

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**

**CLARISSA BUARQUE VIEIRA**

**PERMEABILIDADE DE SOLOS IRRIGADOS COM ÁGUAS SALINAS  
EM FUNÇÃO DO TEOR E TIPO DE ARGILA**

**RECIFE**

**2020**



Clarissa Buarque Vieira

Engenheira Agrônoma

**Permeabilidade de solos irrigados com águas salinas em função do teor e tipo de argila**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire.

Coorientadores: Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida.

Prof. Dr. Luiz Guilherme Medeiros Pessoa.

RECIFE

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Sistema Integrado de Bibliotecas

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

---

C591p Vieira, Clarissa Buarque  
Permeabilidade de solos irrigados com águas salinas em função do teor e tipo de argila / Clarissa Buarque Vieira. - 2020.  
80 f. : il.

Orientadora: Maria Betânia Galvão dos Santos Freire.  
Inclui referências e apêndice(s).

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2020.

1. Salinidade. 2. Sodicidade. 3. Condutividade Hidráulica. 4. Composição Granulométrica. 5. Mineralogia. I. Freire, Maria Betania Galvao dos Santos, orient. II. Título

---

CDD 631.4

CLARISSA BUARQUE VIEIRA

**Permeabilidade de solos irrigados com águas salinas em função do teor e tipo de argila**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Aprovada em 28 de Fevereiro de 2020

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire  
Orientadora  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. José Amilton Santos Júnior  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

---

Prof. Dr. Luiz Guilherme Medeiros Pessoa  
Universidade Federal Rural de Pernambuco  
Unidade Acadêmica de Serra Talhada



*DEDICO*

*À Deus,*

*Aos meus pais Cícera e Adalberto,*

*Ao meu noivo Gabriel, avós,  
tios, primos e amigos*



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente a Deus, por todas as oportunidades a mim concedidas e todas as graças a mim destinadas.

Meus principais agradecimentos aos meus pais, Cícera Maria e Adalberto, por tudo o que fizeram e fazem por mim, com dedicação, amor, carinho e respeito. Sem vocês eu não conseguiria chegar onde eu cheguei, vocês foram o maior presente que Deus me deu e eu nunca vou ter palavras suficientes para explicar o amor que sinto por essas duas pessoas simplesmente incríveis que, apesar de todas as dificuldades, me criaram e educaram com o que tiveram de melhor.

Ao meu noivo, Gabriel Henrique Máximo, por ter me aguentando nestes anos tão corridos e atribulados, por ter cuidado de mim, me orientado, me dado total apoio em todos os momentos, pois, se meus pais foram o presente que Deus me deu no nascimento, você foi o presente que eu ganhei Dele para me acompanhar durante a vida.

Aos meus familiares, avós e avôs (in memoriam de Renilde, Vanildo e Francisco), tios e tias, primos, padrinhos e sogros por todo o apoio dedicado a mim em todos os momentos da minha vida.

A minha orientadora, Professora Doutora Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, por ter me apoiado, acolhido e ensinado por todos esses anos, desde o início da graduação em Agronomia, sempre com muita dedicação e com palavras amigas e reconfortantes nos momentos mais difíceis, me impulsionando a crescer e evoluir, da melhor forma possível, na minha vida acadêmica e me orientado com excelência pelos últimos 7 anos.

Aos meus professores do ensino fundamental, médio, da graduação em Agronomia e da pós graduação em Ciência do solo, por todo conhecimento passado a mim, das melhores formas possíveis e com grande profissionalismo.

Ao Professor Doutor Brivaldo Gomes de Almeida por sempre fazer parte da minha comissão de orientação, pelas horas dedicadas a me ajudar, a todo momento que necessitei, com grande sabedoria e amizade.

Ao Professor Doutor Luiz Guilherme Medeiros Pessoa, pela co-orientação neste trabalho de dissertação, pela disponibilidade em me ajudar durante este precioso tempo.

Ao Professor Doutor Fernando José Freire pela colaboração com o trabalho e disposição incessante em me orientar nos momentos de dúvidas acadêmicas.

Ao Professor Doutor Valdomiro Severino de Souza Júnior pela enorme colaboração com meu trabalho de dissertação desde o início do desenvolvimento da pesquisa até a finalização dos dados, com muito profissionalismo e amizade.

Ao Professor Doutor Hidelblandi Farias Melo por toda a colaboração com meu trabalho, sou eternamente grata.

A FACEPE pela concessão da bolsa de estudo e todo auxílio financeiro. A CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

A funcionária da pós graduação Maria do Socorro Santana pela atenção e carinho dedicados a mim, pelas palavras de conforto e por estar à disposição em todas as horas.

Aos amigos que me ajudaram durante a realização da minha pesquisa, em especial a Rodrigo, Luara, Lucca, Paulo, Arthur e Rayana, pois, sem vocês, eu não teria conseguido concluir, da melhor forma possível, meu mestrado acadêmico.

Aos meus amigos Ana Gabriela, Rodrigo, Thiago e Clayton por toda força e atenção que dedicaram a mim, nos melhores e piores momentos da minha vida e Amanda por toda a força, dentro da pós graduação, todas as conversas, consolações e carinho que me deu durante todos esses anos.

Pelos funcionários da Área de solos Pedro, Eudes, Simone, Paula e Vânia e pelos amigos Emanuelle, Danúbia, Cínthya, Thiago, Nara e Isamor, por todo auxílio, atenção, conversa e orientação dados a mim.

Agradeço de coração a todos que sempre estiveram ao meu lado e que me ajudaram durante este percurso.

## Permeabilidade de solos irrigados com águas salinas em função do teor e tipo de argila

### RESUMO

Os solos são corpos naturais com comportamentos individuais, que respondem de forma diferente aos estímulos externos impostos pela natureza e pelo homem. A qualidade da água afeta o solo, podendo levar à degradação pelo acúmulo de sais. Para avaliar alterações na permeabilidade de solos com a aplicação de águas com níveis crescentes de condutividade elétrica (CE) e relação de adsorção de sódio (RAS) foram montados permeômetros de coluna vertical e carga constante. Foram selecionados horizontes de nove solos, de locais distintos do estado de Pernambuco, caracterizados química, física e mineralogicamente. Os solos foram acondicionados em colunas de PVC e foi feito o ajuste da relação Ca:Na. Depois, foram aplicadas águas salinas para determinação da condutividade hidráulica em meio saturado ( $K_{sat}$ ), com águas de cinco valores de CE (128, 718, 1709, 2865 e 4671  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) e cinco valores de RAS [0, 5, 12, 20 e 30 ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ )<sup>1/2</sup>]. Os dados obtidos foram ajustados a equações de regressão múltiplas da  $K_{sat}$  em função da CE e da RAS das águas. Determinaram-se, também, os valores críticos de RAS, em cada nível de CE, nos quais a  $K_{sat}$  foi nula; e a concentração eletrolítica limite (CEL), com 20% de redução na  $K_{sat}$  máxima. A  $K_{sat}$  do Latossolo, Nitossolo e Argissolo não foi alterada com os diferentes tratamentos. Já no Neossolo Regolítico, Vertissolo, Planossolo, Luvisso, Cambissolo e Neossolo Flúvico a  $K_{sat}$  teve incremento com a elevação da CE e diminuição com o aumento da RAS. A CEL mostrou-se facilmente alcançada em solos com maiores teores de argila de alta atividade. Em solos mais arenosos, a CEL só foi atingida com maiores valores de RAS, indicando maior resistência destes solos à salinização e sodificação. Os solos do Agreste e Sertão foram os mais afetados pelos tratamentos, indicando sérios riscos de degradação física e química. Demonstra-se a importância de se monitorar a qualidade das águas a serem utilizadas na irrigação, especialmente em solos menos intemperizados, mais argilosos e com argila de atividade alta, para que o acúmulo de sais no solo não se intensifique mais no semiárido.

Palavras chave: Salinidade. Sodicidade. Condutividade Hidráulica. Composição granulométrica. Mineralogia.



# Permeability of soils irrigated with saline waters as a function of clay type and content

## ABSTRACT

Soils are natural bodies with individual behaviors, which respond differently to external stimuli imposed by nature and man. The quality of the water affects the soil, which can lead to degradation by the accumulation of salts. In order to evaluate changes in soil permeability with the application of water with increasing levels of electrical conductivity (EC) and sodium adsorption ratio (SAR), vertical column and constant load permeameters were assembled. Horizons of nine soils from Pernambuco State were selected, and chemically, physically and mineralogically characterized. The soils were accommodated in PVC columns and the Ca: Na ratio was adjusted. Then, waters with increasing levels of salts were applied to determine the saturated hydraulic conductivity ( $K_{sat}$ ), with water with five EC values (128, 718, 1709, 2865 and 4671  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) and five SAR values [0, 5, 12, 20 and 30 ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1})^{1/2}$ ]. The data obtained were adjusted to multiple regression equations for  $K_{sat}$  as a function of EC and SAR of the waters. This study also determined the critical SAR value at each EC level, where  $K_{sat}$  was minimal; and the threshold electrolyte concentration ( $C_{TH}$ ), with 20% reduction of maximum  $K_{sat}$ . The  $K_{sat}$  of the Ferralsol, Nitosol and Lixisol was not altered with the different treatments. In Regosol, Vertisol, Planosol, Luvisol, Cambisol and Fluvisol,  $K_{sat}$  increased with the eraise in EC and decreased with the increment of SAR.  $C_{TH}$  was easily reached in soils with higher content of high activity clay. In sandy soils,  $C_{TH}$  was only reached with higher values of SAR, indicating greater resistance of these soils to salinization and sodification. The soils of Agreste and Sertão were the most affected by the treatments, indicating serious risks of physical and chemical degradation. The importance of monitoring the quality of the water to be used for irrigation is demonstrated, especially in less weathered, more clayey soils with high activity clay, so that the accumulation of salts in the soil does not intensify further in the semiarid.

Keywords: Salinity. Sodicity. Hydraulic Conductivity. Granulometric Composition. Mineralogy.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa do Estado de Pernambuco com as indicações dos locais de coleta dos solos. Adaptado de IBGE 2020.....33
- Figura 2.** Curvas características de retenção de água dos solos Latossolo, Nitossolo, Argissolo, Planossolo, Luvisolo, Cambissolo e Neossolo Flúvico.....38
- Figura 3.** Difrátogramas de raios-x da fração argila dos horizontes estudados no Latossolo Amarelo, Nitossolo Háplico, Argissolo Amarelo e Neossolo Regolítico. Ct – Caulinita, Gh – Goethita, Hm – Hematita, Es – Esmectita, Il – Ilita, Fd – Feldspato.....42
- Figura 4.** Difrátogramas de raios-x da fração argila dos horizontes estudados no Vertissolo Ebânico, Luvisolo Crômico e Neossolo Flúvico. Ct – Caulinita, Gh – Goethita, Hm – Hematita, Es – Esmectita, Il – Ilita, Tc - Talco.....43
- Figura 5.** Difrátogramas de raios-x da fração argila dos horizontes estudados no Cambissolo Flúvico e Planossolo Háplico. Ct – Caulinita, Es – Esmectita e Il – Ilita....44
- Figura 6.** Difrátograma das argilas sem tratamento dos nove solos estudados. Ct – Caulinita, Q – Quartzo, Fd – Feldspato, Il – Ilita, Gh – Goethita, Hm - Hematita.....44
- Figura 7** - Esquema de um permeâmetro de coluna vertical e carga constante adaptado de FREIRE (2001).....48
- Figura 8.** Superfícies de resposta da condutividade hidráulica em meio saturado dos solos Latossolo Amarelo, Argissolo Amarelo, Nitossolo Háplico e Neossolo Regolítico submetidos à irrigação com águas de valores crescentes de condutividade elétrica (CE) e relação de adsorção de sódio (RAS). Solos com condutividade hidráulica de moderada a moderadamente rápida.....52
- Figura 9.** Superfícies de resposta da condutividade hidráulica em meio saturado dos solos Vertissolo Ebânico, Luvisolo Crômico e Neossolo Flúvico submetidos à irrigação com águas de valores crescentes de condutividade elétrica (CE) e relação de adsorção de sódio (RAS). Solos com condutividade hidráulica de moderada a muito lenta.....53
- Figura 10.** Superfícies de resposta da condutividade hidráulica em meio saturado dos solos Cambissolo Flúvico e Planossolo Háplico submetidos à irrigação com águas de valores crescentes de condutividade elétrica (CE) e relação de adsorção de sódio (RAS). Solos com condutividade hidráulica de lenta a muito lenta.....54
- Figura 11.** Condutividade hidráulica em meio saturado ( $K_{sat}$ ) em função da relação de adsorção de sódio (RAS) em amostras de Neossolo Regolítico. Dados obtidos a partir

das equações de regressão múltipla para as condutividades elétricas (CE) de 128, 718, 1709, 2865 e 4671 $\mu\text{S cm}^{-1}$ .....	61
<b>Figura 12.</b> Condutividade hidráulica em meio saturado ( $K_{\text{sat}}$ ) em função da relação de adsorção de sódio (RAS) em amostras de Vertissolo Ebânico, Luvissole Crômico e Neossolo Flúvico. Dados obtidos a partir das equações de regressão múltipla para as condutividades elétricas (CE) de 128, 718, 1709, 2865 e 4671 $\mu\text{S cm}^{-1}$ .....	62
<b>Figura 13.</b> Condutividade hidráulica em meio saturado ( $K_{\text{sat}}$ ) em função da relação de adsorção de sódio (RAS) em amostras de Cambissolo Flúvico e Planossolo Háplico. Dados obtidos a partir das equações de regressão múltipla para as condutividades elétricas (CE) de 128, 718, 1709, 2865 e 4671 $\mu\text{S cm}^{-1}$ .....	63
<b>Figura 14.</b> Valores de relação de adsorção de sódio (RAS), em cada nível de condutividade elétrica (CE = 128, 817, 1709, 2865 e 4671 $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), onde a condutividade hidráulica dos solos Neossolo Regolítico, Vertissolo, Planossolo, Luvissole, Cambissolo e Neossolo Flúvico será nula.....	65
<b>Figura 15.</b> Valores de RAS, em função das CEs de 128, 718, 1709, 2865 e 4671 $\mu\text{S cm}^{-1}$ , onde ocorre a redução de 20% da condutividade hidráulica máxima em cada nível de CE, nos solos Neossolo Regolítico, Vertissolo, Planossolo, Luvissole, Cambissolo, Neossolo Flúvico.....	68

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Classificação da qualidade das águas de acordo com a condutividade elétrica (CE) e relação de adsorção de sódio (RAS).....	29
<b>Tabela 2.</b> Detalhamento das amostras de solos selecionadas para realização de ensaio de condutividade hidráulica em meio saturado.....	34
<b>Tabela 3.</b> Caracterização química dos solos: pH, $\Delta$ pH, condutividade elétrica do extrato de pasta saturada (CEes), cátions solúveis e relação de adsorção de sódio (RAS).....	36
<b>Tabela 4.</b> Caracterização química dos solos: cátions trocáveis, acidez potencial, capacidade de troca catiônica (T), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m), porcentagem de sódio trocável (PST) e carbono orgânico total (COT).....	37
<b>Tabela 5.</b> Valores dos parâmetros da equação de van Genuchten utilizados nos ajustes do modelo da curva característica de retenção de água no solo.....	39
<b>Tabela 6.</b> Caracterização física do solo.....	40
<b>Tabela 7.</b> Valores de óxidos de ferro livre extraído com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed), ferro amorfo extraído com oxalato de sódio (Feo) e a relação entre ferro livre e ferro amorfo.....	41
<b>Tabela 8.</b> Concentração dos sais cloreto de sódio e cloreto de cálcio nas soluções saturantes para estabelecimento da relação de adsorção de sódio (RAS) almejada.....	45
<b>Tabela 9.</b> Concentração dos sais cloreto de sódio e cloreto de cálcio de acordo com a RAS estabelecida para as soluções percolantes.....	46
<b>Tabela 10.</b> Correção da condutividade elétrica com valores da CE calculada e a determinada para as soluções percolantes.....	47
<b>Tabela 11.</b> Classificação dos solos estudados pela velocidade de infiltração de água com base em Klute (1965) .....	50
<b>Tabela 12.</b> Equações de regressão múltipla para relação de condutividade hidráulica em meio saturado ( $K_{sat}$ ) em função da condutividade elétrica (CE em $\mu$ S cm <sup>-1</sup> ) e da relação de adsorção de sódio (RAS) das soluções de trabalho.....	60



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1. Hipóteses .....	20
1.2. Objetivo Geral .....	20
1.3. Objetivos específicos .....	21
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1. Solos e sua formação.....	22
2.2. Solos salinos e sódicos .....	23
2.3. Acúmulo de sais nos solos pelo manejo inadequado da irrigação .....	26
2.4. Influência da qualidade da água na floculação e dispersão .....	28
2.5. Permeabilidade em solos afetados por sais.....	30
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	33
3.1. Solos estudados.....	33
3.2. Caracterização das amostras de solos .....	35
3.2.1. Caracterização química .....	35
3.2.2. Caracterização física .....	38
3.2.3. Caracterização mineralógica .....	41
3.3. Montagem e condução do experimento de condutividade hidráulica em meio saturado.....	45
3.4. Análise estatística .....	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	50
4.1. Condutividade hidráulica em meio saturado .....	50
4.2. Concentração eletrolítica limite .....	67
5. CONCLUSÃO .....	70
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	71
7. APÊNDICES.....	78



## 1. INTRODUÇÃO

O estado de Pernambuco, situado no Nordeste do Brasil, possui em seu território as 13 classes de solos brasileiros, sendo umas mais predominantes que outras. Isto ocorre devido à presença de diferentes condições climáticas, topográficas e de materiais de origem, abrangendo desde zonas litorâneas até o semiárido.

Essa diversidade climática no estado permite a formação de solos evoluídos, profundos, com alto grau de intemperismo e predomínio de minerais do tipo 1:1 (caulinita) e óxidos (hematita, goethita e gibbsita), até solos jovens, pouco profundos e com predomínio de minerais do tipo 2:1 (esmectita e vermiculita). E estas composições acarretam diferenças significativas nas características químicas e físicas de cada grupo de solos, bem como seu comportamento.

Sob regime hídrico de maior pluviosidade, os solos de regiões litorâneas e da zona da mata, a depender do seu material de origem, são geralmente profundos, de composição química pobre em nutrientes, porém com propriedades físicas bem preservadas, com boa estrutura, alta porosidade e alta permeabilidade. Já solos do agreste e sertão, sob déficit hídrico, tendem a ser menos profundos, de composição química mais rica em nutrientes e até em elementos potencialmente tóxicos como é o caso de sódio e, muitas vezes, com comprometimento nas propriedades físicas, como baixa porosidade, baixa permeabilidade e altas densidades. Isto tudo ocorre devido, principalmente, ao regime hídrico de cada região, que induz à lixiviação intensa de elementos liberados durante o intemperismo no primeiro caso, e ao acúmulo desses mesmos elementos no segundo, sob lixiviação limitada. Adicionalmente, os sais podem ser inseridos nos solos pelo manejo inadequado da irrigação.

A qualidade da água, seja da chuva ou da irrigação, influencia diretamente no comportamento físico e químico do solo. Em regiões áridas e semiáridas o uso da irrigação é uma prática constante devido à baixa precipitação e a má distribuição das chuvas ao longo do ano. O manejo inadequado das águas de irrigação está promovendo mudanças nos solos, causando sérios problemas de salinização, sodificação e adensamento, prejudicando, assim, o bom desenvolvimento das espécies vegetais.

Os solos de Zona da Mata, por serem mais intemperizados e pouco reativos, são menos prejudicados pela qualidade da água do que solos menos evoluídos de agreste e sertão, geralmente de maior reatividade. Conforme o nível de sais e sódio

presentes na água de irrigação, os solos mais reativos acumulam mais sais e sódio e suas propriedades físicas podem ser severamente modificadas. Com o acúmulo de sódio trocável há a dispersão da fração argila e conseqüente movimentação no perfil, deposição e obstrução de poros do solo, dificultando a infiltração de água.

