymer effects on flocculation, aggregate stability, and water seepage in a silt loam. **Geoderma**, Amsterdam, v. 241 – 242, p. 289 – 294, 2015.

LEVY, G. J.; AGASSI, M. Polymer molecular weight and degree of drying effects on infiltration and erosion of three different soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 33, n. 6, p. 1007-1018, 1995.

LEVY, G. J.; SHAINBERG, I.; Sodic Soils. In: Hillel, D.; **Encyclopedia of soils in the Environment**, Massachusetts: Academic Press, 2005, p.504 – 513.

LI, X.; HE, J.; HUGHES, J. M.; LIU, Y.; ZHENG, Y.; Effects of superabsorbent polymers on a soil-wheat (*Triticum aestivum* L.) system in the field. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 73, p. 58 – 63, 2014.

LIAO, R.; WU, W.; REN, S.; YANG, P.; Effects of superabsorbent polymers on the hydraulic parameters and water retention properties of soil. **Journal of Nanomaterials**, New York, v. 2016, n.9, p. 1 -11, 2016.

LOPES, C. M.; LOBO, J. M. S.; COSTA, P.; Formas farmacêuticas de liberação modificada: polímeros hidrofílicos. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**, São Paulo, v. 41, n.2, p. 143 – 154, 2005.

MACHADO, R. M. A.; SERRALHEIRO, R. P.; Soil Salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. **Saudi Journal of Biology Science**, [S. l], v. 22, n. 2, p. 123 – 131, 2015.

MAGALHÃES, A. S. G.; **Síntese e caracterização de hidrogéis superabsorventes à base de acrilamida e acrilato de sódio**. 2009. 206p. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2009.

MANN, E.; RUTTER, A.; ZEEB, B.; Evaluating the efficacy of *Atriplex* spp. in the phytoextraction of road salt (NaCl) from contaminated soil. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 265, 2020.

MCLAUGHLIN, R. A.; BARTHOLOMEW, N.; Soil factors influencing Suspended Sediment Flocculation by Polyacrylamide. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, n.2, p. 537 – 544, 2007.

MELO, D., V., M.; Uso de polímero na estabilidade de agregados de um Neossolo Flúvico do Sertão de Pernambuco. In: II Semana Nacional de Ciência e Tecnologia. 2009, Recife – PE. **Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Federal Rural de Pernambuco** Pernambuco: UFRPE, 2009.

MELO, R. M.; BARROS, M. F. C.; SANTOS, P. M.; ROLIM, M. M. Correção de solos salino-sódicos pela aplicação de gesso mineral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v.12, n.4. 376–380p, 2008.

MENDONÇA, T.M; URBANO, V.R.; PERES, J.G.; SOUZA, C.F.; Hidrogel como alternativa no aumento da capacidade de armazenamento de água no solo. **Water Resources and Irrigation Management**, Cruz das Almas, v.2, n. 2, p.87-92, 2013.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O.; A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.3, p.963-969, 2004.

MI, PENG, JU, X-J. J.; WU, H-G.; MA, J.; CHU, L-Y.; A novel stimuli-responsive hydrogel for K<sup>+</sup> induced controlled-release. **Polymer**, Oxfordshire, v. 51, n.7, p. 1648 – 1653, 2010.

MILANI, P.; FRANÇA, D.; BALIEIRO, A. G.; FAEZ, R.; Polymers and its applications in agriculture. **Polímeros**, São Carlos, v. 27, n. 3, p. 256 – 266, 2017.

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

MIRANDA, M. F.; **Atributos físicos e químicos após incubação com ácidos húmicos e esteárico em Neossolos Flúvicos**. 2009. 81p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa- MG, 2009.

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**, [S. l], v. 64, n. 9, p. 1207 – 1221, 2017.

MIRANDA, M. F. S; PESSOA, L. G. M.; FREIRE, M. B. G. S.; Correção de solo salino-sódico com soluções de cloreto de cálcio cultivado com sorgo Sudanense. **Revista Caatinga**, Mossoró. v.21, n.5, p. 18-25, 2008.

