

JEFFERSON LUIZ DE AGUIAR PAES

**DISPERSÃO E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLOS DE
PERNAMBUCO, EM RESPOSTA À SATURAÇÃO POR SÓDIO E À
CONCENTRAÇÃO SALINA DA SOLUÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

P126d
2012

Paes, Jefferson Luiz de Aguiar, 1983-
Dispersão e condutividade hidráulica em solos de
Pernambuco, em resposta à saturação por sódio e à
concentração salina da solução / Jefferson Luiz de Aguiar
Paes. – Viçosa, MG, 2012.
ix, 74f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Hugo Alberto Ruiz.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 63-68

1. Dispersão. 2. Argila. 3. Salinidade. 4. Solos - Teor de
sódio. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 631.43

JEFFERSON LUIZ DE AGUIAR PAES

**DISPERSÃO E CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM SOLOS DE
PERNAMBUCO, EM RESPOSTA À SATURAÇÃO POR SÓDIO E À
CONCENTRAÇÃO SALINA DA SOLUÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 15 de fevereiro de 2012.

Raphael Bragança Alves Fernandes
(Coorientador)

Renato Ribeiro Passos

Hugo Alberto Ruiz
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

A minha família, principalmente a minha mãe Maria Suely, minhas irmãs Mylena e Pâmara, minha avó Maria madalena e ao meu avô Antônio Aguiar.

Ao professor Hugo Alberto Ruiz pela excelente orientação e amizade.

Aos meus coorientadores professor Raphael, professora Fatima, professora Betânia e professor Genelício e ao professor Victor Hugo pela ajuda na condução do trabalho e pela amizade.

À universidade federal de viçosa (UFV), principalmente ao departamento de solos (DPS).

A capes pelo fornecimento da bolsa de estudo.

Aos funcionários da UFV, Cláudio, Carlos Fonseca, Luciana e Claudia que sempre me ajudaram durante o curso.

Aos amigos, em especial ao Bruno Toríbio sua esposa Michele e seu filho Lucas, Caio Lins, Carol Malala, Danilo Camelo, Diogo da Mata, Evandro Batista, Fernando, Gelton, Guilherme, Ingrid Guimarães, Jailson Cunha, Joyce Bonna, Manuel Carrilho, Marino, Nairam Filho, Paul Lama, Rita de Cássia, Samuel Valadares e Wedisson.

BIOGRAFIA

JEFFERSON LUIZ DE AGUIAR PAES, filho de Joaquim Paes Filho e Maria Suely de Aguiar Paes, nasceu no dia 03 de setembro de 1983, em Garanhuns, Pernambuco.

Em Abril de 2004, iniciou o curso de Agronomia na Universidade Federal Rural de Pernambuco, graduando-se em 2010.

Em Março de 2010, iniciou o curso de Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas, na Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o em Fevereiro de 2012.

ÍNDICE

	Página
RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	03
2.1. Dupla camada difusa.....	03
2.2. Solos afetados por sais	04
2.3. Argila dispersa em água.....	06
2.4. Condutividade hidráulica em meio saturado.....	08
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1. Seleção dos solos.....	11
3.2. Caracterização dos solos.....	11
3.3. Tratamentos.....	13
3.4. Procedimento experimental.....	14
3.4.1. Ajuste da relação Na: Ca no complexo de troca catiônica.....	14
3.4.2. Determinação da argila dispersa.....	17
3.4.3. Determinação da Condutividade hidráulica em meio saturado.	18
3.5. Análises estatísticas.....	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4.1. Argila Dispersa.....	22
4.2. Condutividade Hidráulica em meio saturado.....	46

5. CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
APÊNDICE.....	69

RESUMO

PAES, Jefferson Luiz de Aguiar, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2012. **Dispersão e condutividade hidráulica em solos de Pernambuco, em resposta à saturação por sódio e à concentração salina da solução.** Orientador: Hugo Alberto Ruiz. Coorientadores: Raphael Bragança Alves Fernandes, Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, Genelício Crusóe Rocha e Maria de Fatima Cavalcanti Barros.

Para estimar a tendência à dispersão de argilas, determina-se, em laboratório, o teor de argila dispersa em água (ADA). Essa análise pode não corresponder à realidade no campo em solos salinos e salino-sódicos, em que a solução desses apresenta concentrações relativamente elevadas de sais. Em acréscimo, resultados de determinações da condutividade hidráulica em meio saturado (K_0) em laboratório, com água destilada ou deionizada, podem também não corresponder às condições de campo nesses solos. Determinaram-se a argila dispersa (AD) e a K_0 , em laboratório, utilizando soluções de trabalho de diferentes condutividades elétricas (CE) em sete solos representativos do Estado de Pernambuco, com percentagem de saturação de sódio (PST) ajustada no intervalo de 5-30%. Na determinação da AD, utilizou-se arranjo fatorial ($7 \times 6 \times 5$): sete solos, seis ajustes nos valores da PST (5, 10, 15, 20, 25 e 30%) e cinco CE (0; 0,3; 0,6; 0,9; e $1,2 \text{ dS m}^{-1}$). No ensaio da K_0 , usou-se arranjo fatorial ($7 \times 3 \times 3$):