Além da susceptibilidade do solo à degradação, a relação entre elementos como o cálcio, magnésio, potássio e sódio na solução do solo governa as alterações físicas no solo, principalmente a condutividade hidráulica, sendo o cálcio um agente floculante e o sódio, dispersor de partículas coloidais. Os tipos de cargas elétricas no solo e a quantidade destas também influem, pois gerenciam os fenômenos de adsorção e dessorção desses cátions, sendo importante seu conhecimento. Sendo assim, solos de regiões áridas e semiáridas, com presença de argilominerais do tipo 2:1 são mais susceptíveis à degradação pelo acúmulo de sais.

A forma como diferentes solos de regiões de clima árido e semiárido se comporta sob irrigação precisa ser entendida para evitar o aumento de áreas degradadas no semiárido do Brasil. Assim, este estudo visa avaliar as potencialidades de uso de águas de níveis crescentes de sais na irrigação de solos distintos, identificando as possíveis limitações na condutividade hidráulica, e alterações nas propriedades químicas dos solos. Estas informações, quando testadas em campo, com diversas culturas agrícolas, ajudará a conter o aumento na degradação dos solos e abandono de áreas antes agricultáveis.

### **1.1. Hipóteses**

A permeabilidade dos solos depende do teor e tipo de argila e dos níveis diferentes de salinidade e sodicidade.

A qualidade da água de irrigação influencia os teores de sais e sódio e a condutividade hidráulica dos solos.

### **1.2. Objetivo Geral**

Identificar a interferência de águas com níveis crescentes de sais na permeabilidade de solos de diferentes mineralogias e teores de argila e definir a concentração eletrolítica limite para uso de águas salinas na irrigação de solos de diferentes mineralogias e teores da fração argila.

### **1.3. Objetivos específicos**

Estudar alterações nas propriedades físicas de solos irrigados com águas de valores crescentes de CE e RAS;

Avaliar a influência da textura e da mineralogia dos solos na degradação pela salinidade e sodicidade da água de irrigação;

Indicar a possibilidade de uso de águas salinas na irrigação em função de sua composição e das propriedades dos solos a serem irrigados considerando a concentração eletrolítica limite.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Solos e sua formação

“O solo é uma coleção de corpos naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, tridimensionais, dinâmicos, formado por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial das extensões continentais do planeta, contém matéria viva e podem ser vegetados na natureza onde ocorrem e, eventualmente, terem sido modificados por interferência antrópica” (EMBRAPA, 2018).

Os solos são formados a partir dos fatores de formação (material de origem, clima, relevo, organismos e tempo) e pelos processos pedogenéticos. O intemperismo é o primeiro passo para diversos processos geológicos, incluindo a gênese dos solos. Solos mais intemperizados são aqueles que sofreram forte influência dos fatores de formação, em especial o clima e são denominados de solos maduros ou evoluídos. Os solos menos intemperizados, que foram afetados em menor grau pelos fatores de formação, são denominados de solos jovens (KAMPF; CURRI; MARQUES, 2009; FONTES, 2015).

Devido à intensa atuação dos fatores de formação e influência da mineralogia, solos altamente intemperizados apresentam propriedades físicas agronomicamente desejáveis como grande profundidade, estrutura estável, boa porosidade e alta permeabilidade, e propriedades químicas indesejáveis como alta acidez, baixa reserva de nutrientes, baixa capacidade de troca catiônica (CTC), alta capacidade de adsorção aniônica (CTA) e alto valor do ponto de carga zero (PCZ). Exemplos destes tipos de solos são os Latossolos e Argissolos, que predominam no território brasileiro ocupando extensas áreas cultivadas e de reservas naturais (FONTES; CAMARGO; SPOSITO, 2001).

Já os solos pouco intemperizados, presentes geralmente em regiões áridas e semiárida são pouco evoluídos e pouco profundos, com presença de minerais facilmente alteráveis nas frações mais grossas e argilominerais do tipo 2:1. São nessas áreas, em virtude das características de clima, relevo, geologia e drenagem, entre outros fatores, que ocorrem condições favoráveis à ocorrência de solos afetados por excesso de sais (MOTA; OLIVEIRA, 1999; SANTOS et al., 2012).

Geralmente, este tipo de solo pouco evoluído possui composição química mais rica, quando não apresentam excessivas concentrações de sais e sódio, porém com

propriedades físicas insatisfatórias para a agricultura. Podem ser solos adensados e com baixa permeabilidade, dificultando o cultivo agrícola, especialmente sob irrigação. Exemplos dessas classes de solos são os Luvisolos, Vertissolos e Planossolos.

Cada solo tem suas particularidades e aptidões. No entanto, na escolha do solo para fins agrícolas deve-se levar em consideração as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e biológicas do solo para se fazer uma boa adequação das práticas de manejo e conservação. Só assim o solo poderá expressar suas potencialidades, para que não haja uso indevido tanto do solo como de outros recursos naturais e, também, financeiros.

Em algumas situações, os solos podem ter problemas que não permitam a expressão de sua capacidade produtiva, dificultando ou impedindo seu uso agropecuário. Este é o caso de solos degradados pelo acúmulo excessivo de sais, que precisam ser melhor estudados, quanto ao uso e manejo. Só assim será possível a exploração racional e economicamente viável dos mesmos.

## **2.2. Solos salinos e sódicos**

De acordo com relatório da FAO (2015), mais de 33% dos solos no mundo estão em processo de degradação ou degradados devido a erosão, salinização, compactação, acidificação e poluição química. A salinização no mundo ocorre, principalmente, em área irrigadas e estima-se que mais de 20% dos solos dos perímetros irrigados estão afetados por sais. Países como China, Índia, Paquistão e Estados Unidos da América são os mais afetados por esse tipo de degradação. O país com maior extensão de áreas naturalmente salinizadas, segundo o relatório, é a Austrália.

Em condições naturais, tanto os solos quanto as águas contêm sais. Em regiões de clima úmido e subúmido, a concentração de sais nas águas é frequentemente baixa, pela diluição em elevados volumes. Enquanto em regiões áridas e semiáridas as concentrações podem atingir altos valores, prejudicando as propriedades dos solos e as plantas. O processo de salinização dos solos é, geralmente, resultante da associação da formação geológica predominante na paisagem como fonte dos elementos, má distribuição das chuvas e exploração agrícola inadequada, devido a ações antrópicas como irrigação com drenagem deficitária, lâmina insuficiente de água de irrigação e uso de água salina (PEDROTTI et al., 2015; FERREIRA; SILVA; RUIZ, 2016).

Os solos salinos e/ou sódicos, também conhecidos por solos halomórficos, são solos desenvolvidos em condições de má drenagem, com presença de sais solúveis, sódio trocável ou ambos, em horizontes ou camadas próximas à superfície ou em subsuperfície (RIBEIRO; RIBEIRO FILHO; JACOMINE, 2016).

Mesmo em regiões onde não há déficit hídrico, a salinização dos solos pode ocorrer por meio do material de origem, posição topográfica, águas de lençóis freáticos ricos em sais, deposições eólicas, influência das águas marítimas em ambientes litorâneos, manejo inadequado de fertilizantes com alto índice salino juntamente com a má drenagem, uso inadequado da fertirrigação, despejo de rejeito de dessalinizadores em ambientes impróprios entre outras diversas causas (SALAMA; OTTO; FITZPATRICK, 1999; DIAS et al., 2005; LIMA JUNIOR; SILVA, 2010; PEDROTTI et al., 2015)

No Brasil, a principal região que apresenta solos em processo de degradação por acúmulo de sais é a área do “Polígono das Secas”, no semiárido brasileiro que, segundo Travassos, Souza e Silva (2013), abrange os estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, no Nordeste, e Minas Gerais no Sudeste do país. Além dos processos naturais de degradação e desertificação, esta região do país é marcada por forte interferência antrópica por meio da irrigação.

O bioma do Brasil onde predominam os solos salinos e/ou sódicos é a Caatinga, que é um ambiente caracterizado por escassez de água devido à elevada evapotranspiração e baixa precipitação, com regime de chuvas irregulares. Com isso, há uma limitação no intemperismo-lixiviação, o que acarreta em restrição na remoção de bases no solo, favorecendo o acúmulo de altas concentrações de sais no perfil do solo (ARAÚJO FILHO et al., 2017).

Outro ambiente brasileiro com áreas com certo acúmulo de sais é o pantanal Mato-Grossense onde, em algumas épocas do ano, a evapotranspiração é maior que a precipitação, promovendo o aparecimento de solos salinos, salino-sódicos e alcalinos. Nesta região também há a presença de lagoas salinas e alcalinas, o que intensifica a salinização dos solos desta região (COUTO et al., 2017).

Em Pernambuco, a presença de solos afetados por sais fica mais acentuada nas regiões do Agreste e Sertão do estado. Além da influência do material de origem, estas regiões possuem um clima favorável ao acúmulo de sais devido à baixa e má distribuição de chuvas ao longo do ano atrelado a alta evapotranspiração potencial,

manejo inadequadas da irrigação e má drenagem (NUNES FILHO et al., 1991; BARROS et al., 2004)

Alguns estudos mostram que diversas áreas do estado de Pernambuco encontram-se em processo de salinização/sodificação ou já estão degradadas. Solos das classes de Luvisolo, Planossolo, Vertissolo, Cambissolo Neossolo Flúvico e Gleissolo possuem alta susceptibilidade à salinização nesta região do estado e, em contrapartida, solos como Latossolos, Argissolos e Neossolos Regolíticos e Quartzarênicos possuem baixa susceptibilidade devido, principalmente, à composição granulométrica, mineralogia da fração argila e posição do solo na catena (CASTRO; SANTOS, 2015; PESSOA et al., 2019).

Castro e Santos (2015) afirmam que alguns municípios de Pernambuco apresentam alto risco de salinização dos seus solos como por exemplo Lagoa Grande, Petrolina, Santa Maria da Boa Vista, Dormentes e Afrânio (50,87%; 40,6%; 30,04%; 24,47% de suas terras com alto risco de salinização, respectivamente).

Para um solo ser considerado salino, de acordo com USSL STAFF (1954), ele deve obedecer alguns critérios como: condutividade elétrica (CE) igual ou maior do que  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , porcentagem de sódio trocável (PST) menor que 15% e relação de adsorção de sódio (RAS) menor que 13. Solos sódicos são aqueles que possuem CE menor que  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , PST igual ou maior que 15% e RAS igual ou maior que 13. Para o solo ser classificado como salino-sódico ele deve ultrapassar todos os limites mínimos de concentração de sais e sódio ( $CE \geq 4 \text{ dS m}^{-1}$ ,  $PST \geq 15\%$  e  $RAS \geq 13$ ).

A relação de adsorção de sódio é definida pela fórmula:

$$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+} + Mg^{2+}]}{2}}}$$

Em que,

RAS é a relação de adsorção de sódio em  $(\text{mmol}_c \text{ L}^{-1})^{1/2}$  e  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  são as concentrações dos cátions sódio, cálcio e magnésio, em  $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$ .

Já a porcentagem de sódio trocável é expressa pela equação:

$$PST = \frac{Na^+}{CTC} \times 100$$

Em que,

PST é a porcentagem de sódio trocável, em %;  $Na^+$  é a concentração de sódio trocável, em  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  e CTC é a capacidade de troca catiônica, em  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

De acordo com Freire e Freire (2007) e Ribeiro, Barros e Freire (2009), a degradação principal de um solo salino está ligada às suas propriedades químicas, pois a alta concentração de sais acaba por modificar a pressão osmótica do solo, acarretando dificuldade de absorção de água e excesso de determinados elementos nas plantas (toxidez). Entretanto, a alta concentração de sais permite maior floculação ao solo, com melhoria na permeabilidade e na estabilidade dos agregados do solo.

Já um solo sódico, os mesmos autores afirmam que a degradação ocorre tanto nos atributos químicos quanto físicos, visto que o elemento sódio favorece a dispersão das argilas do solo. Isso se justifica pelo raio hidratado deste íon ser grande o suficiente para impedir a completa neutralização das cargas negativas das partículas coloidais do solo, favorecendo o espessamento da dupla camada difusa e a dispersão dos colóides do solo. Em consequência, são originados solos de permeabilidade restrita, adensados e com baixa estabilidade de agregados.

O estudo de solos afetados por sais já se tornou fundamental no mundo contemporâneo, haja vista que extensas áreas estão sob processo de degradação, em decorrência dos fatores de formação dos solos (processos naturais) ou por interferência antrópica, podendo causar danos irreparáveis aos ecossistemas terrestres e à vida do homem. Muitas áreas são hoje caracterizadas como desérticas e sem possibilidade de recuperação, gerando graves problemas sociais, econômicos e ambientais. O monitoramento de áreas sob irrigação e o uso de um manejo adequado pode minimizar os riscos de degradação, evitando o aumento de áreas de solos afetados por sais.

### **2.3. Acúmulo de sais nos solos pelo manejo inadequado da irrigação**

Com uma população crescente e maiores demandas de produção de alimentos, está se tornando cada dia mais importante utilizar a terra de forma eficiente. Nesse cenário, em muitas situações, a irrigação é a maneira de garantir a produção agrícola com segurança, tornando produtivas áreas de regiões áridas e semiáridas, bem como complementando às necessidades hídricas das plantas nas regiões úmidas (MEDEIROS et al., 2016; ORTON et al., 2018).

A irrigação vem sendo uma técnica indispensável em áreas de clima quente e seco, como é o caso do semiárido do Nordeste do Brasil, que é onde se concentra a maioria dos solos afetados por sais do país. Esta região apresenta elevado déficit hídrico pelos altos valores de evapotranspiração potencial, que excedem a

precipitação durante a maior parte do ano e, com isso, a salinização do solo é frequente, principalmente quando não se adota um manejo adequado das práticas de irrigação. Na agricultura irrigada, o impacto da qualidade da água deve ser avaliado antes do início do cultivo por se tratar de um dos fatores que tem limitado ou impossibilitado a expansão da produção agrícola no país (HOLANDA et al., 2016; MEDEIROS et al., 2016; PESSOA et al., 2019).

No estado de Pernambuco, as principais áreas irrigadas estão localizadas nas regiões semiáridas. Nestas áreas, foram inicialmente implantados sistemas de irrigação em solos mais profundos e com boa drenagem, como Latossolos e Argissolos (FERNANDES et al., 2010). Segundo os autores, com o avanço da agricultura, outras áreas foram sendo incorporadas e destinadas à produção agrícola, forçando à utilização de solos de menor aptidão para irrigação, especialmente Luvisolos, Vertissolos, Neossolos Regolíticos, Neossolos Flúvicos e Neossolos Quartzarênicos, alguns dos quais, se mal manejados, podem ser degradados pelo acúmulo de sais

Devido à grande diversidade de características morfológicas, físicas, químicas e biológicas dos ambientes, os solos apresentam uma gama de variações nas suas composições e o manejo impróprio pode resultar na degradação dos solos e da biodiversidade. São muitos os exemplos de práticas que acabam por deteriorar o solo, como é o caso da ausência de práticas de manejo e conservação da água e do solo (SOUSA et al., 2013).

Neste contexto, o uso de água de irrigação com teores elevados de sais e altas proporções de sódio, sem um manejo apropriado, pode agravar problemas de salinização e sodificação pré-existentes. A quantificação do impacto que essas águas de irrigação causam na estabilidade das estruturas do solo vem se tornando um fator chave quando se avalia a adequabilidade dessas águas para a irrigação (EZLIT et al., 2013). Por outro lado, o uso de lâminas excessivas de água na irrigação sem uma drenagem eficiente vem promovendo o acúmulo de sais no perfil dos solos.

Para a adequação do manejo da irrigação, os cenários e os padrões geomorfológicos das regiões áridas e semiáridas são aspectos que deveriam ser previamente estudados para qualquer planejamento agrícola eficiente (ELHAG, 2016).

O efeito da irrigação com água salina sobre o solo varia em função do sistema que está sendo utilizado na aplicação de água. Os sistemas por inundação e aspersão

produzem um perfil de salinidade devido à uniformização da aplicação da água, onde os sais se acumulam mais na parte inferior da zona radicular. Já os sistemas por sulco e por gotejamento aplicam água somente em parte do terreno, causando o acúmulo de sais na periferia do bulbo molhado no gotejamento, e nas linhas entre os sulcos, na irrigação por sulco. Nos sistemas de irrigação por aspersão, quando a irrigação é realizada com água com altas proporções de sódio em relação aos cátions bivalentes (cálcio e magnésio), esse íon se acumula na superfície dos coloides, causando sua dispersão, movimentação no perfil e obstrução dos poros do solo (GARCIA et al., 2008).

Assim, o manejo inadequado da irrigação pode promover tanto o agravamento na concentração de sais em solos com presença natural de sais, como pode desencadear a degradação em ambientes sem histórico de acúmulo de sais.

Isto acontece quando a entrada de sais via irrigação é superior à saída pela drenagem ou quando a evapotranspiração do local excede a lâmina de irrigação aplicada, podendo assim aumentar os teores de sais tanto em superfície como ao longo do perfil do solo. É preciso que haja o monitoramento e controle das entradas e saídas de sais, evitando seu acúmulo e os efeitos adversos que isso promove.

#### **2.4. Influência da qualidade da água na floculação e dispersão**

A interação entre água e solo envolve fenômenos complexos pelo fato da água ser um fluido polar e dos coloides de argila serem, geralmente, partículas carregadas negativamente devido às substituições isomórficas (cargas permanentes) e aos processos de protonação e desprotonação, gerando cargas dependentes de pH (cargas variáveis). Os solutos dissolvidos nas águas afetam a interação solo-água, pela contribuição da concentração eletrolítica (diretamente proporcional a condutividade elétrica), tamanho, carga elétrica e raio hidratado dos cátions solúveis, interferindo diretamente nos processos de dispersão/floculação no solo (BENNETT et al., 2019).

Para vários solos, o íon que domina o balanço de cargas é o cálcio. Entretanto, solos desenvolvidos em regiões áridas e semiáridas podem conter expressivas quantidades de sódio nos coloides do solo. A presença de proporções significantes de sódio trocável pode afetar negativamente as propriedades físicas dos solos incluindo a permeabilidade, pela dispersão das partículas coloidais. Em baixas concentrações eletrolíticas, a dispersão das argilas é resultado das forças de repulsão

entre partículas carregadas negativamente. A interação de partículas em um solo sódico pode ser consideravelmente influenciada pela presença de eletrólitos no solo ou na água de irrigação (USSL STAFF, 1954; QUIRK; PEREIRA; TANTON, 1986).

A qualidade química das águas usadas para irrigação afeta tanto as propriedades químicas como as físicas do solo. Águas com baixos teores de sais possuem pouca influência no aumento do acúmulo de sais no solo. Porém, a depender do tipo de solo, essas águas podem promover dispersão das partículas coloidais devido ao excesso de cargas negativas no solo. Em contrapartida, águas de má qualidade, com altas concentrações de sais solúveis, possuem alto poder de salinização dos solos, entretanto, são capazes de melhorar a flocculação das argilas no solo, melhorando, assim, as propriedades físicas do mesmo (CHAUDHARI, 2001; CUCCI; LACOLLA; RUBINO, 2013).

Isto pode ser explicado pela teoria da dupla camada difusa, que tem sua espessura diminuída pela ação dos sais, favorecendo a flocculação nos solos. Não havendo sais em solução ou outro agente flocculante como o alumínio, a dupla camada difusa se mantém espessa e ocorre a repulsão entre as partículas com cargas elétricas semelhantes.

A equipe do USSL STAFF (1954), em um dos trabalhos pioneiros na classificação da qualidade das águas, indica quatro classes para a salinidade e quatro para a sodicidade das águas, sendo elas descritas na Tabela 1.