MISHRA, V. K.; NAYAK, A. K.; SINGH, C. S.; JHA, S. K.; TRIPATHI, R.; SHAHID, M.; RAJA, R.; SHARMA, D. K.; Changes in soil aggregate-associated organic Carbon and Nitrogen after Ten Years Under different land-use and Soil-Management systems in Indo-Gangetic Sodic Soil. **Communications in soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 45, n. 10, p. 1293-1304, 2014,

MITTAL, H.; JINDAL, R.; KAITH, B. S.; MAITY, A.; RAY, S.S. Synthesis and flocculation properties of gum ghatti and poly(acrylamide-co-acrylonitrile) based biodegradable hydrogels. **Carbohydrate Polymers**, Oxfordshire, v. 114, p. 321 – 329, 2014.

MOHAWESH, O.; DURNER, W.; Effects of Bentonite, Hydrogel and Biochar Amendments on Soil Hydraulic Properties from Saturation to Oven Dryness. **Pedosphere**, Pequim, v. 29, n. 5, p. 598-607, 2019.

MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G Aproveitamento Sustentável de Aquíferos Aluviais no Semiárido. In: Cabral, J. J. S. P.; Ferreira, J. P. L.; Montenegro, S. M. G. L; Costa, W. D.; **Água Subterrânea: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento**, Recife: Editora Universitária da Universidade Federal do Pernambuco, 2004, p.44 – 102.

MONTESANO, F. F.; PARENTE, A.; SANTAMARIA, P.; SANNINO, A.; SERIO, F.; Biodegradable superabsorbent hydrogel increases water retention properties of growing media and plant growth. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, [S. l], v.4, p. 451-458, 2015.

MOREIRA, V. O. G.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; ARAGÃO, T. C.; Crescimento e Fotossíntese do milho cultivado sob estresse salino com esterco e polímero superabsorvente. **Revista Irriga**, Botucatu, v. 25, n.3, p. 603 – 616, 2020.

MOTA, F. O. B.; OLIVEIRA, J. B.; Mineralogia dos solos com excesso de sódio no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.4, p. 799 – 806, 1999.

NASCIMENTO, A.F.; FURQUIM, S.A.C.; COUTO, E. G.; BEITIGO, R.M.; OLIVEIRA, JÚNIOR, J.C.; COUTO, E.G.; VIDAL – TORRATO. P.; Pedogenesis in a Pleistocene fluvial system of the Northern Pantanal – Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v. 255, p. 58 – 72, 2015.

NARJARY, B.; AGGARWAL, B; SINGH, A.; CHAKRABORTY, D.; SINGH, R. Water availability in different soils in relation to hydrogel application. **Geoderma**, Amsterdam, v. 187-188, p. 94-101, 2012.

NEETHU, T. M.; DUBEY, P. K.; KASWALA, A.; Prospects and applications of Hydrogel Technology in Agriculture. **International Journal of Current Microbiology and Applied sciences**, Tamilnadu, v.7, n.5, p. 3155 – 3162, 2018.

NEVES, L. S.; ERNANI, P. R.; SIMONETE, M. A.; Mobilidade de potássio em solos decorrente da adição de doses de cloreto de potássio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n.1, p. 25 – 32, 2009.

NEVES, O. S. C.; ROCHA, I. G.; AVRELLA, E. D.; PAIM, L. P.; FIOR, C. S.; Influence of Nitrates, Phosphate, Sulphate and salts of Ca, Mg and K, on hydrogel hydration capacity. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 44, p. 1- 10, 2020.

OLIVEIRA, A.B.; GOMES-FILHO,E.; ENÉAS-FILHO,J. O problema da salinidade na agricultura e as adaptações das plantas ao estresse salino. **Enciclopédia Biosfera**, Jandaia, v.6, n.11, 436 p.1-16, 2010.

OLIVEIRA JÚNIOR, J. C.; CHIAPINI, M.; NASCIMENTP, A.F.; COUTO, E. G.; BEIRIGO, R.M.; VIDAL-TORRADO, P.; Genesis and Classification of sodic soils in the Northern Pantanal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, p. 1 – 19, 2017.