sete solos, três ajustes nos valores da PST (5, 15 e 30 %) e três CE (0; 0,6 e 1,2 dS m⁻¹). O ajuste da PST foi realizado, saturando os solos com soluções de relação de adsorção de sódio (RAS) apropriadas. A AD foi obtida agitando-se 400 mL de suspensão em recipientes de 500 mL, em agitador rotatório Wagner, durante 16 h, a 50 rpm. A K₀ foi quantificada por meio de permeâmetros de carga constante. Os resultados experimentais evidenciaram que houve incremento nos valores da AD diretamente relacionado com o aumento da PST e a diminuição da CE na solução de trabalho, resultando também na diminuição nos valores da K₀. A resposta aos tratamentos foi mais acentuada nos solos com maiores proporções de argilas ativas frente àqueles com presença marcante de óxidos de ferro. A presença de argilas mais ativas leva à diminuição da K₀, quando comparada com solos com maior proporção de óxidos, tornando esses mais susceptíveis a variações de K₀, em decorrência da PST, com marcada influência da CE da água eventualmente utilizada na análise ou na irrigação. As determinações da ADA e de K₀, geralmente associadas a problemas de infiltração, erosão e degradação da estrutura dos solos, são realizadas em laboratórios com água deionizada ou destilada, de CE próxima de 0 dS m⁻¹; no entanto, para solos afetados por sais, as análises deveriam ser realizadas com soluções de CE ≠ 0 dS m⁻¹, utilizando valores próximos aos do extrato da pasta de saturação.

ABSTRACT

PAES, Jefferson Luiz de Aguiar, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2012. **Dispersion and hydraulic conductivity in soils of Pernambuco, in response to sodium saturation and salt solution concentration.** Adviser: Hugo Alberto Ruiz. Co-advisers: Raphael Bragança Alves Fernandes, Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, Genelício Crusóe Rocha and Maria de Fatima Cavalcanti Barros.

To estimate clay dispersion susceptibility, the water dispersible clay (WDC) is determined in the laboratory. This analysis may not correspond to reality observed in the field, when saline and saline-sodic soils are present, due to the relatively high salt concentration in the soil solution. In addition, results of determinations of saturates hydraulic conductivity (K_0) in the laboratory with distilled or deionized water, may also not match the field conditions in these soils. Thus, we determined the dispersed clay (DC) and the K_0 , in the laboratory using working solutions of different electrical conductivities (EC) in seven representative soils of Pernambuco State, with exchangeable sodium percentage (ESP) set in the range of 5-30%. In the determination of DC was used a factorial arrangement (7x6x5): 7 soils, 6 adjustments in ESP values (5, 10, 15, 20, 25 and 30%) and 5 EC (0, 0.3, 0.6; 0.9 and 1.2 dS m⁻¹). In the K_0 assay was used a factorial arrangement (7x3x3): 7 soil, 3 adjustments in ESP values (5, 15 and

30%) and 3 EC (0, 0.6 and 1.2 dS m⁻¹). The adjustment of ESP was performed by saturating the soil with solutions of sodium adsorption ratio (SAR) appropriate. The DC was obtained by stirring a suspension of 400 ml in 500 mL containers, using a Wagner rotary shaker for 16 h, at 50 rpm. The K₀ was measured using constant head permeameter. The experimental results show that there was an increase in the values of DC directly related to the increase in ESP and decrease in EC, also resulting in a decrease in the value K₀. The response to treatment was more pronounced in soils with higher proportions of active clays compared to those with a strong presence of iron oxides. The presence of more active clay causes reduction in K₀ compared to soils with high percentage of oxides. Those soils are more susceptible to K₀ variations due to ESP. Also there is a marked influence of water EC used in the analysis or for irrigation. Measurements of WDC and K₀, usually associated with problems of infiltration, erosion and deterioration of the soil structure, are generally performed in laboratories with deionized or distilled water, EC close to 0 dS m⁻¹. However, for salt affected soils, the analysis should be carried out with solutions of EC ≠ 0 dS m⁻¹, using values close to the EC of the saturation extract.

1. INTRODUÇÃO

Em regiões áridas e semiáridas, onde a evaporação é maior que a precipitação durante vários meses do ano, pode ocorrer salinização dos solos. Nessas condições, os solos apresentam concentrações elevadas de sais solúveis e, ou, altas proporções de sódio trocável, que interferem no crescimento dos vegetais e, consequentemente, na produção das culturas. Os sais solúveis presentes nessas concentrações reduzem o potencial osmótico, dificultando a absorção de água, bem como podem causar toxidez às plantas pela ação de íons específicos como cloreto, sódio e bicarbonato.