**Tabela 1.** Classificação da qualidade das águas de acordo com a condutividade elétrica (CE) e relação de adsorção de sódio (RAS)

Salinidade	CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	Sodicidade	RAS ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) <sup>1/2</sup>
C1	100-250	S1	0-10
C2	250-750	S2	10-18
C3	750-2250	S3	20-26
C4	>2250	S4	26-30

Adaptado de USSL STAFF (1954).

Assim, a qualidade das águas pode variar de C1S1 a C1S4, C2S1 a C2S4, C3S1 a C3S4 e C4S1 a C4S4, indicando as águas com menores e maiores concentrações de sais e sódio solúveis.

Em regiões de clima árido e semiárido, como é o caso do sertão do estado de Pernambuco, um aspecto importante para o sucesso na irrigação como uma prática agrícola é a qualidade da água. Se esta tiver elevadas concentrações de sais pode promover a degradação química do solo, limitando a produção agrícola ou impedindo-a por completo pela elevação da relação de adsorção de sódio e da condutividade elétrica (PESSOA et al., 2019).

## **2.5. Permeabilidade em solos afetados por sais**

A permeabilidade dos solos é uma das propriedades físicas fundamentais para a dinâmica da água no solo e consequente manutenção da vida vegetal no ambiente. Alguns fatores naturais e antrópicos podem interferir neste atributo do solo como é o caso de adensamento, compactação, aplicação de corretivos e a concentração de sais e sódio no perfil.

A condutividade hidráulica, que depende da agregação, porosidade total, tamanho de poros, floculação, estrutura e textura do solo é máxima quando o solo encontra-se saturado, com a taxa de infiltração constante, sendo definida como a permeabilidade do solo (SOUZA et al., 2019).

O conhecimento dos efeitos de diferentes níveis de salinidade e sodicidade nas propriedades hidráulicas do solo é essencial para avaliar a extensão e as causas da degradação, solo e planejamento da conservação do solo e da utilização ótima dos recursos naturais (DONGLI et al., 2014).

De acordo com Menezes et al. (2014), altas concentrações de sais na solução do solo têm efeito positivo na estrutura, porém a baixa concentração de sais relacionada com a alta concentração de sódio pode causar degradação estrutural do solo.

No solo, dependendo da natureza e concentração dos íons presentes, podem ocorrer danos inerentes à estrutura, como a dispersão de coloides e a formação de estratos impermeáveis, decorrentes da precipitação de carbonatos e silicatos, com reflexos indesejáveis no arejamento e na taxa de infiltração e percolação da água no perfil (FERREIRA; SILVA; RUIZ, 2016).

Paes et al. (2014), em experimento para avaliar o efeito do sódio na condutividade hidráulica do solo, constataram que o aumento da PST e a diminuição da CE da solução estão diretamente relacionados à redução da condutividade hidráulica saturada. Também observaram que a atuação da PST e da CE foi mais

acentuada em solos com alta atividade de argila ( $> 27\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ ), comprovando que a mineralogia da fração argila influencia diretamente nos danos causados pelos sais no perfil do solo.

Alguns estudos vêm demonstrando que, além da dispersão causada pelo sódio, outros elementos também são capazes de promover este fenômeno que acarreta na diminuição da condutividade hidráulica e, conseqüentemente, da permeabilidade dos solos. Em pesquisas desenvolvidas na Austrália, Bennett; Marchuk e Marchuk (2016) constataram que o elemento magnésio, quando presente em altas concentrações no solo (acima de 40% da CTC), também tem a capacidade de promover a dispersão das partículas coloidais do solo.

De acordo com Miranda et al. (2018), os compostos presentes na matéria orgânica dos solos agem, geralmente, como agentes floculantes, interferindo positivamente nas suas propriedades físicas e químicas, promovendo o aumento na condutividade hidráulica, infiltração de água e capacidade de troca catiônica (CTC) sendo o mesmo efeito esperado em solos afetados por sais.

Assim, muitos solos, quando submetidos à passagem de águas de má qualidade pela alta concentração de sais, acabam por tornar-se menos permeáveis, com decréscimos consideráveis na condutividade hidráulica do solo, chegando a valores nulos em alguns casos. Isto vem sendo medido pela concentração eletrolítica limite (CEL), sendo esta caracterizada como a concentração eletrolítica na qual a redução da condutividade hidráulica será entre 10 e 20% da máxima. Com base nos dados da CEL alguns modelos matemáticos vêm sendo ajustados para adequação do manejo de irrigação com os tipos de solos, principalmente de acordo com o teor e tipo de argila do solo (Ezlit et al., 2013; Dang et al., 2018).

Com o entendimento da dinâmica dos sais no solo e suas interferências nas propriedades químicas e físicas, é possível obter equações capazes de prever a redução na condutividade hidráulica do solo de acordo com a qualidade da água de irrigação.

Ezlit et al. (2013), em estudo com três tipos de solos da Austrália, comprovaram que a permeabilidade do solo está associada à mineralogia (teor e tipo de argila), à concentração de sais (medidos pela CE do solo) e à proporção de sódio trocável e solúvel (determinados pela PST e RAS) de cada solo.

Os autores observaram que a diminuição da permeabilidade do solo estava associada ao aumento nos teores de argila, juntamente com os teores de sódio solúvel

e trocável no solo, e isto se agravava com a diminuição na concentração total de sais. O solo que apresentou maior diminuição na condutividade hidráulica em meio saturado foi o de maior teor de argila e mais altas concentrações de sódio.

Com isso, é possível perceber que a dinâmica e o efeito dos sais nos solos estão associados ao conhecimento das propriedades químicas e físicas de cada solo, bem como de sua mineralogia. Para realizar o manejo adequado a um solo, seja em função da irrigação ou da aplicação de insumos, é fundamental o domínio das características deste, evitando sua degradação e conseqüente abandono de terras.

No semiárido do Brasil, são encontrados solos mais desenvolvidos como na maioria do país, no entanto, também aparecem solos em estágio inicial de formação. Estes últimos, geralmente com argila de atividade alta e muito reativas aos elementos presentes na água de irrigação. Exatamente nesta região onde a irrigação é um fator fundamental para a manutenção de elevadas produtividades e na qual as águas podem conter altos teores de sais. O conhecimento da concentração eletrolítica limite é fundamental para o manejo adequado de diferentes solos, especialmente nesta região. Isto possibilitaria a detecção de riscos à salinização e à sodificação de solos antes que estes processos fossem desencadeados, minimizando a degradação de solos e embasando estudos de recuperação em áreas já degradadas.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Solos estudados

Foram selecionadas amostras de horizontes diagnósticos de solos representativos do Estado de Pernambuco, conforme o teor de argila e o grau de desenvolvimento. Na seleção foi também considerada a localização dos perfis, procurando incluir solos das três regiões fisiográficas do Estado, Zona da Mata, Agreste e Sertão, em diferentes graus de evolução (Figura 1).



**Figura 1.** Mapa do Estado de Pernambuco com as indicações dos locais de coleta dos solos. Adaptado de IBGE 2020

Para obter solos com mineralogia e granulometria conhecidas, a seleção foi feita a partir de solos previamente estudados e classificados (Tabela 2) sendo eles: LATOSSOLO Amarelo distrófico húmico (ARAÚJO et al., 2017); NITOSSOLO Háplico acriférico típico (NEVES et al., 2018); ARGISSOLO Amarelo alumínico (COSTA et al., 2018); VERTISSOLO Ebânico órtico típico (LIMA, 2014); PLANOSSOLO Háplico eutrófico arênico salino vertissólico (SOUSA, 2020); NEOSSOLO Regolítico eutrófico típico (SANTOS, 2012); LUVISSOLO Crômico órtico sódico vertissólico sálico (SOUSA, 2018); CAMBISSOLO Flúvico sódico sálico e NEOSSOLO Flúvico Ta Eutrófico salino (SANTANA, 2015).

**Tabela 2.** Detalhamento das amostras de solos selecionadas para realização de ensaio de condutividade hidráulica em meio saturado

Símbolo	Solos	Horizonte	Profundidade (cm)	Região	Município	Coordenadas
LA	LATOSSOLO Amarelo Distrófico húmico	Bw	155-200 <sup>+</sup>	Zona da Mata	Itambé	7° 25'23,2" S 35°10'51,5" W
NX	NITOSSOLO Háptico Acriférico típico	Bn1	50-90	Zona da Mata	Sirinhaém	8°35'30" S 35°6'59" W
PA	ARGISSOLO Amarelo Alumínico	Bt	50-70 <sup>+</sup>	Zona da mata	Cabo de Santo Agostinho	8°18'0" S 35°01'26" W
RR	NEOSSOLO Regolítico Eutrófico típico	A	0-15	Agreste	Caeté	8°29'50" S 36°14'28" W
VE	VERTISSOLO Ebânico Órtico típico	Biv	20-68	Agreste	Cachoeirinha	08°29'53" S 36°14'25" W
SX	PLANOSSOLO Háptico Eutrófico arênico salino vertissólico	Btg	80 <sup>+</sup>	Agreste	Lagoa do Ouro	9°8'29,8" S 36°28'38,8" W.
TC	LUVISSOLO Crômico Órtico sódico vertissólico sálico	Btvnz	20-40	Sertão	Belém do São Francisco	8°44'26,1" S 38°51'29,9" W.
CY	CAMBISSOLO Flúvico Sódico sálico	Binz1	26-66	Sertão	Cabrobó	8°30'45" S 39°22'59" W
RF	NEOSSOLO Flúvico Ta Eutrófico salino	Ap	0-15	Sertão	Cabrobó	8°30'56" S 39°23'06" W

As amostras dos solos foram coletadas nos horizontes diagnósticos de cada perfil, conforme a localização obtida nos trabalhos referenciados. Após a coleta, as amostras com estrutura deformada foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm para caracterização dos solos. No momento dessa coleta, também foi realizada a coleta de anéis volumétricos de solo com estrutura preservada, para as análises físicas que assim exigiram.

### **3.2. Caracterização das amostras de solos**

Para a caracterização das amostras dos solos, foram realizadas as análises físicas, químicas e mineralógicas.

#### **3.2.1. Caracterização química**

Na caracterização química dos solos foram realizadas as análises de pH do solo em água (1:2,5); pH, condutividade elétrica (CE) e cátions solúveis ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ), no extrato da pasta saturada; cátions trocáveis extraídos pelo método do acetato de amônio; capacidade de troca catiônica pelo método do cátion índice; alumínio trocável extraído por KCl; e acidez potencial ( $\text{H} + \text{Al}$ ) extraída por acetato de cálcio. (Tabelas 3 e 4).

Os íons  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  foram dosados por fotometria de emissão de chama e  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  por espectrofotometria de absorção atômica. O carbono orgânico total (COT) foi determinado por via úmida com dicromato de potássio.

Também foram calculados os valores de saturação por bases (V), saturação por sódio (PST), saturação por alumínio (m), relação de sódio trocável (RST), relação de adsorção de sódio (RAS) dos solos antes da aplicação das águas. Os métodos adotados estão descritos por EMBRAPA (2017) e USSS STAFF (1954).

**Tabela 3.** Caracterização química dos solos: pH,  $\Delta$ pH, condutividade elétrica do extrato de pasta saturada (CEes), cátions solúveis e relação de adsorção de sódio (RAS)

Solo	pH	pH	$\Delta$ pH <sup>1</sup>	CEes	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	RAS
	água	KCl							
Latossolo Amarelo	4,65	4,00	-0,65	0,25	0,37	0,67	1,46	0,04	2,02
Nitossolo Háplico	4,73	3,95	-0,78	0,22	0,26	0,28	1,01	0,08	1,93
Argissolo Amarelo	4,83	3,87	-0,96	0,17	0,30	0,09	0,94	0,05	2,14
Neossolo Regolítico	5,82	5,05	-0,77	0,42	0,73	0,34	0,92	0,40	1,26
Vertissolo Ebânico	8,78	6,49	-2,28	1,00	1,23	1,83	6,71	0,12	5,42
Planossolo Háplico	6,79	5,14	-1,65	3,72	2,77	5,28	33,43	0,27	16,66
Luvissolo Crômico	7,00	5,56	-1,44	0,67	2,38	1,85	3,21	0,03	2,21
Cambissolo Flúvico	6,07	5,53	-0,53	22,35	70,89	62,21	196,2	0,25	24,05
Neossolo Flúvico	7,39	6,99	-0,40	2,79	17,09	5,08	2,10	3,04	0,63

<sup>1</sup>Valor calculado:  $\Delta$ pH=pH<sub>KCl</sub>-pH<sub>água</sub>.

**Tabela 4.** Caracterização química dos solos: cátions trocáveis, acidez potencial, capacidade de troca catiônica (T), saturação por bases (V), saturação por alumínio (m), porcentagem de sódio trocável (PST) e carbono orgânico total (COT)

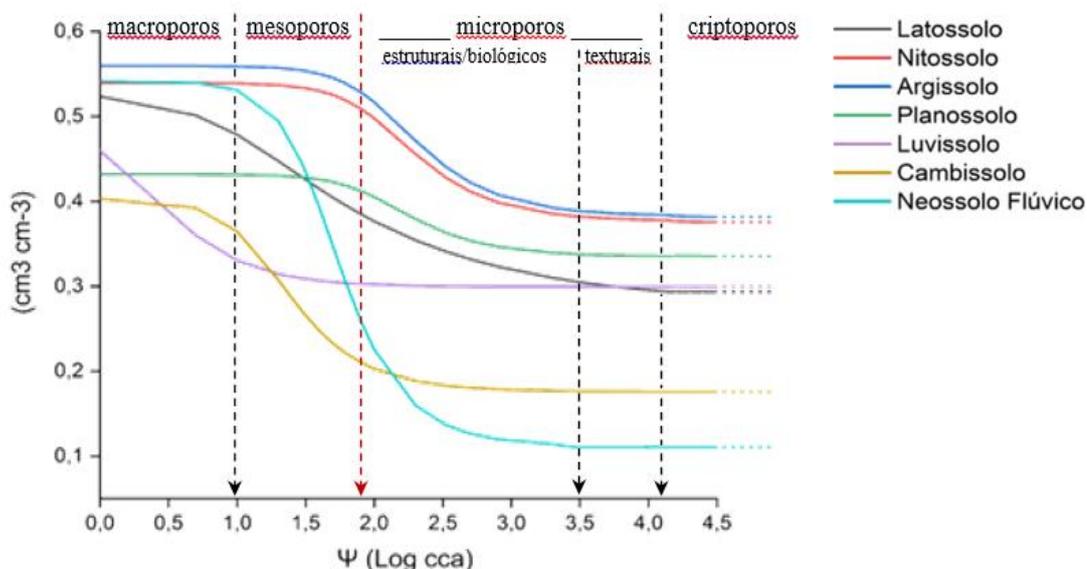
Solo	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup>	H+Al	T	V	m	PST	COT
	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>						%	%	%	g kg <sup>-1</sup>	
Latossolo Amarelo	1,15	0,52	0,07	0,07	1,46	4,50	6,31	28,68	44,64	1,09	4,45
Nitossolo Háplico	2,00	0,46	0,04	0,12	4,99	8,79	11,41	22,96	65,57	0,34	6,15
Argissolo Amarelo	0,58	0,32	0,13	0,18	12,02	16,30	17,50	6,91	90,85	0,80	7,83
Neossolo Regolítico	1,22	0,35	0,00	0,10	0,00	0,72	2,39	69,87	0	0,00	5,39
Vertissolo Ebânico	18,08	12,42	1,12	0,44	0,00	0,00	32,06	100	0	3,48	5,09
Planossolo Háplico	5,55	8,86	2,21	0,47	0,00	1,12	18,21	93,85	0	12,15	2,63
Luvissolo Crômico	10,46	6,70	0,18	0,20	0,00	1,06	18,60	94,30	0	0,97	5,28
Cambissolo Flúvico	5,08	2,82	1,33	0,14	0,00	0,60	9,97	93,98	0	13,31	2,58
Neossolo Flúvico	8,82	1,79	0,05	0,84	0,00	0,43	11,93	96,40	0	0,42	16,23

### 3.2.2. Caracterização física

As propriedades físicas avaliadas foram a textura, com análise da composição granulométrica e argila dispersa em água, pelo método da pipeta conforme proposto por Ruiz (2005); densidade das partículas pelo método do balão volumétrico e densidade do solo pelo método do anel volumétrico (Tabela 5) (EMBRAPA, 2017).

Devido a textura arenosa do Neossolo Regolítico, não foi possível fazer coleta de anéis volumétricos, sendo necessária a montagem do anel volumétrico em laboratório para determinação da densidade deste solo. Para o Vertissolo, também não foi possível realizar a coleta de anéis pela presença das fendas características desta classe de solo. Por esses motivos, a densidade do solo deste solo foi realizada pelo método do torrão (EMBRAPA, 2017)

Com os resultados de argila total e argila dispersa em água foi calculado o grau de floculação dos solos. Foi realizado o ensaio da curva característica de retenção de água no solo (CCRAS), nos anéis volumétricos coletados, com aplicação de tensões em centímetro de coluna de água (cca) que possibilitou determinar a porosidade total e o fracionamento dos poros (Figura 2) exceto para o Neossolo Regolítico e Vertissolo pela impossibilidade de coleta dos anéis volumétricos. As curvas foram ajustadas pelo modelo e van Genutchen (Tabela 6).



**Figura 2.** Curvas características de retenção de água dos solos Latossolo, Nitossolo, Argissolo, Planossolo, Luvissole, Cambissolo e Neossolo Flúvico

**Tabela 5.** Valores dos parâmetros da equação de van Genuchten utilizados nos ajustes do modelo da curva característica de retenção de água no solo

Solo	$\Theta_R$	$\Theta_S$	$\alpha$	n
Latossolo Amarelo	0,27854	0,5235	0,1061	1,3833
Nitossolo Háplico	0,3763	0,5394	0,0089	2,0050
Argissolo Amarelo	0,3822	0,5597	0,0085	2,0050
Planossolo Háplico	0,3400	0,4318	0,0024	2,0050
Luvissolo Crômico	0,2993	0,4596	0,4640	2,0575
Cambissolo Flúvico	0,1760	0,4078	0,0586	1,1283
Neossolo Flúvico	0,1122	0,5204	0,00851	2,005

As amostras foram saturadas por 48 horas e colocadas na mesa de tensão (para tensões até 10 kPa) e câmara de Richards (para tensões de 33 à 1500 kPa). Foram aplicadas tensões de 1, 6, 10, 33, 80, 300 e 1500 kPa para determinação de macroporos, mesoporos, capacidade de campo de solos arenosos e argilosos, água disponível, microporos estruturais e texturais, respectivamente. A porosidade total foi determinada pela amostra saturada e a seca a 105°C e os crioporos após secagem a 105°C (EMBRAPA, 2017).

**Tabela 6.** Caracterização física do solo

Solo	Análise granulométrica				GF <sup>1</sup>	D <sub>s</sub> <sup>2</sup>	D <sub>p</sub> <sup>3</sup>	P <sup>4</sup>
	Areia		Silte	Argila				
	Grossa	Fina						
g kg <sup>-1</sup>		g kg <sup>-1</sup>		%	g cm <sup>-3</sup>		%	
Latossolo Amarelo	124,40	67,78	92,21	715,60	100	1,45	2,68	52,30
Nitossolo Háplico	247,01	89,60	162,73	481,53	100	1,33	2,85	56,37
Argissolo Amarelo	191,24	110,04	202,95	496,68	100	1,32	2,75	59,10
Neossolo Regolítico	697,72	179,12	94,94	28,22	29	1,67	2,76	ND <sup>5</sup>
Vertissolo Ebânico	181,35	127,76	266,13	424,98	95	1,65	2,69	ND <sup>5</sup>
Planossolo Háplico	365,67	127,76	89,98	416,59	22	1,71	2,68	43,20
Luvissolo Crômico	278,50	293,00	127,26	301,23	63	1,95	2,87	45,97
Cambissolo Flúvico	73,53	348,41	347,24	230,82	93	1,67	2,71	41,22
Neossolo Flúvico	50,15	531,10	298,77	119,97	68	1,31	2,55	56,39

<sup>1</sup>Grau de flocculação; <sup>2</sup>Densidade do solo; <sup>3</sup>Densidade das partículas; <sup>4</sup>Porosidade total (determinada pelo método da saturação); <sup>5</sup>Não determinada.