OLIVEIRA, R. A.; REZENDE, L. S.; MARTINEZ, M. A; MIRANDA, G. V.; Influência de um polímero hidroabsorvente sobre a retenção de água no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.8, n.1, p. 160-163, 2004.

OMIDIAN, H., ROCCA, J. G.; PARK, K. Advances in Superporous Hydrogels. **Journal of Controlled Release**, Amsterdam, v. 102, n. 1, p. 3-12, 2005.

OZAY, O.; EKICI, S.; BARAN, Y.; AKTAS, N.; SAHINER, N.; Removal of toxic metal ions with magnetic hydrogels. **Water Research**, Oxfordshire, v.43, n.17, p. 4403- 4411, 2009.

PAES, J. L. A.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A; FREIRE, M. B. G. S.; BARROS, M. F. C.; ROCHA, G. C.; Dispersão de argilas em solos afetados por sais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.17, n.11, p.1135–1142, 2013.

PALUSZEK, J.; Physical quality of eroded soil amended with gel-forming polymer. **International Agrophysics**, Lublin, v. 25, n. 4, p. 375-382, 2011.

PAULA, K.; COELHO, M.A.; HERNANDEZ, F. F.; ALVES, J.F.; **Estabilidade de agregados em solos sódicos e salino-sódicos**. Rio de Janeiro: Embrapa-SNLCS, 1982, 10p.

PAULINO, A.T.; GUILHERME, M. C.; REIS, A.V.; CAMPESE, G.M.; MUNIZ, E.C.; NOZAKI, J.; Removal of methylene blue dye from an aqueous media using superabsorbent hydrogel supported on modified polysaccharide. **Journal of Colloid and Interface Science**, San Diego, v. 301, n.1, p. 35 – 62, 2006.

PAVANI, K.; SHANMUGAM, P. M.; Yield enhancement of rice (*Oryza sativa*) by remediation of sodic soil. **Indian Journal of Agronomy**, New Deli, v. 64, n. 3, p. 406 – 409, 2019.

PEDROTTI, A.; CHAGAS, R. M.; RAMOS, V. C.; PRATA, A. P. N.; TADEU LUCAS, A. A.; SANTOS, P. B. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Santa Maria, v. 19, n.2, p.1308-1324, 2015.

PICCOLI, I.; SARA, P.; CAMAROTTO, C.; SQUARTINI, A.; GUERRINI, G.; MORAI, F.; Investigating hydrogel potentialities for improving soil pore network by using X-ray computed microtomography. EGU General Assembly 2020, Online, n. 4 – 8, 2020, Disponível em: <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-9985>. Acesso em: 15 de nov. de 2020.

PIERANGELI, M. A. P.; GUILHERME, L. R. G.; OLIVEIRA, L. R.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; Efeito da força iônica da solução de equilíbrio sobre adsorção/dessorção de chumbo em Latossolo brasileiro. **Revista Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n.8, p. 1077 – 1084, 2001.

PIZARRO, F.; **Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos**. Madrid: Agrícola Espanhola, 1978, 521p.

PONTES FILHO, R.; **Recuperação de áreas degradadas no semiárido com tamboril usando diferentes técnicas de manejo**. 2016. 91 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

PREVEDELLO, C. L.; BALENA, S. P.; Efeitos de polímeros hidroretentores nas propriedades físico-hídricas de dois meios porosos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n.2, p. 251-258, 2000.

PUSHPAMALAR, V.; LANGFORD, S. J.; AHMAD, M.; HASHIM, K.; LIM, Y. Y.; Absorption characterization of Ca<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> on irradiation crosslinked carboxymethyl sago pulp hydrogel. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, v. 128, n.3, p. 1828 – 1833, 2013.

QADIR, M.; OSTER, J. D.; SCHUBERT, S.; NOBLE, A. D.; Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 96, p. 197 – 247, 2007.

QADIR, M.; SCHUBERT, S.; Degradation process and nutrient constraints in sodic soil. **Land degradation and development**, Chichester, v.13, n. 4, p. 275-294, 2002.