A elevação da proporção de sódio trocável afeta a floculação e a dispersão de argilas. Esses processos envolvem a interação de cargas elétricas das partículas coloidais com os íons em equilíbrio. O cátion dominante no complexo de troca e suas características como valência, raio iônico e camada de hidratação são fatores que influenciam na floculação ou dispersão dos coloides.

A proporção elevada de sódio no complexo de troca catiônico, indicada pela percentagem de sódio trocável (PST), quando associada à baixa concentração salina na solução do solo, tende a favorecer o processo de dispersão das argilas. Porém, as argilas podem flocular com o aumento da concentração de

sais na solução do solo, seja em resposta aos processos naturais ou à ação antrópica, com destaque para a irrigação. O incremento na concentração salina provoca a diminuição do potencial osmótico, em resposta à elevação da força iônica, o que leva à compressão da dupla camada difusa, favorecendo a floculação.

Em solos com problemas de sodicidade, a dispersão de argilas pode obstruir, ao menos parcialmente, os macroporos, diminuindo a condutividade hidráulica em meio saturado (K_0), por redução na infiltração e no movimento de água no longo do perfil do solo.

Para estimar a tendência à dispersão de argilas, costuma-se determinar, em laboratório, o teor de argila dispersa em água (ADA). Para isso, a amostra de solo é submetida exclusivamente à dispersão física, utilizando a água destilada ou deionizada, exclusivamente, como meio dispersante. Porém, essa determinação pode não corresponder à realidade no campo em solos salinos e salino-sódicos, em que a solução do solo apresenta concentrações relativamente elevadas de sais, o que resulta em valores apreciáveis de condutividade elétrica (CE), referência utilizada para caracterizar solos afetados por sais.

Os resultados de determinações da K_0 em laboratório, com água destilada ou deionizada, podem também não corresponder às condições de campo em solos afetados por sais ou em solos de perímetros irrigados, onde a utilização de água com valores elevados de CE e de relação de adsorção de sódio (RAS) é prática constante.

O objetivo deste trabalho foi determinar a argila dispersa e a condutividade hidráulica em meio saturado, utilizando soluções de trabalho de diferentes CE, em sete solos representativos do Estado de Pernambuco, com PST ajustado no intervalo de 5 a 30%.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Dupla Camada Difusa

A maioria dos solos apresenta, na superfície, predomínio de carga elétrica negativa. Assim, os cátions, normalmente dissociados na solução do solo, tendem a permanecer na vizinhança, atraídos pelo campo elétrico formado (Bolt, 1978).

Além dessas forças de atração, existem forças de difusão que tendem a movimentar esses cátions em direção à solução em equilíbrio, onde a concentração desses é menor. Em razão da ação concomitante dessas forças opostas, uma distribuição espacial é estabelecida, na qual a concentração de cátions aumenta em direção à superfície, denominada de dupla camada difusa (DCD) (Uehara & gillman, 1981).

A espessura da DCD é variável, sendo um dos fatores determinantes para ocorrência de dispersão ou floculação dos minerais da fração argila (Spera et al., 2008). A expansão responde à presença de cátions com menor carga elétrica e alto grau de hidratação (Na, K, Li e Mg). Esses íons formam complexos de esfera externa, aumentando a distância entre as partículas, ou seja, dispersando-as. Já o fenômeno de compressão está relacionado à presença de cátions como Al e Ca, com características opostas àqueles previamente indicados (Meurer, 2006). A

capacidade de floculação das partículas pelos cátions presentes na solução do solo está diretamente relacionada à valência, aumentando de acordo com a sequência: mono, bi e trivalentes e, dentro de cada grupo da tabela periódica, com o incremento da massa atômica (Arnold, 1978).

Os fenômenos de floculação e dispersão também respondem à concentração eletrolítica da solução do solo. O aumento da pressão osmótica é inversamente relacionado com a espessura da DCD (Rengasamy, 1983). Munner & Oades (1989) ressaltam a importância da pressão osmótica na solução do solo, relatando que em ambientes de baixa concentração eletrolítica a dupla camada difusa torna-se mais espessa, mantendo, dessa maneira, os coloides afastados e dispersos. O contrário ocorre em lugares de alta concentração salina, onde a dupla camada tende a ser comprimida, favorecendo, com isso, a aproximação dos coloides e a consequente floculação das partículas.

No quadro 1, apresenta-se a espessura efetiva da dupla camada difusa na comparação entre cátions de diferentes valências e em diferentes concentrações, utilizados na saturação do complexo de troca de uma esmectita.

Quadro 1. Espessura da dupla camada difusa, considerando a natureza e a concentração do cátion na solução de equilíbrio

Concentração	NaCl	CaCl ₂
mol _c L ⁻¹	nm	
0,1	1,94	1,00
0,01	6,20	3,20
0,001	19,40	10,10

Fonte: White, 1979.