### 3.2.3. Caracterização mineralógica

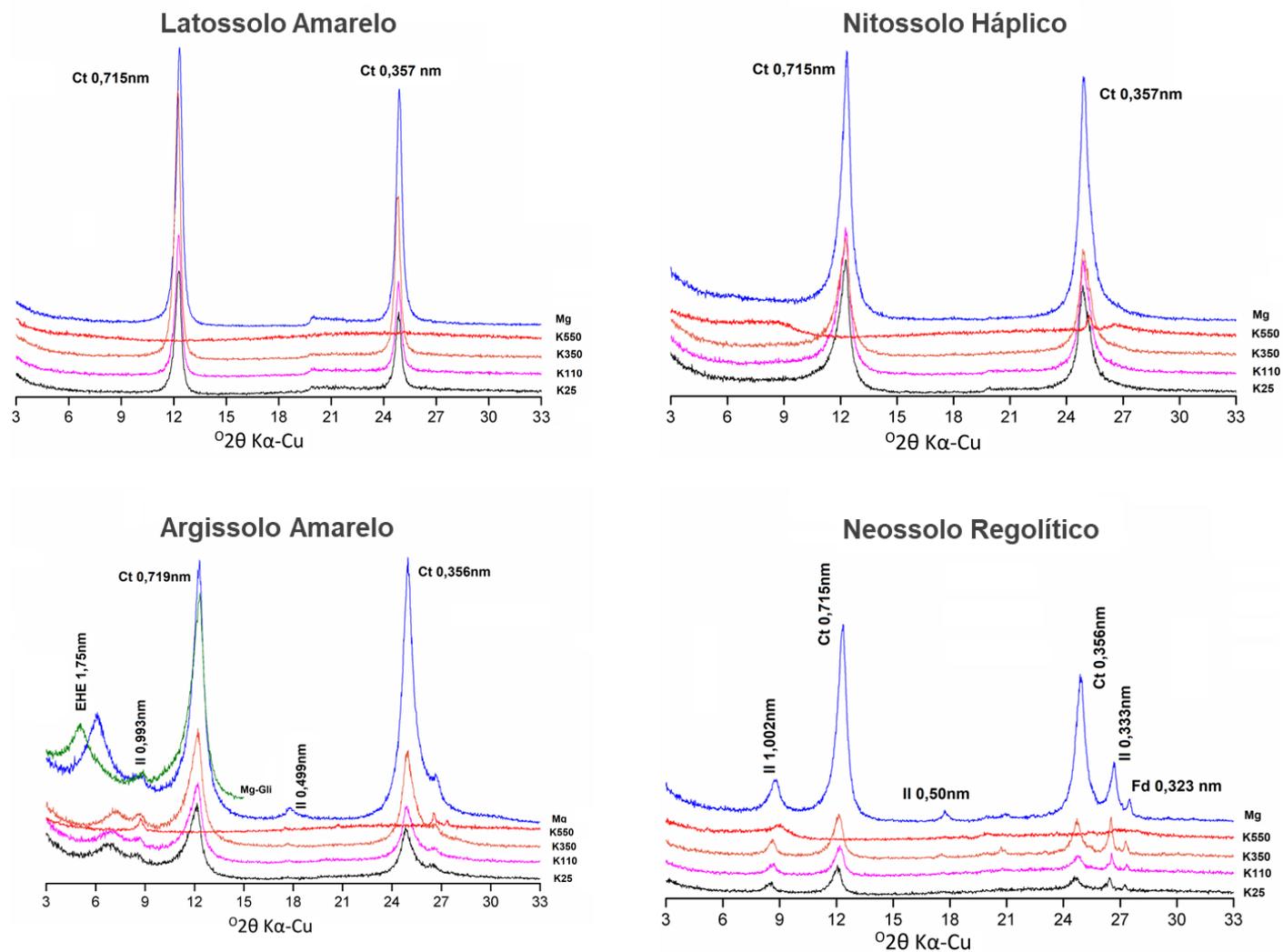
Para a caracterização mineralógica da fração argila dos solos, foram determinados os óxidos de ferro cristalinos e amorfos (Tabela 7), extraídos com solução de ditionito-citrato-bicarbonato e oxalato de sódio, respectivamente, e o ferro foi dosado por espectrofotometria de absorção atômica (MEHRA; JACKSON, 1958).

Também foi realizada a análise mineralógica da fração argila por difração de raios-x (Figuras 3, 4, 5 e 6), com os tratamentos necessários para identificação de argilominerais do tipo 1:1, dos tipos 2:1 e óxidos, de acordo com EMBRAPA (2017). Para identificação e caracterização dos minerais presentes na fração argila foram realizados tratamentos de saturação por K e Mg. Para as amostras saturadas com K (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>) foram realizados sucessivos tratamentos de aquecimento (25, 110, 350 e 550 °C) e as amostras saturadas com Mg (MgCl<sub>2</sub> 1 mol L<sup>-1</sup>) foram posteriormente solvatadas com glicerol para análise das amplitudes dos minerais (JACKSON, 1975).

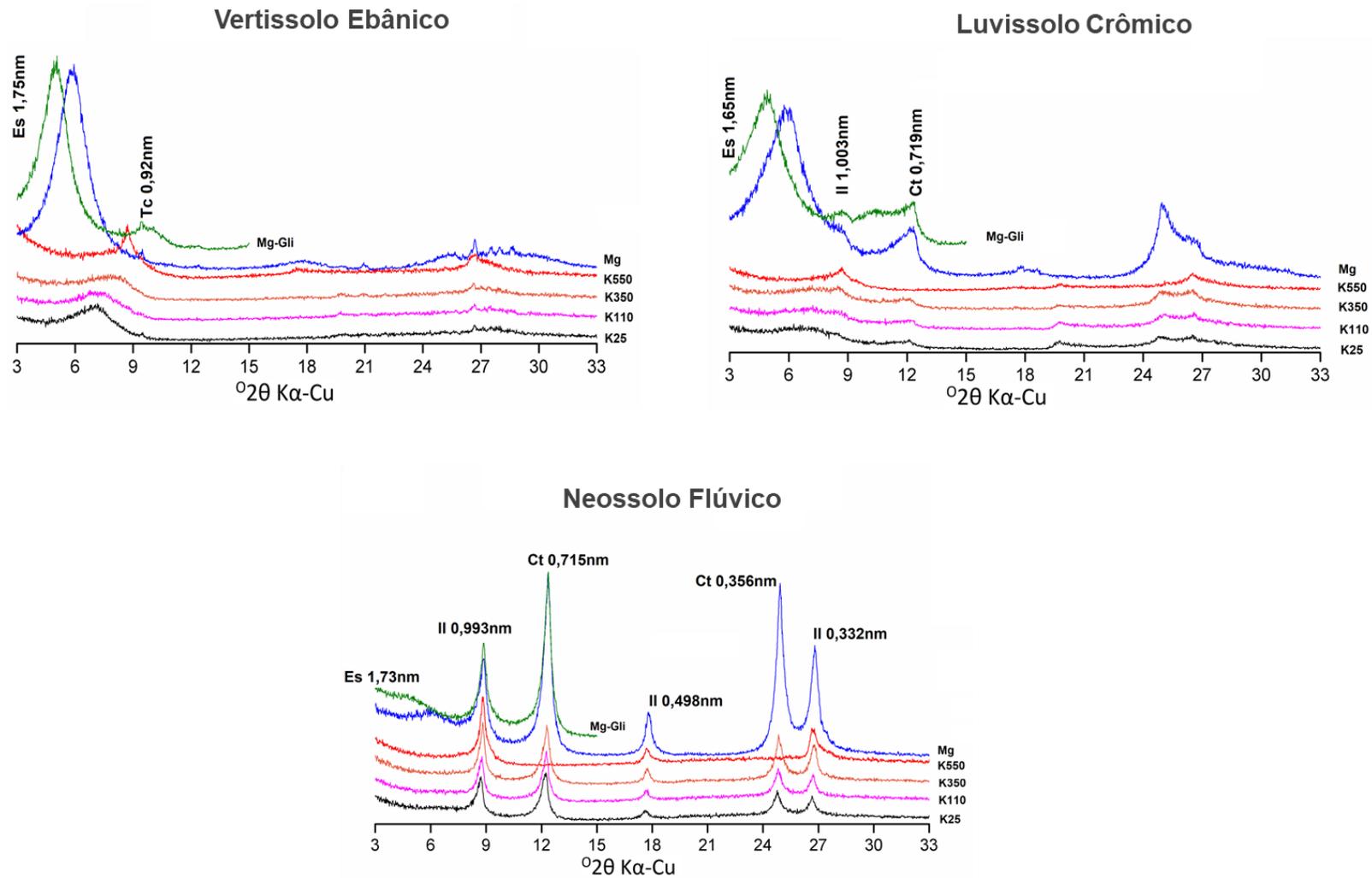
A identificação dos minerais da fração argila foi realizada pelo espaçamento interplanar (d) e pelo comportamento dos picos de difração de acordo com os tratamentos de saturação (K e Mg) e térmicos (JACKSON, 1975; BROWN; BRINDLEY, 1980; MOORE; REYNOLDS, 1989).

**Tabela 7.** Valores de óxidos de ferro livre extraído com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (Fed), ferro amorfo extraído com oxalato de sódio (Feo) e a relação entre ferro livre e ferro amorfo

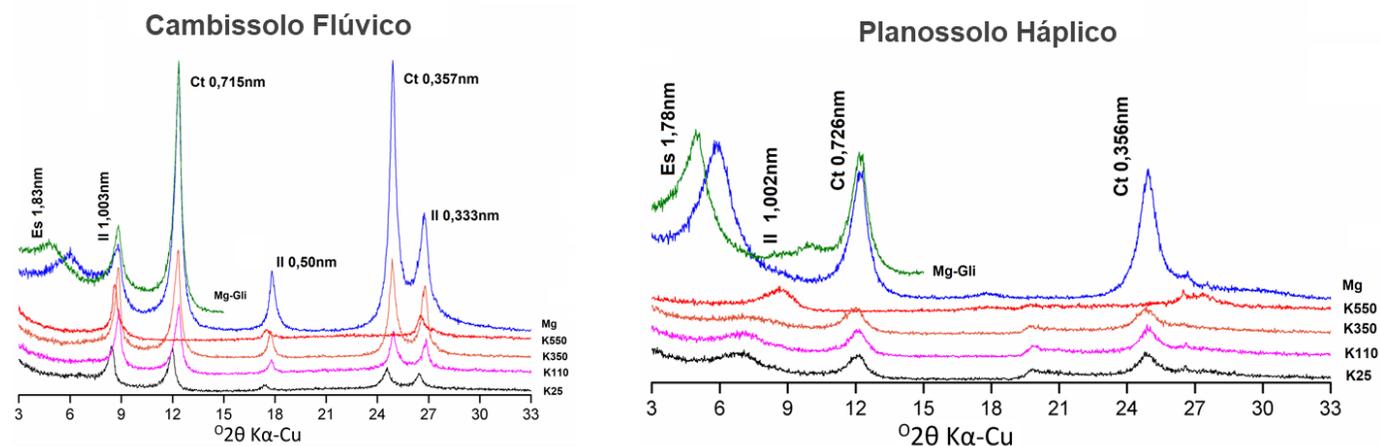
Solo	Horizonte	g kg <sup>-1</sup>		Feo/Fed
		Fed	Feo	
Latossolo Amarelo	Bw	26,69	0,36	0,01
Nitossolo Háplico	Bt1	122,77	2,46	0,02
Argissolo Amarelo	Bt	8,40	2,79	0,33
Neossolo Regolítico	A	0,83	0,24	0,29
Vertissolo Ebânico	Biv	6,14	1,36	0,22
Planossolo Háplico	Btg	10,76	1,18	0,11
Luvissolo Crômico	Btvnz	25,22	1,76	0,07
Cambissolo Flúvico	Binz1	20,56	2,24	0,11
Neossolo Flúvico	Ap	7,44	1,37	0,18



**Figura 3.** Difractogramas de raios-x da fração argila dos horizontes estudados no Latossolo Amarelo, Nitossolo Háplico, Argissolo Amarelo e Neossolo Regolítico. Ct – Caulinita, Gh – Goethita, Hm – Hematita, EHE – Esmeclita com Hidroxi-Alumínio entre camadas, Il – Ilita, Fd – Feldspato

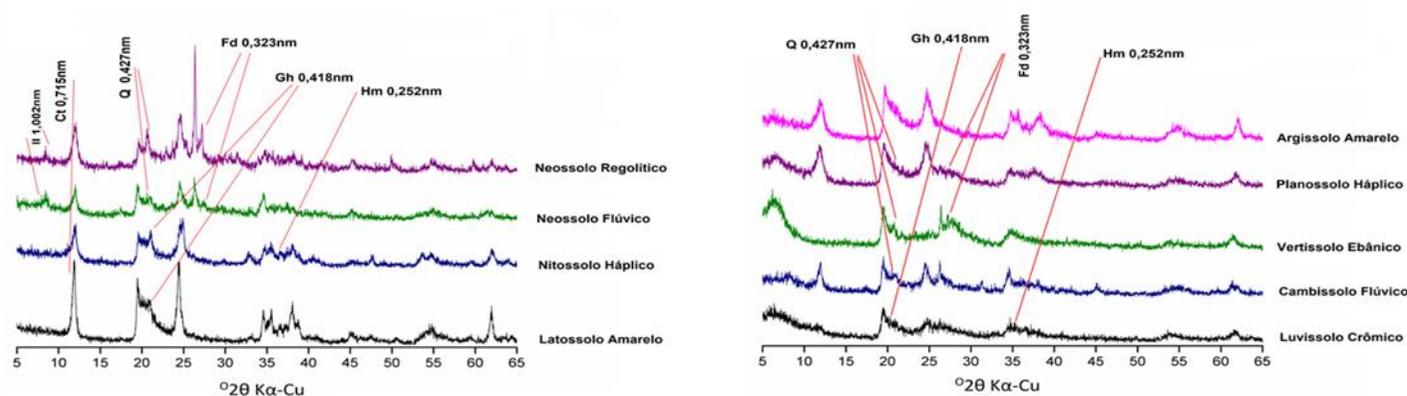


**Figura 4.** Difratoformas de raios-x da fração argila dos horizontes estudados no Vertissolo Ebânico, Luvisso Crômico e Neossolo Flúvico. Ct – Caulinita, Gh – Goethita, Hm – Hematita, Es – Esmedtita, Il – Ilita, Tc - Talco



**Figura 5.** Difratogramas de raios-x da fração argila dos horizontes estudados no Cambissolo Flúvico e Planossolo Háplico. Ct – Caulinita, Es – Esmeclita e Il – Ilita

### Argilas sem tratamento



**Figura 6.** Difratograma das argilas sem tratamento dos nove solos estudados. Ct – Caulinita, Q – Quartzo, Fd – Feldspato, Il – Ilita, Gh – Goethita, Hm - Hematita.

### 3.3. Montagem e condução do experimento de condutividade hidráulica em meio saturado.

O experimento foi realizado em arranjo fatorial 9 x 5 x 5 (9 solos, 5 valores de CE e 5 valores de RAS da água de irrigação). Em cada amostra de solo previamente selecionada foram aplicadas as 25 soluções salinas (soluções percolantes), correspondendo aos valores de CE de 100, 600, 1.500, 2.500 e 4.000  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , e aos valores de RAS de 0, 5, 12, 20 e 30 ( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ )<sup>0,5</sup>.

Os ensaios foram conduzidos em blocos casualizados no tempo, com uma repetição por bloco. No total, foram nove solos, cinco valores de CE, cinco valores de RAS, em quatro blocos (repetições), perfazendo 900 unidades experimentais. Para a montagem do experimento, foram preparadas colunas em tubos de PVC de 5 cm de diâmetro e 15 cm de comprimento, contendo 100  $\text{cm}^3$  de amostra de solo com estrutura deformada.

Os solos foram cuidadosamente acomodados nos tubos até atingir a densidade característica de cada solo, realizada pelo método do anel volumétrico coletado em campo. Após a montagem das colunas de solo, foram utilizadas soluções saturantes (Tabela 8) para o ajuste da relação Na:Ca para estabelecimento da RAS de cada tratamento e diminuição da influência de outros cátions, como  $\text{Mg}^{+2}$  e  $\text{K}^+$ , nos coloides do solo. Posteriormente foram aplicadas as soluções percolantes (Tabela 9), em diferentes concentrações e variadas proporções Na/Ca.

**Tabela 8.** Concentração dos sais cloreto de sódio e cloreto de cálcio nas soluções saturantes para estabelecimento da relação de adsorção de sódio (RAS) almejada

RAS	NaCl	CaCl <sub>2</sub>
( $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ ) <sup>1/2</sup>	mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	
0	0	50,00
5	19,52	30,48
12	33,97	16,03
20	41,42	8,58
30	45,42	4,58

**Tabela 9.** Concentração dos sais cloreto de sódio e cloreto de cálcio de acordo com a RAS estabelecida para as soluções percolantes

RAS (mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> ) <sup>1/2</sup>	NaCl mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>	CaCl <sub>2</sub> mmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup>
Conductividade elétrica 100 μS cm <sup>-1</sup>		
0	0,00000	1,00000
5	0,93080	0,06920
12	0,98650	0,01350
20	0,99505	0,00495
30	0,99779	0,00221
Conductividade elétrica 600 μS cm <sup>-1</sup>		
0	0,00000	6,00000
5	4,43010	1,56990
12	5,56930	0,43070
20	5,83010	0,16990
30	5,92207	0,07793
Conductividade elétrica 1.500 μS cm <sup>-1</sup>		
0	0,00000	15,00000
5	8,80300	6,19700
12	12,74430	2,25570
20	14,01760	0,98240
30	14,53080	0,46920
Conductividade elétrica 2.500 μS cm <sup>-1</sup>		
0	0,00000	25,00000
5	12,50000	12,50000
12	19,64180	5,35820
20	22,47450	2,52550
30	23,74690	1,25310
Conductividade elétrica 4.000 μS cm <sup>-1</sup>		
0	0,00000	40,00000
5	16,96780	23,03220
12	28,62200	11,37800
20	34,16410	5,83590
30	36,96380	3,03620

As soluções utilizadas para o ajuste da relação Na:Ca (soluções saturantes) foram preparadas de forma a chegar a uma concentração final de  $50 \text{ mmolc L}^{-1}$ , a partir dos sais NaCl e  $\text{CaCl}_2$ , nos valores de RAS estabelecidos [0, 5, 12, 20 e  $30 (\text{mmolc L}^{-1})^{0,5}$ ], conforme Freire et al. (2003).

A condutividade elétrica (CE) de cada solução percolante foi medida ao longo do experimento e estes foram os valores realmente utilizados nos ajustes matemáticos da condutividade hidráulica ao final do experimento (Tabela 10).