QADIR, M.; SCHUBERT, S.; GHAFOOR, A.; MURTAZA, G.; Amelioration strategies for sodic soils: A review. **Land Degradation and Development**, Chichester, v. 12, n.4, p. 357 – 386, 2001.

- RAIJ, B. V.; **Fertilidade do solo e adubação**. 1 ed. Piracicaba: Editora Ceres. 1991. 645p.
- RAHIMI, H.; PAZIRA, E.; TAJIK, F.; Effect of soil organic matter, electrical conductivity, and sodium adsorption ratio on tensile strength of aggregates. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 3 – 4, p. 145 – 153, 2000.
- RENGASAMY, P.; Sodic soils. In: Lal, R.; Blum, W. H.; Valentine, C.; Stewart, B. A.; **Methods for assessment of soil degradation**. Washington: CRC, p. 265-378, 1997.
- RENGASAMY, P.; OLSSON, K. A.; Sodicity and soil structure. **Soil Research**. Melbourne, v. 29, n.6, p. 935 -952, 1991.
- REHMAN, A.; AHMAD, R.; SAFDAR, M.; Effect of hydrogel on the performance of aerobic rice sown under different techniques. **Plant Soil Environment**, Praga, v. 57, n.1, p. 321 – 325, 2011.
- RIBEIRO, M. R.; FREIRE, F. J.; MONTENEGRO, A. A. A.; Solos halomórficos no Brasil: Ocorrência, gênese, classificação, uso e manejo sustentável. In: Curi, N.; Marques, J. J.; Guilherme, L. R. G.; Lima, J. M.; Lopes, A. S.; Alvarez, V. H. **Tópicos em Ciência do Solo**. v. 3. Viçosa: SBCS, 2003, 165-208p.
- RIBEIRO, M.R.; BARROS, M. F. C.; FREIRE, M. B. G. S.; Química dos solos salinos e sódicos. In: Melo, V. F.; **Química e Mineralogia dos Solos: Parte II - Aplicações**. Viçosa: SBCS, p. 449-484. 2009.
- RIBEIRO, M. R.; RIBEIRO FILHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T.; Origem e classificação dos solos afetados por sais. In: Ghey, H.R. Dias, N.S.; Lacerda, C.F.; Gomes Fiho, E; **Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos básicos e aplicados**. 2. ed. Fortaleza: INCTSal, Cap 2, p. 9 – 16, 2016.
- REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. 4 ed. Campinas: Fundação Cargill, 1985, p.466.
- RHOADES, J.D.; BINGHAM, F.F.; LETEY, J.; HOFFMAN, G.J.; DEDRICK, A.R.; PINTER, P.J.; REPLOGLE, J.A.; Use of saline drainage water for irrigation: Imperial Valley study. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.16, n. 1 - 2, p. 25 – 36, 1989.
- RHOADES, J. D.; INGVALSON, R. D.; Macroscopic swelling and hydraulic conductivity properties of four vermiculitic soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.33, n.3, p. 364 – 369, 1969.
- RHOADES, J. D.; LOVEDAY, J.; Salinity in irrigated agriculture. **Journal Agronomy**, Madison, n. 30, p. 1089 – 1142, 1990.
- ROY, P. K.; SWAMI, V.; KUMAR, D.; RAJAGOPAL, C.; Removal of toxic metals using superabsorbent polyelectrolytic hydrogels. **Journal of Applied Polymer Science**, Hoboken, v. 122, n.4, p. 2415 – 2423, 2011.
- RUIZ, H. A.; SAMPAIO, R. A.; OLIVEIRA, M.; VENEGAS, V. H. A.; Características químicas de solos salino-sódicos submetidos a parcelamento da lâmina de lixiviação.



**Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, p. 1119-1126, 2004

SAAD, J. C. C.; LOPES, J. L. W.; SANTOS, T. A.; Manejo hídrico em viveiro e uso de hidrogel na sobrevivência pós-plantio de *Eucalyptus urograndis* em dois solos diferentes. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n.3, 2009.