2.2. Solos Afetados por Sais

A salinização do solo pode ocorrer naturalmente, por origem antrópica ou associada a esses dois fatores. As regiões de clima árido e semiárido são as mais propícias a apresentarem essa alteração, em razão das condições edafoclimáticas

como elevada temperatura, má distribuição de chuvas e deficiência de drenagem dos solos.

De acordo com Richards (1954), classicamente, os solos afetados por sais são classificados em três classes: salinos, com CE do extrato da pasta de saturação $\geq 4,0 \text{ dS m}^{-1}$ e PST $< 15\%$; sódicos, com CE do extrato da pasta de saturação $< 4,0 \text{ dS m}^{-1}$ e PST $\geq 15\%$; e salino-sódicos, com CE do extrato da pasta de saturação $\geq 4,0 \text{ dS m}^{-1}$ e PST $\geq 15\%$. Os critérios estabelecidos para utilização desses valores responderam a numerosas determinações realizadas pela equipe desse autor, em pesquisas com solos afetados por sais dos EUA. Indicaram-se que a CE da pasta de saturação $\geq 4,0 \text{ dS m}^{-1}$ provocou 50% de redução na produção da maioria das culturas agrícolas e que a PST $\geq 15\%$ afetou sensivelmente a infiltração e a condutividade hidráulica do solo.

A classificação proposta para solos dos EUA é a mais utilizada nos dias atuais. Entretanto, com o advento de novas pesquisas, constatou-se que os valores da PST e CE devem ser avaliados de maneira individualizada, observando as características do solo: textura, tipo de argila, presença de sais na solução e fatores relacionados à planta a ser cultivada, como tolerância ao estresse hídrico e à salinidade (Summer, 1995; Freire et al., 2003a; 2003b).

As alterações na estrutura e consequentemente na porosidade do solo, em resposta a PST elevada, podem conduzir ao selamento superficial e à formação de camadas impermeáveis em subsuperfície. Esses processos interferem negativamente nas propriedades físico-hídricas, aumentando a susceptibilidade do solo à erosão, o que limita o uso desse para fins agrícolas (Frenkel et al., 1978; Hamblin, 1985; Barros et al., 2005).

O excesso de sais solúveis pode causar sérios danos à maioria das culturas, por incremento da pressão osmótica da solução e diminuição da disponibilidade de água para as plantas. Com isso, em iguais condições de umidade, no mesmo solo, a planta terá maior dificuldade de absorção de água e nutrientes, principalmente os transportados por fluxo de massa, onde a concentração salina for mais elevada. Os efeitos adversos da salinidade sobre as

plantas podem ser resumidos em: seca fisiológica, provocada pela redução do potencial osmótico; desbalanceamento nutricional, considerando que o excesso de determinado íon pode interferir na absorção de outro elemento; e efeitos tóxicos da elevada alcalinidade ou dos íons específicos como sódio, bicarbonato e cloreto, causando queima e necrose em folhas (Jeffrey & Izquierdo, 1989; Santos, 1995; Santos et al., 2009).

Além do fato de que as regiões semiáridas são propícias a apresentar problemas relacionados à salinização em condições naturais, ações antropogênicas como o manejo inadequado do solo vêm agravando muito esse fenômeno. A irrigação com água de elevada CE e adubação excessiva contribuem para que grande parte dos perímetros irrigados localizados no Nordeste brasileiro se encontrem com graves problemas relacionados à salinização (Magalhães, 1995).

A salinização dos solos além de causar perdas em produtividade pode levar ao abandono das áreas, processo conhecido como desertificação (Leite et al., 1993). Esse fenômeno tem se intensificado em várias regiões do planeta, sendo atualmente uma preocupação mundial. Nesse contexto, o manejo adequado é de fundamental importância para preservação e sustentabilidade dos solos, minimizando, com isso, a ocorrência e o agravamento de processos críticos ao meio ambiente (Ferreira, 2002).

2.3. Argila dispersa em água

A argila dispersa em água (ADA) é determinada em laboratório, utilizando apenas água deionizada ou destilada como meio dispersante; isto é, sem adição de dispersante químico. O procedimento consiste na agitação mecânica, que provoca a desagregação da amostra de solo. Em seguida, a suspensão é transferida para uma proveta e a coleta da argila naturalmente dispersa, em um determinado espaço, usualmente de 5 cm, é realizada pelo método da pipeta, após o tempo de sedimentação da fração $> 2 \mu\text{m}$, calculado de acordo com a Lei de Stokes (Gee & Bauder, 1986; Freitas, 2011).

Os fatores naturais e antrópicos interferem diretamente nos valores da ADA. Com isso, os solos que apresentam elevados teores de sódio e, ou, que sejam manejados de forma inadequada são os mais propícios a apresentarem acentuada dispersão, sendo um indicativo de sua degradação estrutural (Haridasan & Chibber, 1971).