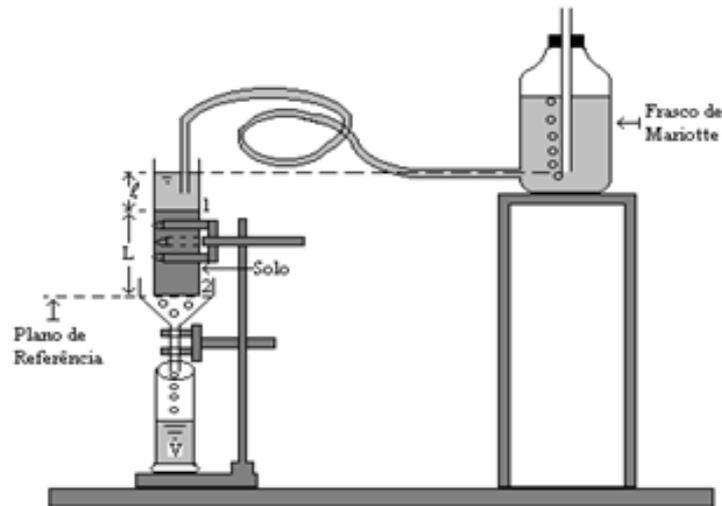
**Tabela 10.** Correção da condutividade elétrica com valores da CE calculada e a determinada para as soluções percolantes

$CE_e$ $\mu\text{S cm}^{-1}$	$CE_d$ $\mu\text{S cm}^{-1}$
100	128
600	718
1500	1709
2500	2865
4000	4671

$CE_e$  – Condutividade elétrica estimada;  $CE_d$  – Condutividade elétrica determinada

Os tubos de PVC contendo solo foram postos para saturar em recipientes de polietileno com a solução saturante, conforme o tratamento, até uma altura correspondente a  $2/3$  da altura da amostra de solo. Isso foi feito para que a saturação ocorresse no sentido ascendente, eliminando ao máximo o ar do espaço poroso do solo.

Permaneceram assim por um período de 48 horas, quando foram montados os permeâmetros de coluna vertical e carga constante (Figura 7) (FREIRE, 2001). Foi então iniciada a passagem da solução percolante até que o equilíbrio fosse alcançado, quando a condutividade elétrica da solução de saída (lixiviada) da coluna era semelhante à da solução percolante. Posteriormente, as colunas de solo foram mantidas nos recipientes com as soluções saturantes por mais 24 horas.



**Figura 7** - Esquema de um permeâmetro de coluna vertical e carga constante adaptado de FREIRE (2001)

Após a finalização do ajuste da relação Na:Ca, os permeâmetros foram remontados para determinar a condutividade hidráulica em meio saturado. As soluções foram aplicadas às colunas utilizando-se o sistema do “frasco de Mariotte” para a manutenção da carga constante.

Como as amostras estavam saturadas com uma solução concentrada ( $50 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$ ), foi percolado o volume suficiente de solução percolante correspondente a cada tratamento para assegurar o equilíbrio da solução do solo com a condutividade elétrica da solução de trabalho. Foram feitas leituras de condutividade elétrica para certificação de que a CE da solução de entrada era semelhante a CE da solução lixiviada. Após a percolação, seguiu-se o procedimento de determinação da condutividade hidráulica em meio saturado em laboratório (FREIRE, 2001). Os volumes percolados por unidade de tempo foram registrados, calculando-se a condutividade hidráulica em meio saturado após equilíbrio:

$$K_{sat} = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot (h + L)}$$

Em que,

$K_{sat}$  é a condutividade hidráulica em meio saturado ( $\text{cm h}^{-1}$ );  $V$  é o volume percolado ( $\text{cm}^3$ );  $L$  é a espessura da amostra de solo (cm);  $A$  é a área da secção transversal da coluna de solo ( $\text{cm}^2$ );  $t$  é o tempo (h) e  $h$  é a carga hidráulica (cm).

### **3.4. Análise estatística**

As características estudadas foram avaliadas aplicando-se análise de variância para avaliação dos solos conforme a semelhança no comportamento da condutividade hidráulica. Foram ajustadas equações de regressão múltiplas das variáveis analisadas em função da CE e da RAS das águas de irrigação, elaborando-se superfícies de resposta, as quais preveem o comportamento dos diferentes solos quando irrigados com as águas com teores crescentes de sais. Foi escolhido o modelo com maior coeficiente de determinação, que apresentou parâmetros significativos até 10% pelo teste t.

Com as equações obtidas, foram estimados os valores de concentração eletrolítica limite (CEL), que promovessem decréscimo de 20% na condutividade hidráulica máxima, bem como a concentração eletrolítica que conduziria à condutividade hidráulica nula para os nove solos avaliados de Pernambuco, indicando problemas de irrigação em situações de diferentes valores de CE e RAS da água a ser utilizada.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Condutividade hidráulica em meio saturado

Os resultados dos ensaios de condutividade hidráulica em meio saturado ( $K_{sat}$ ) evidenciaram que os solos possuem comportamentos distintos quando irrigados com águas de diferentes valores de CE e RAS. Diferenças na condutividade hidráulica das diversas classes de solo também foram identificadas por Paes et al. (2014), onde os pesquisadores verificaram alta discrepância nos valores da  $K_{sat}$  entre cada tipo de solo, comprovando a não homogeneidade da variável.

Houve um comportamento aproximado entre alguns solos, que foram agregados em função da permeabilidade. A permeabilidade média verificada está entre moderadamente rápida a muito lenta, a depender das propriedades granulométricas e mineralogia de cada solo (Tabela 11).

Segundo Klute (1965), as classes de permeabilidade dos solos, em velocidade de infiltração básica, são: muito lento ( $VIB < 0,125 \text{ cm h}^{-1}$ ); lento ( $0,125 \leq VIB < 0,5 \text{ cm h}^{-1}$ ); moderadamente lento ( $0,5 \leq VIB < 2,0 \text{ cm h}^{-1}$ ); moderado ( $2,0 \leq VIB < 6,25 \text{ cm h}^{-1}$ ); moderadamente rápido ( $6,25 \leq VIB \leq 12,5 \text{ cm h}^{-1}$ ); rápido ( $12,5 < VIB \leq 25 \text{ cm h}^{-1}$ ); muito rápido ( $VIB > 25 \text{ cm h}^{-1}$ ).

**Tabela 11.** Classificação dos solos estudados pela velocidade de infiltração de água com base em Klute (1965)

Solo	Classificação da permeabilidade
Latossolo Amarelo	Moderada
Nitossolo Háplico	Moderada
Argissolo Amarelo	Moderada
Neossolo Regolítico	Moderadamente Rápida
Vertissolo Ebânico	Moderada a Muito Lenta
Planossolo Háplico	Lenta a Muito Lenta
Luvissolo Crômico	Moderada a Lenta
Cambissolo Flúvico	Lenta a Muito Lenta
Neossolo Flúvico	Moderado

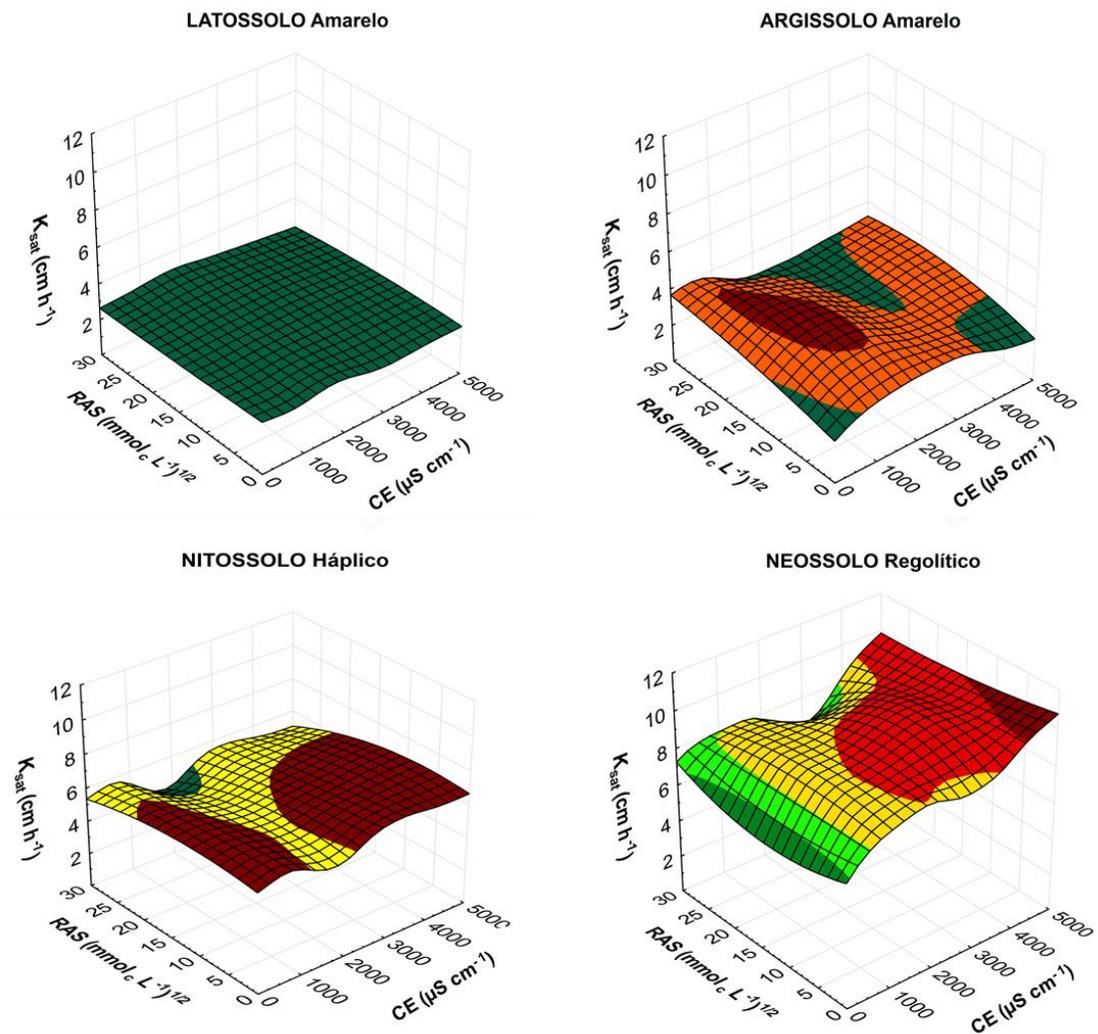
Com os dados de  $K_{sat}$  foram obtidas superfícies de resposta em função da condutividade elétrica (CE) e da relação de adsorção de sódio (RAS) das soluções

percolantes como mostram as Figuras 8, 9 e 10. A aplicação dos tratamentos não promoveu alterações significativas na  $K_{sat}$  do Latossolo Amarelo, Argissolo Amarelo e Nitossolo Háplico, não sendo possível o ajuste de equações de regressão (Figura 8).

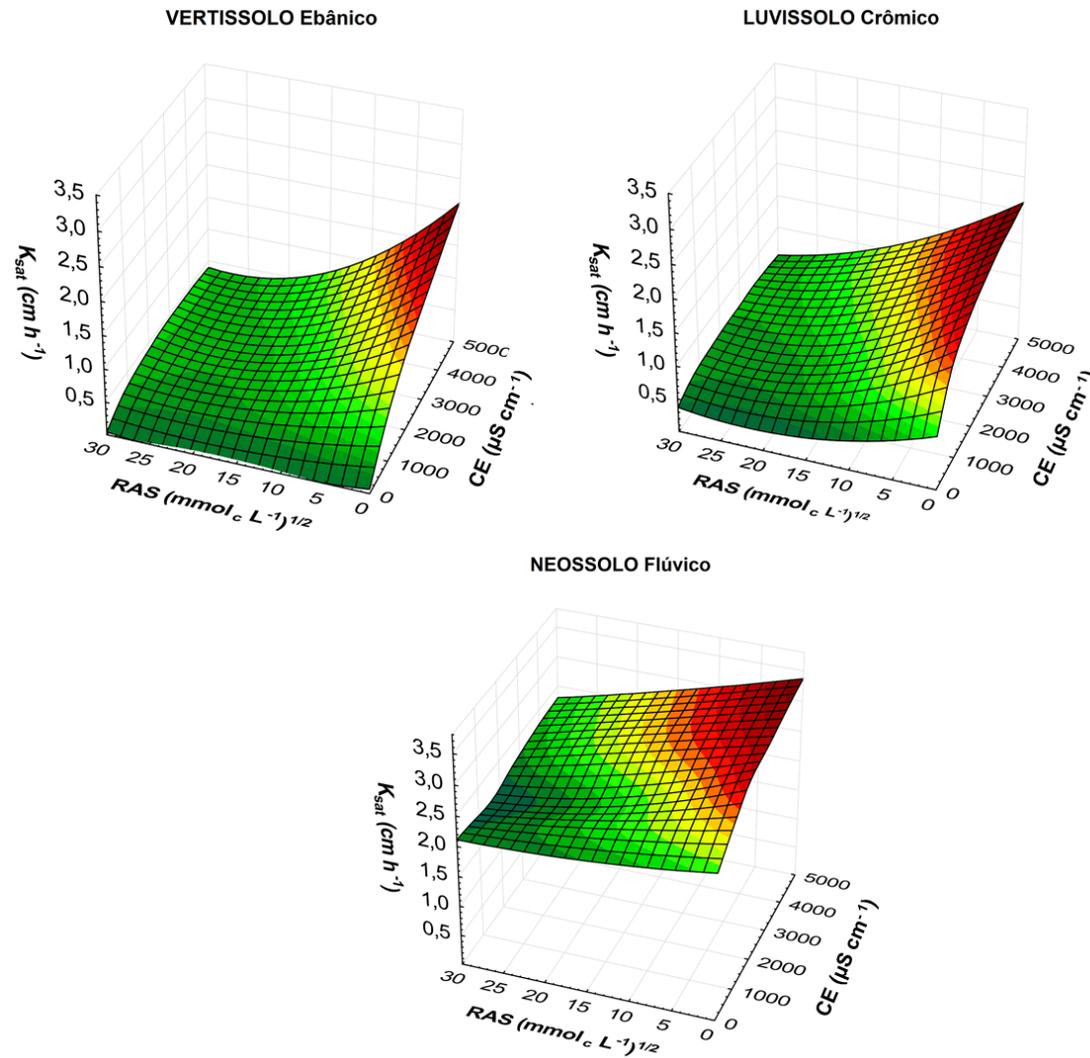
Por outro lado, o Neossolo Regolítico foi influenciado pela qualidade das águas aplicadas, com diminuição da condutividade hidráulica em baixos valores de CE e altos de RAS (Figura 8). Os três primeiros solos são mais argilosos, evoluídos, com pH ácido, presença de alumínio trocável (Tabelas 3 e 4) e teores de ferro bem superiores ao do Neossolo Regolítico (Tabela 7). Com estas características, espera-se que haja a formação de agregados estáveis no Latossolo, Argissolo e Nitossolo, verificada indiretamente pelo alto grau de flocculação, baixa densidade do solo e porosidade alta (Tabela 6) com grande proporção de microporos (Figura 2), possibilitando a passagem das águas salinas com pouca interação com os coloides internos aos agregados. Já no Neossolo Regolítico, com grau de flocculação de apenas 29% (Tabela 6), eletronegatividade, pH e  $\Delta pH$  mais altos (Tabela 3), os coloides tendem a permanecer mais em contato com a solução percolante, sendo dispersos mais facilmente.

Freire et al. (2003) observaram comportamentos semelhantes aos primeiros solos deste estudo, com um Argissolo Amarelo e Argissolo Vermelho-Amarelo do estado de Pernambuco, sendo estes, também, solos evoluídos e com presença significativa de óxidos. Contrariamente, solos mais arenosos como Neossolo Flúvico e Neossolo Regolítico foram mais reativos. Os autores indicam que, não só a textura, como também a mineralogia dos solos, foram responsáveis pelas diferentes respostas observadas, similarmente ao verificado no presente estudo.

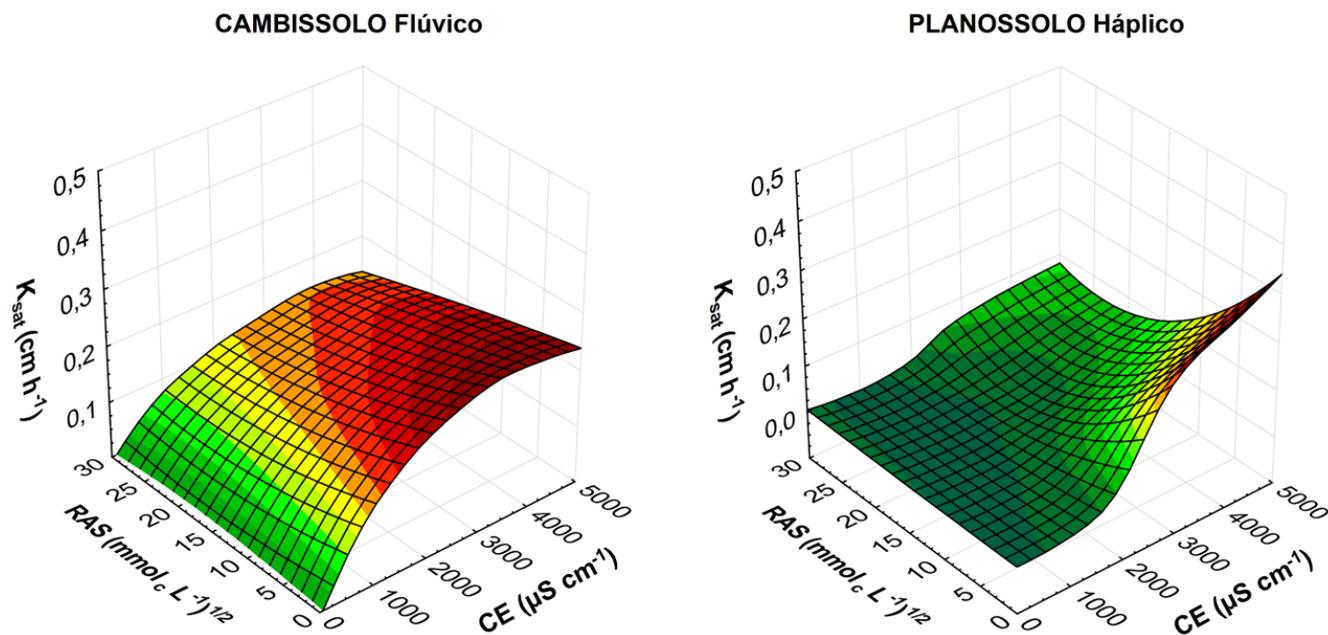
Dentre esses solos, o Latossolo possui o maior teor de argila (71,56%), seguido do Argissolo (49,67%) e Nitossolo (48,15%) (Tabela 6). O alto teor de argila no Latossolo influenciou diretamente na  $K_{sat}$  média, pois, dentre estes, foi o que apresentou valores menores de  $K_{sat}$ , indicando que o teor de argila influencia na  $K_{sat}$ , porém as concentrações dos sais das soluções percolantes não modificou a  $K_{sat}$  nos tratamentos devido a mineralogia (caulinita e óxidos) deste solo. O Nitossolo apresentou maiores valores de  $K_{sat}$ , evidenciando a ação da textura e da mineralogia neste atributo, visto que este solo tem as maiores concentrações de ferro (122,77 g  $kg^{-1}$ ) (Tabela 7), com presença dos óxidos hematita e goethita (Figura 3), responsáveis pelo aumento da flocculação, estabilidade dos agregados e macroporosidade.



**Figura 8.** Superfícies de resposta da condutividade hidráulica em meio saturado dos solos Latossolo Amarelo, Argissolo Amarelo, Nitossolo Háplico e Neossolo Regolítico submetidos à irrigação com águas de valores crescentes de condutividade elétrica (CE) e relação de adsorção de sódio (RAS). Solos com condutividade hidráulica de moderada a moderadamente rápida



**Figura 9.** Superfícies de resposta da condutividade hidráulica em meio saturado dos solos Vertissolo Ebânico, Luvisolo Crômico e Neossolo Flúvico submetidos à irrigação com águas de valores crescentes de condutividade elétrica (CE) e relação de adsorção de sódio (RAS). Solos com condutividade hidráulica de moderada a muito lenta



**Figura 10.** Superfícies de resposta da condutividade hidráulica em meio saturado dos solos Cambissolo Flúvico e Planossolo Háplico submetidos à irrigação com águas de valores crescentes de condutividade elétrica (CE) e relação de adsorção de sódio (RAS). Solos com condutividade hidráulica de lenta a muito lenta

O pH ácido e a alta concentração de alumínio trocável no Latossolo, Nitossolo e Argissolo, de 1,46; 4,99 e 12,02  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , respectivamente (Tabela 4), também promovem condições físico-químicas que permitem uma maior flocculação das argilas.