SAFARI, N.; ALIASGHARZAD, N.; ASGHARI, S.; The effects of polyacrylamide on the parameters of physical quality in a clay loam soil selected from semiarid region. **Journal of Soil Environment**, [S. l.], v.1, n.1, p. 10 – 17, 2015.

SANTOS, M. F. G.; OLIVEIRA, F. A.; CAVALCANTE, L. F.; MEDEIROS, J. F.; SOUZA, C. C.; Solo sódico tratado com gesso agrícola, composto de lixo urbano e vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n.3, 2005.

SANTOS, R. V. A.; **Polímeros superabsorventes: Processo de produção, aplicações e mercado**. 2015. 191f. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Federal da Bahia, Salvador - Ba, 2015.

SALTON, J. C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P. C.; FABRICIO, A. C.; MACEDO, M. C. M.; BROCH, D. L.; Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 11 – 21, 2008

SENNA, A. M.; CARMO, J. B.; SILVA, J. M. S.; BOTARO, V. R.; Synthesis, characterization and application of hydrogel derived from cellulose acetate as a substrate for slow-release NPK fertilizer and water retention in soil. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S. l.], v.3, n. 2, p. 996-1002, 2015.

SHA, L. A.; KHAN, M.; JAVED, R.; SAYED, M.; KANH, M. S.; KHAN, A.; ULLAH, M.; Superabsorbent polymer hydrogels with good thermal and mechanical properties for removal of selected heavy metal ions. **Journal of Cleaner Production**, Oxfordshire, v. 201, n. 10, p. 78 – 87, 2018.

SHAINBERG, I.; KEREN, R.; FRENKEL, H.; Response of sodic soils to gypsum and calcium chloride application. **Soil and Water Management and Conservation**, [S. l.], v.46, n.1, p. 113 – 117, 1982.

SHALABY, S. W., MCCORMICK, C. L. E BUTLER, G. B.; Water-Soluble Polymers. Synthesis, Solution Properties and Applications. **Polymer International**, Chichester, v. 30, n.1, p.137 – 138, 1993.

SHE, D.; FEI, Y.; LIU, Z.; LIU, D.; SHAO, G.; Soil erosion characteristics of ditch banks during reclamation of a saline/sodic soil in a coastal region of China: Field investigation and rainfall simulation. **Catena**, Amsterdam, v.121, p. 176-185, 2014.

SHI, YOUNG; JING, L.; SHAO, J.; DENG, S.; WANG, R.; LI, N.; SUN, J.; ZHANG, H.; ZHU, H.; ZHANG, Y.; ZHENG, X.; ZHAO, D.; HUTTERMANN, A.; CHEN, S.; Effects of Stockosorb and Luquasorb polymers on salt and drought tolerance of *Populus popularis*. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, v.124, n. 2, p. 268 – 273, 2010.