Algumas propriedades do solo como a presença de óxidos e o tipo e a quantidade de cátions trocáveis têm papel significativo na proporção da ADA (Igwe et al., 2006). Os óxidos atuam como agentes cimentantes, aumentando as forças de coesão entre as partículas (McKeague & Sprout, 1975; Jacomine, 1996; Filizola et al., 2001) e mitigando os possíveis efeitos dispersivos provocados por um manejo inadequado (El-swaify & Dangler, 1977).

A proporção dos cátions trocáveis pode ser influenciada por práticas como irrigação, correção e adubação; assim, a aplicação dessas técnicas ao solo pode alterar a composição química dele e conseqüentemente interferir nos valores da ADA. Panayiotopoulos et al. (2004), trabalhando com solos da Grécia, observou alta correlação entre a elevação da relação de adsorção de sódio (RAS) da água aplicada ao solo e o incremento nos valores da ADA.

A ADA é de suma importância para avaliar a suscetibilidade do solo à erosão (Kjaergaard et al., 2004). Nesse contexto, a determinação da ADA pode auxiliar na previsão dos riscos associados à erosão hídrica (Gómes et al., 2004). Essa análise é de fundamental importância para solos de regiões semiáridas, os quais geralmente apresentam problemas de dispersão relacionados ao excesso de sódio trocável (Goldberg & Forster, 1990).

Em solos irrigados com água de CE elevada ou aqueles que em condições naturais apresentam alta concentração salina na solução do solo, as determinações da ADA podem superestimar os valores reais. Esse fato está relacionado à diluição na concentração salina da solução do solo. Gillman (1974) cita que a redução na força iônica provocada pela diluição intensifica a repulsão entre as partículas, dificultando a floculação.

As comparações de valores da ADA em resposta a diferentes situações de manejo somente serão válidas se mantido o mesmo método de dispersão física. Freitas (2011) trabalhou com quatro solos de mineralogia contrastante, avaliando os teores da ADA obtidos por três métodos de dispersão física: agitação rápida a 12.000 rpm, durante 15 min; agitação lenta a 50 rpm, durante 16 h (cinco volumes de suspensão: 50, 100, 200, 300 e 400 mL, em recipientes de 500 mL); e ultrassom (três energias: 55, 110 e 220 J mL⁻¹). Nos quatro solos, verificou-se maior dispersão de argilas com a agitação lenta e o ultrassom, em relação direta com a energia aplicada. Os valores da ADA semelhantes aos da agitação rápida foram determinados por agitação lenta, utilizando volume de 400 mL de suspensão, em recipiente de 500 mL.

2.4. Condutividade hidráulica em meio saturado (K_0).

Com base na Lei de Darcy-Buckingham, a condutividade hidráulica em meio saturado (K_0) é definida como o volume de fluido que passa por um corpo sólido e poroso em um determinado tempo (Libardi, 2005). No solo, o corpo sólido é representado pelas partículas minerais e orgânicas.

Segundo Hillel (1971), entre as propriedades que influenciam a condutividade hidráulica do solo, podem ser mencionadas a porosidade, textura, densidade do solo, estabilidade estrutural, composição da solução do solo e do complexo de troca, expansibilidade e eventual presença de ar que bloqueia a passagem do fluido.

De acordo com Bagarello (1997), o sistema poroso do solo é dividido em macro e microporosidade. A maior proporção de macroporos facilita o movimento de água no longo do perfil; portanto, o manejo inadequado que possa afetar a porosidade do solo interfere diretamente sobre a condutividade hidráulica.

A utilização de permeâmetros de carga constante é um dos métodos mais utilizados para a determinação da condutividade hidráulica em laboratórios. Klute e Dirksen (1986) salientam que as determinações em laboratórios fornecem

resultados aproximados, sendo recomendadas quando as metodologias para avaliação em campo são impraticáveis.

A fim de padronizar os resultados, a determinação da K_0 em laboratório geralmente é realizada em meio saturado. Nesse contexto, o maior valor de condutividade hidráulica ocorre quando o solo apresenta à máxima quantidade de poros preenchidos por água, pois a saturação diminui as forças de adsorção do solo sobre a água (Reichardt, 1990).

A disponibilidade de água às plantas e o movimento de água no solo são fatores indispensáveis a serem analisados para uma agricultura sustentável e de alta produtividade. Hamblin (1985) ressalta que processos associados à degradação da estrutura do solo, como o impedimento ao crescimento das raízes e ao movimento de água, que acontecem tanto pelo encrostamento superficial como por compactação em camada subsuperficial, são considerados os maiores limitantes à produção das culturas.