O alumínio, por ser trivalente e ter pequeno raio hidratado, possui alta afinidade com os coloides de carga negativa do solo, neutralizando-os e permitindo a formação de agregados estáveis. Assim, é possível que a solução saturante de ajuste da relação Ca:Na não tenha sido eficiente no deslocamento de boa parte do alumínio trocável e saturação com sódio em águas de maiores valores de RAS.

Por outro lado, estes três solos têm dominância de caulinita e óxidos como minerais (Figura 3), apesar de também ser observada a presença de esmectita e illita no difratograma da fração argila do Argissolo Amarelo. A presença de esmectita é condição incomum para solos com alto grau de intemperismo como este solo da Zona da Mata de Pernambuco.

Possivelmente, isto ocorre devido ao seu material de origem, estando este solo situado na bacia sedimentar do Cabo de Santo Agostinho (PE) e tendo sido originado a partir de conglomerados de argilito que possuem esmectita em sua composição, fato este descrito por Costa et al. (2018).

Apesar da presença deste mineral, o caráter alumínico deste solo e sua predominância de óxidos e caulinita fez com que este se comportasse de forma semelhante aos outros dois da Zona da Mata do estado.

A presença de hidróxi-alumínio entre as camadas das esmectitas, devido à alta concentração de alumínio no solo, neutralizada e impede a expansão das suas lâminas e expressão das suas cargas elétricas, permanecendo estável no solo. Conforme o que foi discutido, o Latossolo e o Nitossolo tiveram o comportamento esperado (Figura 8), sem reagir de maneira significativa à passagem de águas salinas.

Não obstante o Neossolo Regolítico tenha sido inserido com os solos da Zona da Mata devido a sua classificação em relação a  $K_{\text{sat}}$ , este solo reagiu significativamente aos tratamentos (Figura 8). Apesar de ser composto por 87,68% de areia total e somente 2,82% de argila (Tabela 6), a argila mostrou-se reativa devido a sua mineralogia rica em illita e caulinita (Figura 3). Ainda que haja a presença da caulinita, é possível notar a forte interferência da illita nestas reações, pois sua presença conferiu reatividade à fração argila.

É possível que esta illita esteja em sua forma transicional para esmectita devido a tortuosidade dos picos, no difratograma de raio-x, que indicam a presença deste

mineral. Com a transição para esmectita, há uma maior reatividade do solo e conseqüentemente aumento na resposta do solo à aplicação de águas com níveis crescentes de sais e sódio.

Os solos presentes nas figuras 9 e 10 foram altamente afetados pela aplicação das águas, sendo solos menos evoluídos das regiões do Agreste e Sertão de Pernambuco. A  $K_{sat}$  teve valores intermediários nos solos: Vertissolo Ebânico, Luvisolo Crômico e Neossolo Flúvico (Figura 9) e mais baixos nos solos Cambissolo Flúvico e Planossolo Háptico (Figura 10).

O Vertissolo e o Luvisolo tiveram comportamentos muito semelhantes com a aplicação das águas de diferentes qualidades. Porém, o Luvisolo, nas águas mais diluídas (CE de 128 e 718  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), teve uma maior  $K_{sat}$  do que o Vertissolo (Figura 9). Isto pode ser explicado por dois fatores: maior proporção de óxidos de ferro no Luvisolo (Tabela 7), promovendo certa flocculação e, conseqüentemente, elevando a  $K_{sat}$ , e maior teor de argila no Vertissolo do que no Luvisolo (42,50 e 30,12% respectivamente) (Tabela 6).

Sabe-se que maiores teores de argila reativa, como no Vertissolo (Figura 4), em ambiente sob dispersão, obstruem poros com a aplicação destas águas mais diluídas, diminuindo a  $K_{sat}$ .

Apesar de conter altos teores de areia (58,12%) em sua composição (Tabela 6), o Neossolo Flúvico também respondeu aos tratamentos estabelecidos neste trabalho. Do total de areia, 53,11% é constituído de areia fina (0,212 – 0,05 mm), além de um total de 29,88% de silte e, estas partículas, apesar de serem consideradas inertes, também podem ser responsáveis pela obstrução de poros no solo. A fração argila (12,00%) deste solo é constituída por caulinita, ilita e esmectita (Figura 4).

A presença da esmectita, neste caso, também está gerando cargas excedentes reativas. Além disso, a presença de teor considerável de carbono orgânico total contribuiu na geração de cargas negativas capazes de reagir com os cátions impostos com a aplicação dos tratamentos.

Na figura 10, representada pelo Cambissolo e Planossolo, a  $K_{sat}$  foi mais baixa que nos anteriores e houve resposta para os tratamentos aplicados. Isto é característico de solos com alta atividade da fração argila ( $>27,00 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ), portanto, mais reativos às águas com altos teores de sais. O Cambissolo e o Planossolo possuem na sua mineralogia esmectita e caulinita, encontrando-se ainda ilita no Cambissolo (Figura 5).

Desses dois solos, o Planossolo tem maior teor de argila e, quando irrigado com águas de baixa CE, teve valores de  $K_{sat}$  nulos ou tendendo a zero, o que não ocorreu com o Cambissolo (Figura 10). A partir da água de CE intermediária ( $1709 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) este solo tem uma discreta percolação de água, indicando que as cargas elétricas excedentes começaram a ser neutralizadas.

Isto fica evidente nos tratamentos de maior CE, em que a elevação da concentração de sais, principalmente o cálcio (RAS baixa), promove o aumento da  $K_{sat}$  do solo, possivelmente pelo aumento da floculação da fração argila. Isto também foi observado por Hussain et al. (2001) e Vasconcelos et al. (2013), que utilizaram tratamentos com gesso (fonte de cálcio) para aumentar a condutividade hidráulica de solos sódicos, demonstrando que este elemento é um agente floculante.

Comportamento similar foi visto no Cambissolo, com menores proporções de argila (23,08%) que o Planossolo. Este também teve baixa  $K_{sat}$  com elevação gradual de acordo com o aumento nas concentrações de sais na água (Figura 10). Entretanto, com as águas mais diluídas, a condutividade hidráulica deste solo não foi reduzida a zero como ocorreu com o Planossolo.

Isso pode ter ocorrido devido a alguns fatores, como: a proporção de areia do Cambissolo é maior (42,19%), sendo 34,84% de areia fina, com 34,72% de silte (Tabela 6); maior teor de ferro (Tabela 7) e maior grau de floculação (Tabela 6).

Apesar disso, nos tratamentos com maiores valores de CE e RAS nula, a  $K_{sat}$  foi um pouco menor no Cambissolo do que no Planossolo. Justifica-se pelo efeito floculante de águas de salinidade elevada com domínio de cálcio (neutralização de cargas negativas), especialmente em solos de maior teor de argila como o Planossolo, bem como a capacidade da areia fina e silte na obstrução de poros do Cambissolo.

Fernandes et al. (2010), estudando quatro solos do semiárido de Pernambuco, sendo dois Neossolos Regolíticos, um Planossolo e um Luvisolo, relataram que ocorreu um aumento na concentração de sódio em subsuperfície que acarretou em redução do grau de floculação nos Neossolos e no Planossolo, indicando o papel dispersante do sódio nas partículas coloidais do solo.

Já no caso do Luvisolo por eles estudado, por ser salino, ocorreu o fenômeno inverso, ou seja, com o aumento da salinidade em subsuperfície houve um acréscimo no grau de floculação, demonstrando que os sais em altas concentrações neutralizam as partículas com cargas elétricas negativas, fazendo com que elas floculem.

O aumento na condutividade hidráulica do solo pela aplicação de águas salinas também foi constatado por Arora et al. (2019) devido a maior agregação do solo com maior grau de flocculação das argilas. Cucci, Lacolla e Rubino (2013) observaram comportamentos semelhantes em solos com a aplicação de águas com baixa, média e alta concentração de sais, indicando que, quanto menor o teor de sais na água menor é a drenagem do solo.

Pelo que foi observado nos solos menos evoluídos do Agreste e Sertão de Pernambuco (Neossolo Regolítico, Vertissolo, Luvisolo, Neossolo Flúvico, Cambissolo e Planossolo), pode-se afirmar que a  $K_{sat}$  destes solos diminui com a redução da CE das águas percolantes e com o aumento da RAS.

Este fato está de acordo com a teoria de Gouy-Chapman, que correlaciona a influência da força iônica da solução (função da concentração), do tipo e valência dos cátions presentes. Ou seja, quanto maior a concentração iônica da solução e valência do cátion, menor a espessura da dupla camada difusa e maior a flocculação.

O cálcio é um íon considerado flocculante em relação ao sódio, pois, além de ser bivalente (neutraliza duas cargas negativas), seu raio hidratado é pequeno, permitindo que vários íons se aproximem eletrostaticamente das cargas presentes nos coloides do solo promovendo, assim, a neutralização dessas cargas e flocculação das partículas de argila.

Já o sódio é um íon considerado dispersante, pois, além de ser monovalente (só neutraliza uma carga negativa), também possui um raio hidratado grande, não permitindo que outros íons se aproximem fisicamente do coloide carregado negativamente. Sendo assim, várias cargas irão permanecer negativas e as partículas se repelirão.

Com o aumento da RAS (aumento no teor de sódio em relação ao cálcio), foi possível observar a diminuição da condutividade hidráulica em todos os níveis de CE dos seis solos supracitados, evidenciando o comportamento dispersante do sódio. A  $K_{sat}$  também foi baixa quando foram aplicadas águas com baixa concentração eletrolítica (128 e 718  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) nestes solos que responderam aos tratamentos.

Isto ocorre em decorrência da baixa concentração de íons capazes de neutralizar as cargas excedentes dos minerais de argila, fazendo com que a soma total de cargas permaneça negativa e as partículas de argilas sofram repulsão.

O comportamento evidenciado nestes solos (Figuras 9 e 10) também foi encontrado em algumas pesquisas estudando a influência da aplicação de águas com

níveis crescentes de sais e sódio em solos com teores crescentes de argila e com presença de minerais do tipo 2:1, principalmente da classe das esmectitas (CHAUDHARI, 2001; FREIRE et al., 2003; ELZIT et al., 2013; MENEZES et al., 2014; ALI et al., 2019; BENNETT et al., 2019).

Todavia, precisa-se estimar a  $K_{sat}$  em solos irrigados com as águas de salinidade crescente e diferentes proporções dos íons sódio e cálcio, muitas vezes o único recurso hídrico disponível no semiárido. A partir das equações geradas com os ensaios de condutividade hidráulica, sendo esta obtida com a passagem de águas de valores crescentes de CE e de RAS, visualizou-se o que ocorreu em cada solo (Tabela 12).

Conforme esperado, os dados dos três solos da Zona da Mata (Latossolo, Nitossolo e Argissolo) não tiveram ajuste a nenhuma equação testada, pois não houve resposta significativa à passagem das águas salinas. Tudo que foi discutido anteriormente para estes solos justifica este comportamento, indicando que solos dessa natureza não tem suas propriedades degradadas, até os níveis estipulados por este estudo, pela irrigação com águas com teores crescentes de sais.

**Tabela 12.** Equações de regressão múltipla para relação de condutividade hidráulica em meio saturado ( $K_{sat}$ ) em função da condutividade elétrica (CE em  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) e da relação de adsorção de sódio (RAS) das soluções de trabalho

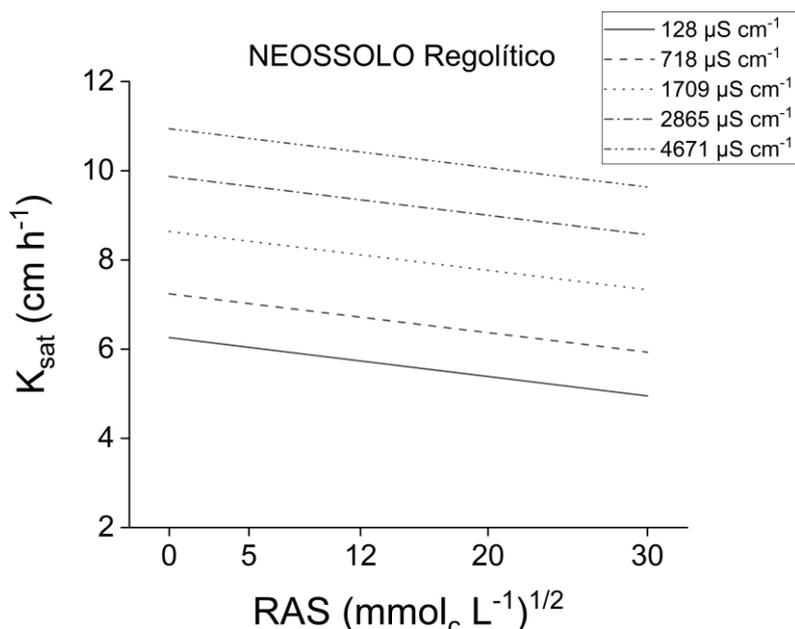
Solo	Equação	$R^2$
Latossolo Amarelo	$K_{sat} = 2,7459$	-
Nitossolo Háptico	$K_{sat} = 6,0558$	-
Argissolo Amarelo	$K_{sat} = 3,3313$	-
Neossolo Regolítico	$K_{sat} = 6,03167 + 0,0017991^{**}CE - 0,000000160069CE^{2^\circ} - 0,0435899RAS^{**}$	0,7209
Vertissolo Ebânico	$K_{sat} = 0,372869 + 0,000358036^{***}CE - 0,0487104^{***}RAS + 0,00152272^{***}RAS^2 - 0,0000114532^{***}CE RAS$	0,9231
Planossolo Háptico	$K_{sat} = -0,0181408 + 0,0000662413^{***}CE - 0,00561443^\circ RAS + 0,000229691^*RAS^2 - 0,00000204295^{***}CE RAS$	0,7815
Luvissolo Crômico	$K_{sat} = 0,969163 + 0,000571572^{***}CE - 0,0000000694489^{**}CE^2 - 0,0609834^{***}RAS + 0,0014585^{***}RAS^2 - 0,000017605CE RAS^* + 0,00000000225938^\circ CE^2 RAS$	0,9332
Cambissolo Flúvico	$K_{sat} = 0,02733608 + 0,000111962CE - 0,0000000147655CE^2 - 0,0024721RAS$	0,9306
Neossolo Flúvico	$K_{sat} = 2,57127 + 0,000186719^{***}CE - 0,019712^{***}RAS - 0,00000439958^{**}CE RAS$	0,8858

\*\*\*0,1%; \*\*1%; \*5% e °10 % de significância ao teste t.

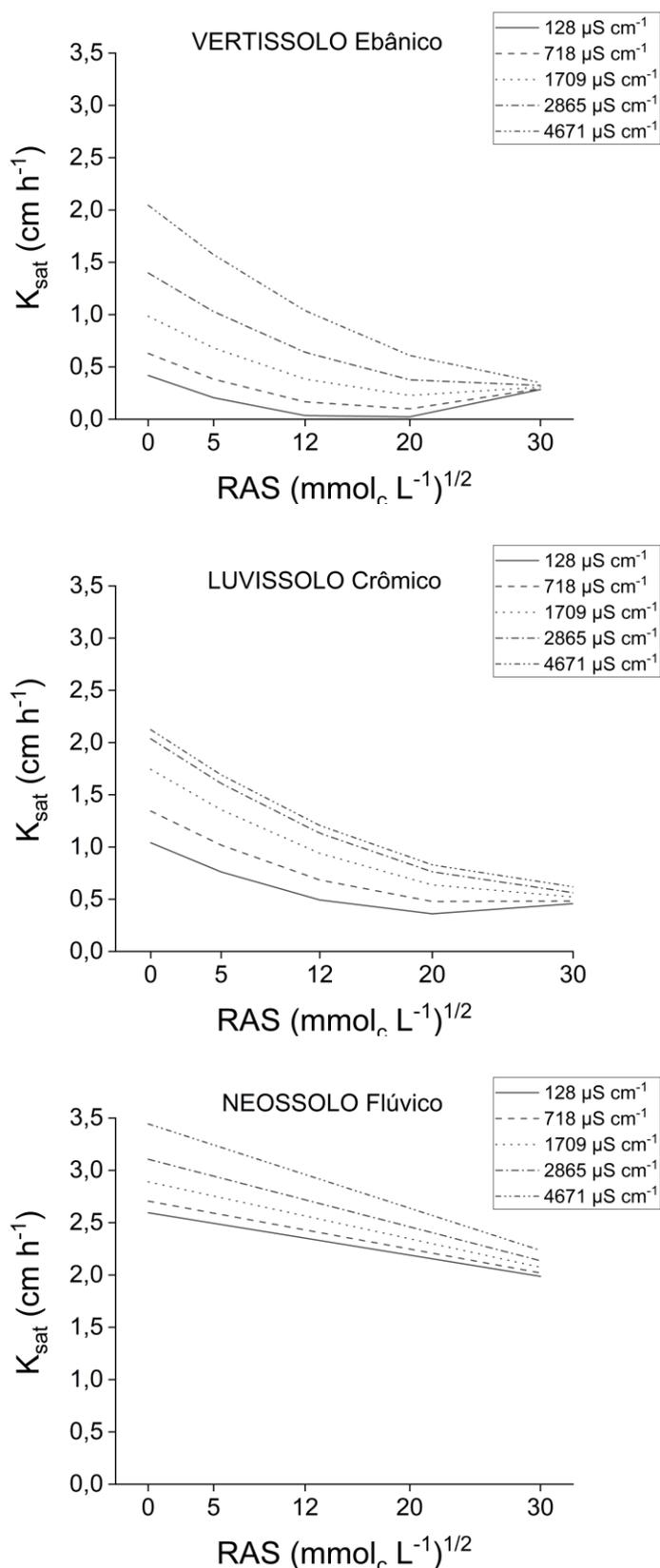
Para os demais solos, que responderam à passagem das diferentes águas, foram obtidas equações múltiplas da condutividade hidráulica em função da CE e da RAS das águas utilizadas, com parâmetros significativos e altos coeficientes de determinação (Tabela 12).

Utilizando-se as equações obtidas, foi avaliado o efeito da RAS em cada valor de CE das águas, por meio de cortes nas superfícies de respostas para cada um dos seis solos que tiveram diferenças significativas aos tratamentos aplicados (Figuras 11, 12 e 13).