- SIETKAZIEV, A. S.; KULKAEVA, L. A.; SHINYSHEROVA, G. B.; Rationale for water soil washing technologies by growth regulation. **Periódico Tchê Química**, Porto Alegre, v. 15, n. 30, p. 578 – 588, 2018.
- SILVA, A. R.; BEZERRA, F. T. C.; CAVALCANTE, L. F.; PEREIRA W. E. ; ARAÚJO, L. M.; BEZERRA, M. A. F. Frequência de irrigação com água salina na qualidade de mudas de pinha produzidas em substrato com polímero. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**. Campina Grande, v. 22, n.12, p.825-830, 2018.
- SILVA, C. L.; KATO, E. Efeito do selamento superficial na condutividade hidráulica saturada da superfície de um solo sob Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 32, n. 2, p. 213-220, 1997.
- SILVA, F. L. F.; **Estudo da potencialidade da radiação infravermelha no preparo de amostras de linhaça e camarão para análise de traços por FAAs e ICP OES**. 2017. 77f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2017.
- SILVA, F. P. **Síntese e caracterização de hidrogéis de poli[(N-isopropilacrilamida)-co-(ácido metacrílico)] e sua aplicação como sistemas de liberação controlada de medicamentos**. 2006. 174f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte- MG, 2006.
- SILVEIRA, K. R.; RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B.; HECK, R. J.; SILVEIRA, R. R.; Gypsum – saturated water to reclaim alluvial saline sodic and sodic soil. **Scientia Agricola**, Cerqueira César, v. 65, n. 1, p. 69 – 76, 2008.
- SIWEK, P.; DOMAGALA - SWIATKIEWICZ, I.; KALISZ, A.; The influence of degradable polymer mulches on soil properties and cucumber yield. **Agrochimica**, Pisa, v.59, n. 2, p. 108 – 123, 2015.
- SOUZA, E. R.; FREIRE, M. B. G. S.; MELO, D. V. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; Management of *Atriplex Nummularia* Lindl. in a salt affected soil in a Semiarid Region of Brazil. **International Journal of Phytoremediation**, Philadelphia, v.16, n.1, p. 73 – 85, 2014.
- SOUZA, L. P.; NOBRE, R. G.; BARBOSA, J. L.; LIMA, G. S.; ALMEIDA, L. L.S.; PINHEIRO, F. W. A. Cultivo do algodoeiro cv. BRS Topázio em solos salino-sódico com adição de matéria orgânica. **Revista Espacios**, Caracas, v. 38, n.14, p. 18 – 29, 2017.
- SPERA, S. T.; DENARDIN, J. E.; ESCOSTEGUY, P. A. V.; SANTOS, H. P.; FIGUEROA, E. A.; Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 32, (número especial), p. 2613-2620, 2008.
- SUN, X-F.; HAO, Y.; CAO, Y.; ZENG, Q.; Superabsorbent hydrogel based on lignin and montmorillonite for Cu (II) ions removal from aqueous solution. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 127, p. 511 – 519. 2019.
- SWORSKA, A.; LASKOWSKI, J.S.; CYMERMAN, G.; Flocculation of the Syncrude fine tailings: Part I. Effect of pH, polymer dosage and Mg<sup>2+</sup> and Ca<sup>2+</sup> cations. **International Journal of Mineral Processing**, Amsterdam, v. 60, n. 2, p. 143 – 152, 2000.

- TANG, H.U.; ZHOU, W.; ZHANG, L.; Adsorption isotherms and kinetics studies of malachite green on chitin hydrogels. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 209-210, p. 218-225, 2012.
- TEIXEIRA, P. C., DONAGEMMA, G. K., FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solos**. 3ª ed. Brasília: Embrapa, 2017, 574p.
- THENG, B, K, G.; Clay-Polymer Interactions: Summary and Perspectives. **Clays and Clay Minerals**, Chantilly, v. 30, n. 1, p.1 – 10, 1982.
- THOMBARE, N.; MISHRA, S.; SIDDIQUI, M.Z.; JHA, U.; SINGH, D.; MAHAJAN, G.R.; Design and development of guar gum based novel, superabsorbent and moisture retaining hydrogels for agricultural applications. **Carbohydrate Polymers**, Oxfordshire, v. 185, p. 169-178, 2018.
- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 301-309, 1998
- TRNKA, M.; KERSEBAUM, K. C.; EITZINGER, J.; HAYNES, M.; HLAVINKA, P.; SVOBODA, M.; DUBROVSKY, M; SEMERADAVA, D.; WARDLOW, B.; PORORRY, E.; MOZNY, M.; WITHITE, D.; ZALUD, Z.; Consequences of climate change for the soil climate in Central Europe and the central plains of the United States. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 120, p. 405 - 418, 2013.
- USSL STAFF- UNITED STATES SALINITY LABORATORY STAFF. **Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils**. Washington: Departament of Agriculture, 1954, 160p.
- VASCONCELOS, R. R. A.; BARROS, M DE F. C.; SILVA, Ê F. DE F.; GRACIANO, E. S. A.; FONTENELE A. J. P. B.; SILVA, N. M. L. Características físicas de solos salino-sódicos do semiárido pernambucano em função de diferentes níveis de gesso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v. 17, n.12 p. 1318-1325, 2013.
- VITAL, A. F. M.; SANTOS, R. V.; CAVALCANTE, L. F.; SOUTO, J. S.; Comportamento de atributos químicos de um solo salino-sódico tratado com gesso e fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n.1, p. 30 – 36, 2005.
- VORCHHEIMER, N.; Synthetic polyelectrolytes. In: Schwoyer, W. L. K.; **Polyelectrolytes for Water and Wastewater Treatment**. CRC Press: Boca Raton. 1981. p. 29 – 41.
- WAKEEL, A.; Potassium-sodium interactions in soil and plant under saline- sodic conditions. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 176, n. 3, p. 344 – 354, 2013.
- WALLACE, A.; WALLACE, G. A.; ABOUZAMZAM, A. M.; Amelioration of sodic soil with polymers. **Soil Science**, Philadelphia, v. 141, n. 5, p. 336 - 367, 1986.