Em regiões áridas e semiáridas, a salinização pode interferir negativamente nas propriedades físicas do solo. Nesse contexto, um dos processos críticos à estrutura do solo é a dispersão de argilas, geralmente agravada pelo excesso de sódio trocável associado à irrigação com água de baixa condutividade elétrica (Maia et al., 1998). As partículas dispersas tendem a obstruir os poros, limitando o movimento de água no solo, com conseguinte diminuição nos valores de condutividade hidráulica (Minhas & Sharma, 1986; Freire et al., 2003a).

De acordo Shainberg e Letey (1984), a elevada proporção de sódio trocável necessita de determinada concentração salina na solução do solo para que o efeito da dispersão não se intensifique. Os valores não limitantes de condutividade hidráulica podem ser mantidos, mesmo com altos valores de percentagem de sódio trocável, se a concentração da solução salina for superior a determinado nível crítico.

Segundo Lindsay (1979), a determinação da K_0 em laboratório, com o uso de água deionizada ou destilada, dilui a concentração salina da solução do solo

com o decréscimo da força iônica, favorecendo a dispersão de partículas e a obstrução dos poros, o que leva, eventualmente, a valores inferiores aos que seriam obtidos com ensaios no campo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Seleção dos Solos

Para realização do experimento, foram coletadas amostras de um horizonte de sete perfis de solos de referência do Estado de Pernambuco, classificados pela equipe de pedologia da Universidade Federal Rural de Pernambuco (Quadro 2). A fim de evitar interferências da matéria orgânica, as coletas foram preferencialmente no horizonte B, excetuando-se o Neossolo Flúvico por não possuir esse horizonte.

3.2. Caracterização dos Solos

Após a realização da coleta, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras de 2,0 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). No Quadro 3, encontram-se os resultados da caracterização física e, no Quadro 4, a caracterização química dos solos em estudo.

A caracterização mineralógica dos solos foi retirada de trabalhos previamente realizados (Quadro 5).

Quadro 2. Solos de referência do Estado de Pernambuco utilizados no estudo com indicação de horizonte (H), profundidade de amostragem (Prof.) e localização

Solo	Perfil ⁽¹⁾	Procedência	H	Prof. (cm)	Localização
Neossolo Flúvico (RY)	27	Ibimirim	A	0-25	07°52'21"S 36°57' 49"W
Luvissolo Háplico (TX)		Limoeiro	2Bt	25-52	07° 52' 29"S 35°27'01"W
Planossolo Háplico (SX)	14	São Caetano	2Bt	78-105	08°21'28" S 36°10'20"W
Luvissolo Crômico (TC)	29	Cabrobó	2Bt	20-50	08°30'10"S 39°19'39"W
Vertissolo Háplico (VX)	32	Bodocó	Biv	20-58	07°37'44"S 40°03'14"W
Cambissolo Háplico (CX)	31	Santa Cruz da Baixa Verde	Bi1	25-50	07°49'14"S 38°09'10"W
Chernossolo Argilúvico (MT)	05	Nazaré da Mata	Bt	57-80	07°44'32"S 35°14'04"W

⁽¹⁾/ Numeração atribuída pela Universidade Federal Rural de Pernambuco aos solos de referência do Estado de Pernambuco.

Quadro 3. Caracterização física das amostras de solo (TFSA)

Característica	RY ^{1/}	TX ^{2/}	SX ^{3/}	TC ^{4/}	VX ^{5/}	CX ^{6/}	MT ^{7/}
Areia grossa (kg kg ⁻¹) ^{8/}	0,360	0,159	0,415	0,333	0,303	0,233	0,165
Areia fina (kg kg ⁻¹) ^{8/}	0,216	0,388	0,112	0,190	0,203	0,247	0,100
Silte (kg kg ⁻¹) ^{8/}	0,211	0,213	0,070	0,144	0,156	0,191	0,237
Argila (kg kg ⁻¹) ^{8/}	0,213	0,240	0,403	0,333	0,338	0,329	0,498
Argila dispersa em água (kg kg ⁻¹) ^{8/}	0,122	0,093	0,221	0,122	0,110	0,076	0,125
Índice de dispersão ^{8/}	0,573	0,388	0,548	0,366	0,325	0,231	0,251
Densidade do solo (Provetas) (kg dm ⁻³) ^{9/}	1,292	1,204	1,359	1,243	1,311	1,282	1,049
Densidade de partículas (kg dm ⁻³) ^{9/}	2,624	2,707	2,628	2,585	2,631	2,630	2,627
Porosidade total (m ³ m ⁻³) ^{9/}	0,508	0,556	0,483	0,519	0,502	0,513	0,601
Equivalente de umidade (kg kg ⁻¹)	0,150	0,194	0,156	0,179	0,119	0,164	0,279

^{1/} Neossolo Flúvico. ^{2/} Luvissolo Háplico. ^{3/} Planossolo Háplico. ^{4/} Luvissolo Crômico. ^{5/} Vertissolo Háplico. ^{6/} Cambissolo Háplico. ^{7/} Chernossolo Argilúvico. ^{8/} (Ruiz, 2005). ^{9/} (Embrapa, 1997).