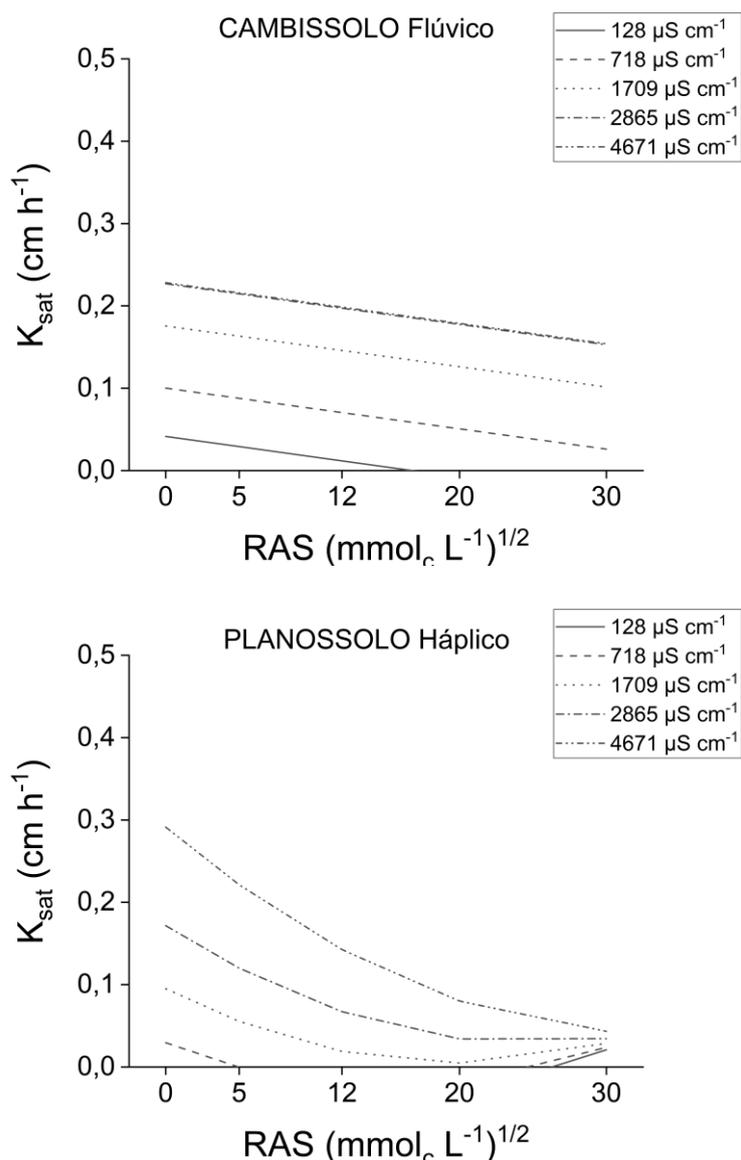
Para todos os seis solos, o aumento na RAS promoveu diminuição da condutividade hidráulica e esta foi maior nas águas mais diluídas (baixos valores de CE), comprovando o que foi ilustrado nas superfícies de resposta (Figuras 8, 9 e 10). Contudo, a atuação dessas águas foi diferenciada entre os solos avaliados.



**Figura 11.** Condutividade hidráulica em meio saturado ( $K_{\text{sat}}$ ) em função da relação de adsorção de sódio (RAS) em amostras de Neossolo Regolítico. Dados obtidos a partir das equações de regressão múltipla para as condutividades elétricas (CE) de 128, 718, 1709, 2865 e 4671  $\mu\text{S cm}^{-1}$



**Figura 12.** Condutividade hidráulica em meio saturado ( $K_{sat}$ ) em função da relação de adsorção de sódio (RAS) em amostras de Vertissolo Ebânico, Luvisso Crômico e Neossolo Flúvico. Dados obtidos a partir das equações de regressão múltipla para as condutividades elétricas (CE) de 128, 718, 1709, 2865 e 4671  $\mu\text{S cm}^{-1}$



**Figura 13.** Condutividade hidráulica em meio saturado ( $K_{sat}$ ) em função da relação de adsorção de sódio (RAS) em amostras de Cambissolo Flúvico e Planossolo Háptico. Dados obtidos a partir das equações de regressão múltipla para as condutividades elétricas (CE) de 128, 718, 1709, 2865 e 4671  $\mu\text{S cm}^{-1}$ . \*As retas referentes as CEs de 2865 e 4671  $\mu\text{S cm}^{-1}$  estão quase sobrepostas pela proximidade dos valores estimados pela equação múltipla

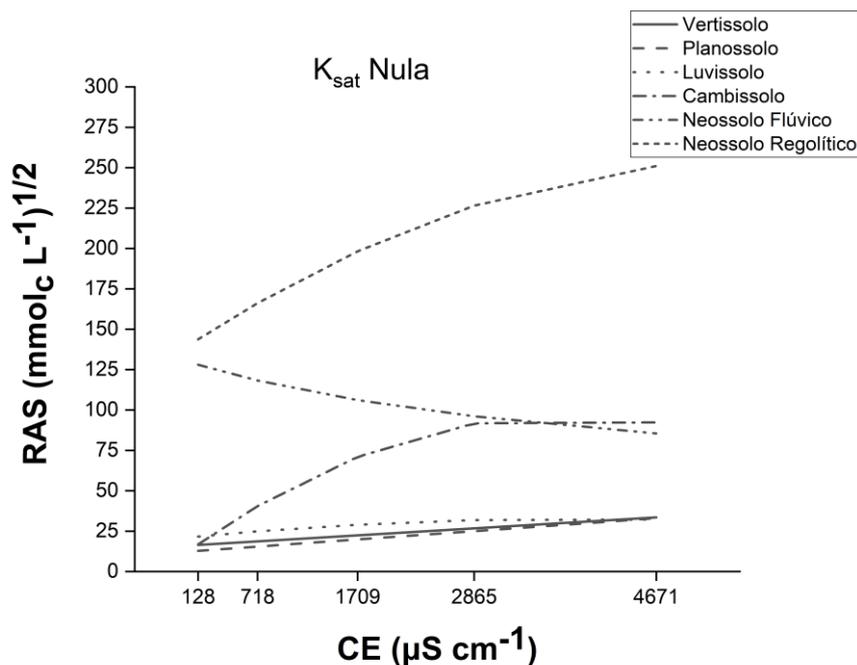
Com a aplicação das equações de regressão múltipla (Tabela 12), foi possível notar que os maiores decréscimos na  $K_{sat}$  estimada foram evidentes nos solos Vertissolo, Luvisolo e Planossolo, solos estes com predomínio de minerais do grupo das esmectitas. Isso ocorreu, principalmente, nas águas com maiores concentrações de sais.

No Vertissolo, este decréscimo foi verificado com a água de CE 4671  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , onde a  $K_{\text{sat}}$  foi de moderada (2,04  $\text{cm h}^{-1}$  na RAS 0) a lenta (0,35  $\text{cm h}^{-1}$  na RAS 30) (Figura 12). O mesmo ocorreu para o Luvisolo, nas águas de 2865 (2,04  $\text{cm h}^{-1}$  na RAS 0 e 0,56  $\text{cm h}^{-1}$  na RAS 30) e 4671  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (2,12  $\text{cm h}^{-1}$  na RAS 0 e 0,62  $\text{cm h}^{-1}$  na RAS 30), onde a  $K_{\text{sat}}$  foi de moderada a moderadamente lenta (Figura 12).

Já para o Planossolo, a mudança foi de lenta para muito lenta também nas águas de 2865 (0,17  $\text{cm h}^{-1}$  na RAS 0 e 0,03  $\text{cm h}^{-1}$  na RAS 30) e 4671  $\mu\text{S cm}^{-1}$  (0,29  $\text{cm h}^{-1}$  na RAS 0 e 0,04  $\text{cm h}^{-1}$  na RAS 30), de acordo com a Figura 13. Assim, houve forte contribuição da elevação nos teores de sódio, mesmo em águas com altos valores de CE, no aumento da dispersão das partículas do solo e consequente redução da condutividade hidráulica em meio saturado, ficando em conformidade com o demonstrado por Freire et al. (2003).

A partir das equações de regressão múltiplas geradas (Tabela 12), também foi possível o cálculo da RAS, para cada CE, onde a condutividade hidráulica será nula (Figura 14) igualando-se as equações para  $K_{\text{sat}}=0$  para saber em que nível de CE e RAS o solo interrompe sua drenagem. Para solos menos intemperizados e com presença de argilominerais tipo 2:1, quanto mais argila tiver o solo (Planossolo e Vertissolo), menor é o valor da RAS onde a  $K_{\text{sat}}$  será nula.

Isto indica que em solos mais argilosos a influência da qualidade química das águas é maior do que em solos com maiores teores de areia, pela presença de muita carga negativa nos colóides e, portanto, mais susceptíveis à dispersão. Isso concorda com os resultados observados por Bennett et al. (2019) que, trabalhando com solos da Austrália, constataram que a redução da  $K_{\text{sat}}$  está diretamente relacionada com a carga negativa líquida dos minerais de argila e com a proporção de argila presente nos solos, onde solos mais argilosos são mais reativos do que solos menos argilosos.



**Figura 14.** Valores de relação de adsorção de sódio (RAS), em cada nível de condutividade elétrica (CE = 128, 817, 1709, 2865 e 4671  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ), onde a condutividade hidráulica dos solos Neossolo Regolítico, Vertissolo, Planossolo, Luvissole, Cambissolo e Neossolo Flúvico será nula

Em contrapartida, solos arenosos, como o Neossolo Regolítico, atingem a nulidade da  $K_{\text{sat}}$  em valores de RAS bastante elevados, devido ao baixo teor de elementos promotores de cargas elétricas negativas e pela alta influência da fração areia em facilitar a percolação, mais elevada pela predominância de macroporos. Khataar et al. (2018) relatam que a condutividade hidráulica do solo depende, principalmente, dos macroporos e a redução ou destruição destes reduz a permeabilidade dos solos. Os autores afirmam que solos arenosos possuem maior condutividade hidráulica do que solos argilosos pelo predomínio de poros de maiores diâmetros.

Na maioria dos solos, a RAS limite cresceu com o aumento da condutividade elétrica, porém, para o Neossolo Flúvico o comportamento se inverteu. Este solo é o que possui maior teor de carbono orgânico total (COT) (Tabela 4), indicativo de maior estoque de matéria orgânica no solo. A matéria orgânica, por ter caráter anfotérico, reage no solo de diferentes maneiras. Sendo assim, uma das prováveis explicações para esta inversão de comportamento, pode ser atribuída à influência da matéria orgânica na geração de cargas e na dispersão e floculação dos componentes minerais na presença de sais. No

entanto, ainda seria necessário um estudo mais aprofundado dos tipos de cargas presentes nessa matéria orgânica, bem como a visualização do arranjo das partículas minerais neste solo para elucidar esta questão.

De modo geral, pode-se afirmar que solos da Zona da Mata, altamente intemperizados e com presença expressiva de óxidos de ferro e caulinita, não foram influenciados significativamente pela aplicação de águas de teores crescentes de sais, indicando que, até os níveis estabelecidos neste trabalho, a condutividade hidráulica desses solos não será prejudicada pela irrigação.

Porém, solos do Agreste e Sertão, localizados no semiárido, com conseqüente menor intemperização e maior presença de argilominerais do tipo 2:1, são grandemente afetados pela qualidade da água. Isto pode indicar um grave problema para os perímetros irrigados do semiárido brasileiro, que, em sua maior parte, se localizam nestas regiões justamente devido à escassez e má distribuição das chuvas durante o ano.

Em muitos perímetros irrigados, o uso de águas de poço com elevados teores de sais solúveis é frequente, acarretando em salinização e sodificação de extensas áreas. Porém, como foi mostrado neste trabalho, águas classificadas como C3 e C4 (1709, 2865 e 4671  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) promovem a manutenção da qualidade física do solo, tendo em vista que águas do tipo C1 e C2 (128 e 718  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) acabam gerando maior adensamento e, assim, diminuindo a permeabilidade dos solos.

Desta forma é fundamental a conciliação entre estudos de natureza química e física de cada solo para adequação das águas de irrigação, pois em alguns casos específicos, e com as devidas precauções e estudos acerca de cada solo, o uso de cada tipo de água é possível para manutenção das propriedades físicas e químicas e para um bom manejo e preservação dos solos agricultáveis.

O estudo da  $K_{\text{sat}}$  nula apresenta carência de trabalhos prévios, assim, as pesquisas nessa área devem continuar e são extremamente necessárias para se chegar em níveis adequados de sais na água para cada tipo de solo e para cada fim agrícola, evitando tanto a degradação química por acúmulo de sais e sódio como a degradação física pelo adensamento do solo e formação de camadas de impedimento.

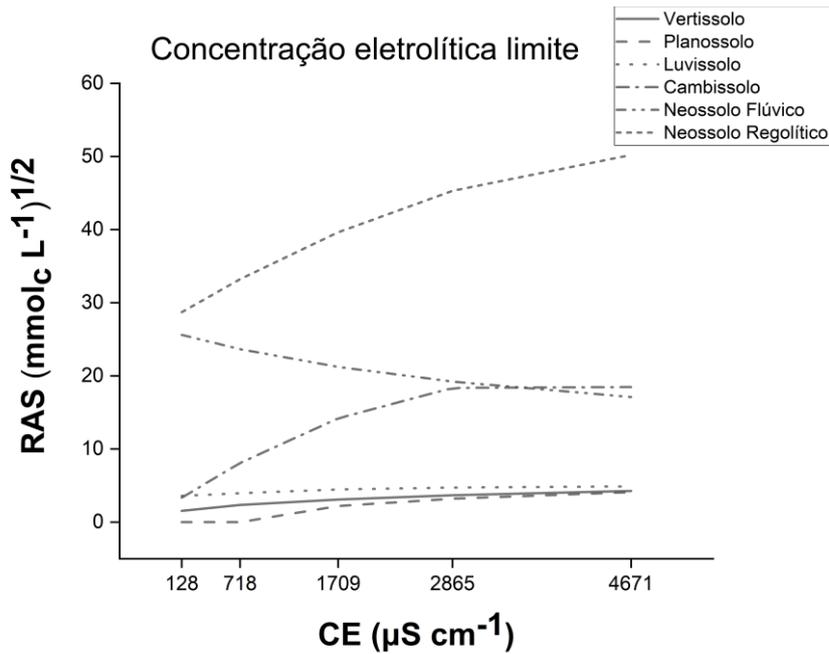
#### 4.2. Concentração eletrolítica limite

Visando o manejo adequado do sistema solo-água, estimou-se a concentração eletrolítica limite (CEL) dos solos avaliados. Esta determina os valores correspondentes a condutividade elétrica e relação de adsorção de sódio das águas destinadas à irrigação onde a  $K_{sat}$  tem seu valor reduzido em 20%, indicando início expressivo da dispersão das argilas do solo. A partir destes valores, a permeabilidade do solo começa a ser seriamente afetada, comprometendo a qualidade física e degradando o solo.

O estudo pioneiro da concentração eletrolítica limite foi desenvolvido pelos pesquisadores Quirk e Schofield (1955), os quais estabeleceram que a redução de 10 a 15% da  $K_{sat}$  máxima indica o início crítico da dispersão das partículas coloidais. Porém, estudos recentes mostram que este efeito de dispersão crítica deve ser estabelecido com 20% de redução da  $K_{sat}$  máxima (EZLIT et al., 2013).

Na Figura 15 está expressa a concentração eletrolítica limite dos seis solos estudados que foram reativos às águas salinas. Para todos os valores de CE estabelecidos neste estudo, qual o valor de RAS que é responsável pela redução em 20% da condutividade hidráulica máxima, aqui denominada condutividade hidráulica relativa ( $rK_{sat}$ ) de cada solo que respondeu aos tratamentos estabelecidos (Neossolo Regolítico, Vertissolo, Planossolo, Luvisso, Cambissolo e Neossolo Flúvico).

Os cálculos dos valores da RAS foram estabelecidos a partir das equações de regressão múltiplas (Tabela 12) desenvolvidas para os seis solos reativos.



**Figura 15.** Valores de RAS, em função das CEs de 128, 718, 1709, 2865 e 4671  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , onde ocorre a redução de 20% da condutividade hidráulica máxima em cada nível de CE, nos solos Neossolo Regolítico, Vertissolo, Planossolo, Luvissolo, Cambissolo, Neossolo Flúvico

Também foi possível observar que a CEL aumenta com o aumento da CE, indicando que, quanto maior a concentração de sais na água de irrigação, mais difícil se torna a dispersão dos coloides. Portanto, será preciso um teor maior de sódio para promover esta dispersão, devido a característica de promoção de floculação em solos salinos.

Nos solos mais argilosos e com predominância de argilominerais do tipo 2:1, como é o caso do Vertissolo, Planossolo e Luvissolo, a CEL é alcançada mais rapidamente, devido à alta atividade das argilas e consequente alta CTC (Tabela 4). Nestes solos, o sódio possui grande capacidade de dispersão pela predominância de cargas negativas que os torna mais susceptíveis ao efeito dispersivo deste elemento. Portanto, o cuidado com a qualidade da água nestes solos deve ser ainda maior e seu controle mais criterioso, evitando que a irrigação venha a promover a degradação do solo.

Já em solos mais arenosos, como o Neossolo Regolítico e Cambissolo, com a elevação da CE, a CEL só é atingida em maiores valores de RAS. Isso pode ser atribuído à presença de elementos não reativos como areia e silte,

reduzindo a influência do sódio na dispersão de partículas coloidais e obstrução de poros.

Houve um comportamento diferenciado no Neossolo Flúvico, em que a CEL diminuiu com o aumento da CE da solução percolante (Figura 15). Provavelmente, o alto teor de matéria orgânica presente neste solo (Tabela 4) modificou o equilíbrio eletroquímico causando esta reação. No entanto, estudos mais aprofundados sobre a dinâmica da matéria orgânica em solos salinos e sódicos são necessários para compreender a interação entre forças de atração e repulsão que atuam nos fenômenos de floculação e dispersão nestes solos. No Neossolo Flúvico, com o aumento da condutividade elétrica, a CEL é atingida em valores cada vez mais baixos de sódio, indicando a possível correlação entre o sódio solúvel e o tipo de matéria orgânica presente neste solo.

Algumas pesquisas vêm destacando a importância da CEL em estabelecer redução na permeabilidade dos solos pela adição de sódio nas águas, principalmente em solos com presença significativa de minerais 2:1 como esmectitas e vermiculitas. Os comportamentos observados neste estudo estão de acordo com os estudos de Menezes et al. (2014), Dang et al. (2018) e Bennett et al. (2019).

O conhecimento da CEL é fundamental para o manejo das águas de irrigação em diferentes solos. Pode ser útil na seleção e adequação de águas para irrigação, pelo balanço entre cátions de ação floculante e dispersante como o cálcio e o sódio, respectivamente. Em águas de baixa CE e alta RAS, o ajuste pode ser feito com a adição de cálcio via produtos como o gesso, por exemplo. Também, associado à fertirrigação, pela alta demanda vegetal por cálcio, magnésio e potássio, podendo-se aumentar a CE das águas pelo fornecimento de sais conforme as necessidades nutricionais da cultura.

Assim, para manter a adequada permeabilidade dos solos e uma boa nutrição para as plantas, estudos precisam ser feitos para o ajuste da CE das águas com os teores requeridos de macronutrientes. Este manejo equilibrado e baseado nas características físico-químicas das águas e solo permitirá manter a qualidade física e química satisfatórias nos solos sem promover sua degradação pelo acúmulo de sais e sódio e pelo adensamento causado pela dispersão de coloides. O estudo da CEL ainda é pouco explorado pelos pesquisadores sendo necessários, ainda, muitos avanços nesta área.

## 5. CONCLUSÃO

Este estudo mostrou que os solos reagem de formas diferenciada à aplicação de águas salinas variadas. Solos mais intemperizados são pouco propensos à salinização e sodificação. E solos menos evoluídos, provenientes de regiões de clima semiárido com predomínio de minerais do tipo 2:1, são altamente afetados pela qualidade das águas e mais propensos a salinização e sodificação.

Em solos menos intemperizados a condutividade hidráulica é incrementada pelo aumento na CE da água e reduzida pelo aumento na RAS, e a permeabilidade varia conforme o teor e tipo de argila. Solos arenosos suportam a passagem de águas de valores mais elevados de RAS sem que ocorra dispersão em comparação com solos mais argilosos.

A concentração eletrolítica limite das águas é maior em solos arenosos e diminui com o teor de argila de atividade alta.

Os solos: Vertissolo, Planossolo, Luvisolo e Cambissolo foram mais afetados pela qualidade das águas. Nestes, a  $K_{sat}$  foi maior sob a aplicação de águas de maior condutividade elétrica (CE) e menores valores de relação de adsorção de sódio (RAS); valores mais baixos de  $K_{sat}$  ocorrem sob o uso de águas mais diluídas e de maiores valores de RAS.