WANG, Y.T; GREGG, L. L.; Hydrophilic polymers-their response to amendments and effect on properties of a soilless potting mix. **Journal of the American Society Horticultural Science**, [S. l], v. 115, p. 943-948, 1990.

WERLE, R.; GARCIA, R. A.; ROSOLEM, C. A.; Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2297 – 2305, 2008.

WEIAN, Z.; WEI, L.; YUE, F.; Synthesis and properties of a novel hydrogel nanocomposites. **Material Letters**, [S. l] v. 59, n. 23, p. 2876 – 2880, 2005.

WILKINSON, N.; METAXAS, A.; QUINNEY, C.; WICKRAMARATNE, S.; REINEKE, T. M.; DUTCHER, C.S.; pH dependence of bentonite aggregate size and morphology on polymer-clay flocculation. **Colloids and Surfaces A - Physicochemical and Engineering Aspects**, Amsterdam, v. 537, p. 281 – 286, 2018.

YODER, R. E.; A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **American Society of Agronomy**, Madison, v. 28, p. 337-351, 1936.

YOUNGS, E.G. Hydraulic conductivity of saturated soils. In: Smith, K. A.; Mullins, C.E.; **Soil analysis: Physical methods**. New York: Marcel Dekker, 1991, p.161-207.

YOUKER, R. E.; MCGUINNESS, J. L.; A short method of obtaining mean weight-diameter values of aggregate analyses of soils. **Soil Science**, Philadelphia, v.83, n.4, p. 291-294, 1957.

ZAHOW, M. F.; AMRHEIN, C.; Reclamation of a saline sodic soil using synthetic polymers and gypsum. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 4, p. 1257 – 1260, 1992.

ZHANG, M.; CHENG, Z.; ZHAO, T.; LIU, M.; HU, M.; LI, J.; Synthesis, Characterization and Swelling Behaviors of salt-sensitive maize bran-Poly (acrylic acid) superabsorbent hydrogel. **Journal of Agricultural Food Chemistry**, [S. l], v. 62, n.35, p. 8867–8874, 2014.

ZHENG, Y.; LI, P.; ZHANG, J.; WANG, A.; Study on superabsorbent composite XVI. Synthesis, characterization, and swelling behaviors of poly(sodium acrylate) - vermiculite superabsorbent composites. **European Polymer Journal**, Oxfordshire, v. 43, n. 5, p. 1691 – 1698, 2007.

ZOHURIAAN, M. J.; OMIDIAN, H.; DOROUDIANI, S.; KABIRI, K.; Advances in non-hygienic applications of superabsorbent hydrogel materials. **Journal of Materials Science**, New York, v.45, p. 5711-5735, 2010.

ZONATTO, F.; MUNIZ, E.C.; TAMBOURGI, E. B.; PAULINO, A. T.; Adsorption and controlled release of potassium, phosphate, and ammonia from modified Arabic gum-based hydrogel. **International Journal of Biological Macromolecules**, Amsterdam, v. 105, n.1, p. 363-369, 2017.

ZHU, Q.; BARNEY, C. W.; ERK, K. A.; Effect of ionic crosslinking on the swelling and mechanical response of model superabsorbent polymer hydrogels for internally cured concrete. **Materials and Structures**, Dordrecht, v.48, p. 2261–2276, 2015.