Quadro 4. Caracterização química das amostras de solo (TFSA)

Característica	RY ^{1/}	TX ^{2/}	SX ^{3/}	TC ^{4/}	VX ^{5/}	CX ^{6/}	MT ^{7/}
pH em água (1:2,5) ^{8/}	6,69	7,14	6,20	6,26	6,85	5,37	4,94
pH em KCl (1:2,5) ^{8/}	6,06	4,60	4,54	4,09	5,37	4,12	4,65
Δ pH ^{8/}	-0,63	-2,54	-1,66	-2,17	-1,48	-1,25	-0,29
Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹) ^{8/}	8,31	11,98	0,88	6,95	5,67	1,17	4,00
Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹) ^{8/}	4,45	7,60	4,80	4,64	0,90	0,40	1,37
K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹) ^{8/}	0,69	0,08	0,27	0,18	0,74	0,17	0,07
Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹) ^{8/}	1,37	0,35	1,00	0,25	0,03	0,03	0,17
Soma de bases (cmol _c kg ⁻¹) ^{8/}	14,83	20,00	6,94	12,02	7,34	1,76	5,62
(H+Al) (cmol _c kg ⁻¹) ⁸	0,00	0,60	4,40	0,00	2,40	2,80	2,90
CTC (Soma) (cmol _c kg ⁻¹) ⁸	14,83	20,00	11,34	12,02	9,74	4,56	8,52
CTC da fração argila (cmol _c kg ⁻¹) ⁸	69,62	85,83	28,14	36,10	28,82	13,86	17,11
Percentagem de sódio trocável ^{9/}	9,30	1,80	14,40	2,10	0,40	1,40	3,00
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹) ^{9/}	5,65	2,82	0,40	0,25	0,24	0,23	0,30
C orgânico (g kg ⁻¹) ^{10/}	8,60	6,30	4,00	6,70	2,80	7,30	9,20
P remanescente (mg L ⁻¹) ^{11/}	48,08	40,59	45,52	41,26	41,02	22,95	10,93

^{1/} Neossolo Flúvico. ^{2/} Luvisso Háplico. ^{3/} Planossolo Háplico. ^{4/} Luvisso Crômico. ^{5/} Vertissolo Háplico. ^{6/} Cambissolo Háplico. ^{7/} Chernossolo Argilúvico. ^{8/} (Embrapa, 1997). ^{9/} (Richards, 1954). ^{10/} (Yeomans & Bremner, 1988). ^{11/} (Alvarez V. & Fonseca, 1990)

Quadro 5. Caracterização mineralógica da fração argila dos solos

Solo	Horizonte	Minerais	Fonte
Neossolo Flúvico	A	Ilita, Esmeclita	Freire et al., 2003b
Luvisso Háplico	2Bt	Caulinita, Esmeclita	Freire et al., 2003b
Planossolo Háplico	2Bt	Caulinita, Ilita	Cunha, 2010
Luvisso Crômico	2Bt	Caulinita, Ilita	Cunha, 2010
Vertissolo Háplico	Biv	Caulinita, Ilita, Quartzo	Cunha, 2010
Cambissolo Háplico	Bi1	Caulinita, Ilita, Hematita	Souza et al., 2010
Chernossolo Argilúvico	Bt	Caulinita, Ilita, Goethita	Freire et al., 2003b

3.3. Tratamentos

Os tratamentos utilizados no ensaio para a determinação da argila dispersa corresponderam a um fatorial 7 x 6 x 5, sendo:

- Sete amostras de solo (Quadro 2).

- Seis ajustes da percentagem de sódio trocável (PST): 5; 10; 15; 20; 25 e 30%.
- Cinco condutividades elétricas (CE) da solução ajustada a 500 mL na determinação da proporção de argila natural: 0; 0,3; 0,6; 0,9 e 1,2 dS m⁻¹.

Para a determinação da condutividade hidráulica em meio saturado, os tratamentos usados no ensaio corresponderam a um fatorial 7 x 3 x 3, sendo:

- Sete amostras de solo (Quadro 2).
- Três ajustes da PST: 5; 15 e 30%.
- Três CE das soluções utilizadas nas determinações da K₀: 0; 0,6 e 1,2 dS m⁻¹.

Utilizou-se delineamento experimental em blocos casualizados para argila dispersa e condutividade hidráulica em meio saturado, com três e cinco repetições, respectivamente.