Essa pesquisa mostra a importância do estudo da interação dos solos com as águas destinadas à irrigação, para que haja uma adequação às práticas de manejo, de modo que não ocorra a degradação química e física de solos agricultáveis. Seria possível a utilização de águas mais concentradas em sais, associadas a nutrição de plantas via fertirrigação, atrelada a um manejo apropriado e sistemas de drenagem adequados, para preservação da qualidade dos solos e promoção da nutrição de espécies agrícolas. Estudos nesta área devem continuar para que se tenha um bom manejo das águas usadas na irrigação e fertirrigação, com aumento de produtividade, conservação e preservação dos solos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, A.; BIGGS, A. J. W.; MARCHUK, A.; BENNETT, J. M. Effect of Irrigation Water pH on Saturated Hydraulic Conductivity and Electrokinetic Properties of Acidic, Neutral, and Alkaline Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.83, p.1671–1681, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.2136/sssaj2019.04.0123>>.

ARAÚJO, J. K. S.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; MARQUES, F. A.; VORONEY, P.; SOUZA, R. A. S.; CORRÊA, M. M.; CÂMARA, E. R. G. Umbric Ferralsols along a climosequence from the Atlantic coast to the highlands of northeastern Brasil: Characterization and carbon mineralization, **Geoderma**, Amsterdam, n.293, p. 34-43, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.022>>.

ARAÚJO FILHO, J. C.; RIBEIRO, M. R.; BURGOS, N.; MARQUES, F. A. Solos da Caatinga. In: CURTI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. R. **Pedologia: Solos dos Biomas Brasileiros**. Viçosa, SBCS, p. 227-260, 2017.

ARORA, N. K.; CHAUDHARI, S. K.; YADAV, R. K.; SHARMA, P. C. Saturated Hydraulic Conductivity, Dispersion Index and Water Retention Changes in Salt Affected Soils under Different Quality Water Irrigation. **Journal of Soil Salinity and Water Quality**, New Delhi, v.11, n.1, p.1-9, 2019.

BARROS, M. F. C; FONTES, M. P.; ALVAREZ, V. H.; RUIZ, H. A. Recuperação de solos afetados por sais pela aplicação de gesso de jazida e calcário na Nordesnte do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.1, p. 59-64, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1415-43662004000100009>>.

BENNETT, J. McL.; MARCHUK, A.; MARCHUK, S. An alternative index to the exchangeable sodium percentage for an explanation of dispersion occurring in soils. **Soil Research**, Victoria, v. 54, n.8, p. 945-957, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1071/SR15281>>.

BENNETT, J. McL.; MARCHUK, A.; MARCHUK, S.; RAINE, S. R. Towards predicting the soil-specific threshold electrolyte concentration of soil as a reduction in saturated hydraulic conductivity: The role of clay net negative charge. **Geoderma**, Amsterdam, n. 337, p-122,131, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.030>>.

BROWN, G.; BRINDLEY, G. W. X-ray Diffraction Procedures for clay mineral Identification. In: BRINDLEY, G. W; BROWN, G. London: **Mineralogical Society**, 1980 chapter 5, p.305-360.

CASTRO, F. C.; SANTOS, A. M. Susceptibilidade ambiental a salinização das terras em municípios da microrregião de Petrolina - Pernambuco – Brasil. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v.16, n.56, p. 160-172, 2015.

COSTA, E. U. C.; SANTOS, J. C. B.; AZEVEDO, A. C.; ARAÚJO FILHO, J. C.; CORRÊA, M. M.; NEVES, L. V. M. W.; VIDAL-TORRADO, P.; SOUZA-JÚNIOR, V. S. Mineral alteration and genesis of Al-rich soils derived from conglomerate deposits in Cabo Basin, NE Brazil. **Catena**, New York, n.167, 198–211, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.039>>.

COUTO, E. G.; OLIVEIRA, V. A.; BEIRIGO, R. M.; OLIVEIRA JUNIOR, J. C.; NASCIMENTO, A. F.; VIDAL-TORRADO, P. Solos do Pantanal Mato-Grossense. In: CURI, N.; KER, J. C.; NOVAIS, R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; SCHAEFER, C. E. R. **Pedologia: Solos dos Biomas Brasileiros**. Viçosa, SBCS, p. 303-352, 2017.

CHAUDHARI, S. K. Saturated hydraulic conductivity, dispersion, swelling, and exchangeable sodium percentage of different textured soils as influenced by water quality. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.32, n15, p. 2439–2455, 2001. Disponível em: <<https://doi.org/10.1081/CSS-120000383>>.

CUCCI, G.; LACOLLA, G.; RUBINO, P. Irrigation with saline-sodic water: Effects on soil chemical-physical properties. **African Journal of Agricultural Research**, v.8, n.4, p. 358-365, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.5897/AJAR11.1222>>.

DANG A.; BENNETT, J. McL.; MARCHUK, A.; BIGGS, A.; RAINE, R. S. Quantifying the aggregation-dispersion boundary condition in terms of saturated hydraulic conductivity reduction and the threshold electrolyte concentration. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.203, p. 172–178, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.005>>.

DIAS, N. S.; DUARTE, S. N.; GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J. F.; SOARES, T. M. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade do solo sob ambiente protegido, utilizando-se extratores de solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.496-504, 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662005000400009>>.

DONGLI, S.; XUEMEI, G.; PENG, W.; WENTAO, X.; YINGYING, L.; YI, L. Comparison of soil hydraulic properties with different levels of soil salinity and sodicity. **Arabian Journal of Geosciences**, v.8, n.8, p. 5351 -5361, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12517-014-1514-8>>.

ELHAG, M. Evaluation of Different Soil Salinity Mapping Using Remote Sensing Techniques in Arid Ecosystems, Saudi Arabia. **Journal of Senior**, London, v. 3, n.8, p. 1-8, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2016/7596175>>.

EZLIT, Y. D.; BENNETT, L.M.; RAINE, S. R.; SMITH R. J. Modification of the McNeal Clay Swelling Model Improves Prediction of Saturated Hydraulic Conductivity as a Function of Applied Water Quality. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, n. 6, p. 2149-2156, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.2136/sssaj2013.03.0097>>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA.  
**Manual de métodos de análises de solo.** 3.ed. (Revista e ampliada) Brasília - DF, 573p., 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA.  
**Sistema Brasileira de Classificação de solo.** Brasília. 5° Ed, 2018.

FAO – Food and agricultural organization of the United Nations. Status of the World's Soil Resources. Main report. **Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS)**, Rome, 609 p., 2015.

FERNANDES, L. A. C; RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B. E FERREIRA, R. F. A. L. Caracterização e classificação de solos de uma litotoposeqüência do Projeto Xingó-SE. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.5, n.2, p.192-201, 2010.

FERREIRA, P. A.; SILVA, J. B. L.; RUIZ, H. A. Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semiáridas. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados.** Fortaleza, INCT Sal, p. 17-34, 2016.

FONTES, M. P. F; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.3, p.627-646, 2001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162001000300029>>.

FONTES, M. P. F. Intemperismo de rochas e minerais. In: KER, J. C.; CURI, N.; SHAEFER, C. E. G. R.; Vidal-Toledo p. **Pedologia: Fundamentos.** Viçosa: SBCS, 2012, 343 p.

FREIRE, M. B. G. S. **Saturação por sódio e qualidade da água de irrigação na degradação de propriedades físicas de solos do Estado de Pernambuco.** Viçosa: UFV, 2001. 66 p. Tese de Doutorado.

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, p.45-52, 2003. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662003000100008>>.

FREIRE, M. B. G. S.; FREIRE, F. J. Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais. In: Fertilidade do Solo, 1ª. Ed. Viçosa, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, p. 17-34, 2007.

GARCIA, G. O.; MARTINS FILHO, S.; REIS, E. F.; MORAES, W. B.; NAZÁRIO, A. A. Alterações químicas de dois solos irrigados com água salina. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 39, n. 01, p. 7-18, 2008.

HOLANDA, J. S.; AMORIM, J. R. A.; FERREIRA NETA, M.; HOLANDA, A. C.; SÁ, F. V. S. Qualidade da água para irrigação. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza, INCT Sal, p. 489-504, 2016.

HUSSAIN, N; HASSAN, G.; ARSHADULLAH, M.; MUJEEB, F. Evaluation of Amendments for the Improvement of Physical Properties of Sodic Soil. **International journal of agriculture & biology**, Faisalabad, v3, n3, p. 319-322, 2001.

JACKSON, M. L. **Soil chemical analysis: advance Course**. 29. ed. Madison, 1975. 895 p.

KAMPF, N; CURRI, N.; MARQUES, J. J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e mineralogia do solo: Parte I – Conceitos Básicos**. Viçosa: SBCS, 2009, 695 p.

KLUTE, A. Laboratory measurement of hydraulic conductivity of saturated soil. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of soil analysis. Part 1**. Madison, American Society of Agronomy, p.210-221, 1965.

KHATAAR, M.; MOSADDEGHI, M. R.; -CHAYJAN, R. A.; MAHBOUBI, A. A. Prediction of water quality effect on saturated hydraulic conductivity of soil by artificial neural networks. **Paddy and Water Environment**, v.16, n.3, p. 631-641, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10333-018-0655-x>>.

LIMA, G. K. **Caracterização de Vertissolos do nordeste brasileiro**. Recife: UFRPE, 2014, 101 p. Dissertação de mestrado.

LIMA JUNIOR, J. A.; SILVA, A. L. P. Estudo do processo de salinização para indicar medidas de prevenção de solos salinos. **Revista Enciclopédia Biosfera**, Jandaia, v.6, n.11, p. 1-21, 2010.

MEDEIROS, J. F.; GHEYI, H. R.; COSTA, A. R. F. C.; TOMAZ, H. V. Manejo do solo-água-planta em áreas afetadas por sai. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza, INCT Sal, p. 9-16, 2016.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clay and Clay Minerals**, v.7, 1958. Disponível em:  
< <https://doi.org/10.1346/CCMN.1958.0070122> >.

MENEZES, H. R.; ALMEIDA, B. G.; ALMEIDA, C. D. G. C.; BENNETT, J. M.; SILVA, E. M.; FREIRE, M. B. G. S. Use of threshold electrolyte concentration analysis to determine salinity and sodicity limit of irrigation water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.18, (Suplemento), p.S53–S58, 2014. Disponível em:  
< <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18nsupps53-s58>>.

MOORE, D. M.; REYNOLDS, R. C. X-ray diffraction and identification and analysis of clay minerals. Oxford: Oxford University Press, 1989. 332 p.

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

MOTA, F. O. B.; OLIVEIRA, J. B. Mineralogia de solos com excesso de sódio no estado do Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.799-806, 1999. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S0100-06831999000400006>>.

NEVES, L. V. M. W.; SANTOS, J. C. B.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; ARAÚJO FILHO, J. C. Associations between attributes of Nitisols and the climate of the southern coast of Pernambuco. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 31, n. 1, p. 255 – 263, 2018. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/1983-21252018v31n130rc>>.

NUNES FILHO, J.; GUERRA, C.A.M.; SOUSA, A.R.; SÁ, V.A.L.; SOARES, M.J.C.C. Qualidade da água de açudes para fins de irrigação no Sertão de Pernambuco. **ITEM - Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n.44, p.35-39, 1991.

PAES, J. L. A.; RUIZ, H. A.; FERNANDES, R. B. A; FREIRE, M. B. G. S; BARROS, M. F. C.; ROCHA, G. C. Hydraulic conductivity in response to exchangeable sodium percentage and solution salt concentration. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 61, n.5, p. 715-722, 2014.

PESSOA, L. G. M.; FREIRE, M. B. G. S.; SANTOS, R. L.; FREIRE, F. J.; MIRANDA, M. F. A.; SANTOS, P. R. Saline water irrigation in semiarid region: I – effects on soil chemical properties. **Australian Journal of Crop Science**, v.13, n.7, p. 1169-1176, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.07.p1686>>.>.

PESSOA, L. G. M.; FREIRE, M. B. G. S.; ARAÚJO FILHO, J. C.; SANTOS, P. R.; MIRANDA, M. F. A.; FREIRE, F. J. Characterization and Classification of Halomorphic Soils in the Semiarid Region of Northeastern Brazil. **Journal of Agricultural Science**, v.11, n4, p. 405-418, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5539/jas.v11n4p405>

PEDROTTI, A.; CHAGAS, R. M.; RAMOS, V. C.; PRATA, A. P. N.; LUCAS, A. A. T. E 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.

ORTON, T. G.; MALLAWAARACHCHI, T.; PRINGLE, M. J.; MENZIES, N. W.; DALAL, R. C.; KOPITKE, P. M.; SEARLE, R.; HOCHMAN, Z.; DANG, Y. P. Quantifying the economic impact of soil constraints on Australian agriculture: A case-study of wheat. **Land Degradation and Development**. p. 1–10, 2018. Disponível em: < <https://doi.org/10.1002/ldr.3130>>

QUIRK, J.P., SCHOFIELD, R.K. The effect of electrolyte concentration on soil permeability. **Australian Journal of Soil Research**, v.6, p.163–178, 1955. Disponível em: < <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1955.tb00841.x>>.

QUIRK, J. P.; PEREIRA, C.; TANTON, T. W. Soil Permeability in Relation to Sodicity and Salinity [and Discussion]. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Grã Bretanha, Vol. 316, No. 1537, p. 297-317, 1986.

RIBEIRO, M. R.; BARROS, M. F. C.; FREIRE, M. B. G. S. Química dos solos salinos e sódicos. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo**. 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: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza, INCT Sal, p. 9-16, 2016.

RUIZ, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.297-300, 2005. (NOTA). Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000200015>>.

SALAMA, R. B.; OTTO, C. J.; FITZPATRICK, R. W. Contributions of groundwater conditions to soil and water salinization. **Hydrogeology Journal**, v.7, n.1, p. 46–64, 1999. Disponível em: < <https://doi.org/10.1007/s100400050179>>

SANTANA, M. B. **Caracterização e classificação de solos na ilha de assunção, Cabrobó** – PERNAMBUCO. Recife: UFRPE, 2015, 93 p. Dissertação de mestrado.

SANTOS, J, C. B., SOUZA JÚNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R.; ALMEIDA, M. C.; BORGES, L. E. P. Caracterização de Neossolos Regolíticos da região semiárida do estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, n.36, p.683-695, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300001>>.

SOUSA, A. R.; ALBUQUERQUE, S. F.; LOPES, G. M. B.; SILVA, A. B.; NUNES FILHO, J. Caracterização e interpretação de um Planossolo Háplico eutrófico do agreste pernambucano, Brasil. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agrônoma**, Recife, v. 10, p.271-279, 2013.

SOUSA, M. G. F. **Alterações nos atributos de Luvisolos sob irrigação na região do submédio do rio São Francisco, Pernambuco**. Recife: UFRPE, 2018, 106 p. Dissertação de mestrado.

SOUSA, J. E. S.; SANTOS, J. C. B.; CORRÊA, M. M.; NASCIMENTO, A. F.; SCHULZE, S. M. B. B.; FERREIRA, T. O.; ARAÚJOFILHO, J. C.; SOUZA JÚNIOR, V. S. Mineralogy and genesis of Planosols under a semi-arid climate, Borborema Plateau, NE Brazil. **Catena**, New York, v. 184, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104260>>.

SOUZA, L. S.; MAFRA, A. L.; SOUZA, L. D.; SILVA, I. F.; KLEIN, V. A. Inter-relação entre manejo e atributos físicos. In: BERTOL, I.; DE MARIA, I. C.; SOUZA, L. S. **Manejo e conservação do solo e da água**, Viçosa, SBCS, p 193-249, 2019.

TRAVASSOS, I. S.; SOUZA, B. I.; SILVA, A. B. Secas, desertificação e políticas públicas no semiárido nordestino brasileiro. **Revista OKARA: Geografia em debate**, João Pessoa, v.7, n.1, p. 147-164, 2013.

VASCONCELOS, R. R. A., BARROS, M. F. C.; SILVA, E. F. 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. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001200010>>.

UNITED STATES SALINITY LABORATORY STAFF. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington DC, US Department of Agriculture, 1954. 160p. (**USDA Agricultural Handbook, 60**).

## 6. APÊNDICES

**Tabela 1A.** Análise de variância da condutividade hidráulica em meio saturado do LATOSSOLO Amarelo

Fator de Variância	GL	Quadrado Médio
Bloco	3	6,881436
CE	4	0,361602 <sup>NS</sup>
RAS	4	0,152301 <sup>NS</sup>
CE x RAS	16	0,663352 <sup>NS</sup>
Erro	72	0,472325
CV (%)		25,03

<sup>NS</sup> Não significativos

**Tabela 2A.** Análise de variância da condutividade hidráulica em meio saturado do NITOSSOLO Háplico

Fator de Variância	GL	Quadrado Médio
Bloco	3	147,375562
CE	4	5,651130 <sup>NS</sup>
RAS	4	11,001657*
CE x RAS	16	4,117066 <sup>NS</sup>
Erro	72	3,125835
CV (%)		29,20

<sup>NS</sup> Não significativos

**Tabela 3A.** Análise de variância da condutividade hidráulica em meio saturado do ARGISSOLO Amarelo

Fator de Variância	GL	Quadrado Médio
Bloco	3	30,81695
CE	4	3,433069 <sup>NS</sup>
RAS	4	2,179849 <sup>NS</sup>
CE x RAS	16	2,477223 <sup>NS</sup>
Erro	72	1,827851
CV (%)		40,58

<sup>NS</sup> Não significativos

**Tabela 4A.** Análise de variância da condutividade hidráulica em meio saturado do NEOSSOLO Regolítico

Fator de Variância	GL	Quadrado Médio
Bloco	3	18,400418
CE	4	72,912879 <sup>***</sup>
RAS	4	10,288458 <sup>**</sup>
CE x RAS	16	6,099971*
Erro	72	2,723317
CV (%)		20,61

<sup>\*\*\*</sup>,<sup>\*\*</sup>,<sup>\*</sup> Significativos a 0,1; 1 e 5% ao teste F.

**Tabela 5A.** Análise de variância da condutividade hidráulica em meio saturado do VERTISSOLO Ebânico

Fator de Variância	GL	QM
Bloco	3	0,416833
CE	4	2,914878***
RAS	4	2,477750***
CE x RAS	16	0,323535***
Erro	72	0,101342
CV (%)		54,85

\*\*\*Significativo a 0,1% ao teste F.

**Tabela 6A.** Análise de variância da condutividade hidráulica em meio saturado do PLANOSSOLO Háptico

Fator de Variância	GL	Quadrado Médio
Bloco	3	0,012158
CE	4	0,112051***
RAS	4	0,038479***
CE x RAS	16	0,015243***
Erro	72	0,003595
CV (%)		110,24

\*\*\*Significativo a 0,1% ao teste F.

**Tabela 7A.** Análise de variância da condutividade hidráulica em meio saturado do LUVISSOLO Crômico

Fator de Variância	GL	Quadrado Médio
Bloco	3	1,653627
CE	4	1,686095***
RAS	4	4,508368***
CE x RAS	16	0,189366**
Erro	72	0,080201
CV (%)		28,44

\*\*\* e \*\*Significativos a 0,1; 1% ao teste F.

**Tabela 8A.** Análise de variância da condutividade hidráulica em meio saturado do CAMBISSOLO Flúvico

Fator de Variância	GL	Quadrado Médio
Bloco	3	0,003776
CE	4	0,135678***
RAS	4	0,018820***
CE x RAS	16	0,002137*
Erro	72	0,000969
CV (%)		25,66

\*\*\* e \*\*Significativos a 0,1; 5% ao teste F.

**Tabela 9A.** Análise de variância da condutividade hidráulica em meio saturado do NEOSSOLO Flúvico

Fator de Variância	GL	Quadrado Médio
Bloco	3	8,459415
CE	4	1,112237***
RAS	4	2,380460***
CE x RAS	16	0,128703°
Erro	72	0,077921
CV (%)		10,66

\*\*\* e° Significativos a 0,1; 10% ao teste F.