3.4. Procedimento Experimental

3.4.1. Ajuste da relação Na:Ca no complexo de troca catiônica

Para ajustar a relação Na:Ca do complexo de troca catiônica, utilizaram-se permeâmetros de carga constante montados com colunas de PVC de aproximadamente 5 cm de diâmetro por 14 cm de comprimento, apresentando na parte inferior tampa adaptada com sistema de drenagem e forrada com papel de filtro. Cada solo (TFSA) foi acondicionado cuidadosamente, homogeneizando a distribuição com bastão de vidro, a fim de evitar a formação de camadas de compactação diferente, até uma altura de 9 cm. Para não haver distúrbios na superfície pela passagem das soluções, foi colocado um disco de lã de vidro na parte superior da coluna.

Os valores da PST corresponderam a 5, 10, 15, 20, 25 e 30%. Previamente, determinou-se a relação de adsorção de sódio (RAS) de soluções de NaCl e CaCl₂ necessárias para atingir as PST de trabalho, por meio da equação (Pereira et al., 1982):

$$PST = \frac{100 (-0,0135 + 0,0212 \text{ RAS})}{1 + (-0,0135 + 0,0212 \text{ RAS})}$$

As soluções utilizadas para o ajuste da relação Na:Ca (soluções saturantes) foram preparadas de forma a chegar a uma concentração final de $50 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$. Os valores da $[\text{Na}^+]$ e $[\text{Ca}^{2+}]$ (Quadro 6) foram calculados, resolvendo as seguintes equações:

$$\text{RAS} = \frac{[\text{Na}^{2+}]}{\sqrt{[\text{Ca}^{2+}]/2}} \qquad [\text{Na}^+] + [\text{Ca}^{2+}] = 50 \text{ mmol}_c \text{ L}^{-1}$$

Para realizar a saturação, as colunas foram colocadas em bandejas contendo a solução saturante, conforme o tratamento, até uma altura correspondente a dois terços da altura da amostra de solo (6 cm), eliminando, ao máximo, o ar do espaço poroso do solo. A saturação ocorreu por um período de 48 horas (Freire et al., 2003a). Em seguida, foram montados permeâmetros de coluna vertical e carga constante (Figura 1) (Ferreira, 1999). A solução saturante foi aplicada até atingir o equilíbrio determinado pela igualdade na leitura de condutividade elétrica entre o efluente e a solução aplicada.

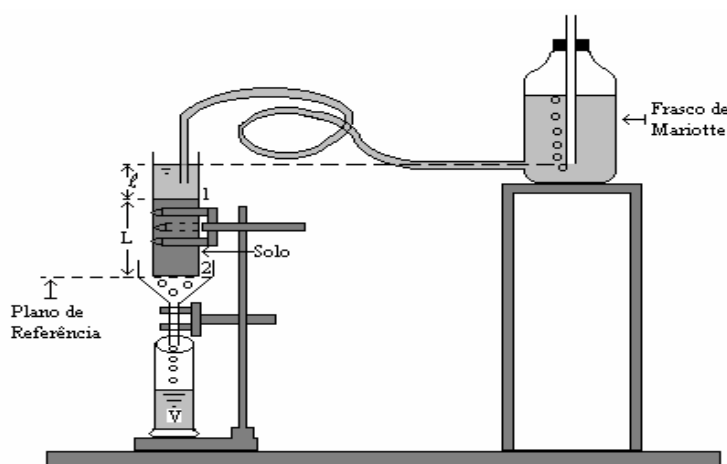


Figura 1. Esquema de permeâmetro de carga constante

Fonte: Ferreira, 1999.

Após o equilíbrio com as soluções de $\text{NaCl} + \text{CaCl}_2$, para os diferentes valores de RAS (Quadro 6), as amostras foram retiradas dos permeâmetros, secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2,0 mm para obtenção da TFSA. Em seguida, os solos foram lavados com álcool para a remoção dos sais solúveis, determinando-se as bases trocáveis (Embrapa, 1997) e as PST efetivamente

atingidas nos tratamentos (Quadro 7). Observam-se valores diferentes daqueles pretendidos. As diferenças foram originadas pela utilização da equação estabelecida por Pereira et al. (1982), que corresponde a uma média de todos os solos estudados por esses autores.

Quadro 6. Relação de adsorção de sódio (RAS) e concentrações dos cátions e sais necessárias para atingir as porcentagens de sódio trocável (PST) estabelecidas para o estudo

PST	RAS	Na ⁺	Ca ²⁺	NaCl	CaCl ₂
%	(mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}	mmol _c L ⁻¹		g L ⁻¹	
5	3,12	13,36	36,64	0,782	2,034
10	5,88	22,00	28,00	1,287	1,554
15	8,96	29,02	20,98	1,698	1,164
20	12,40	34,51	15,49	2,019	0,860
25	16,36	38,77	11,23	2,268	0,623
30	20,85	41,92	8,08	2,452	0,448

Quadro 7. Porcentagem de sódio trocável determinado nas amostras de solo, após equilíbrio com as soluções de NaCl e CaCl₂

Solo	Porcentagem de sódio trocável (%)					
	5	10	15	20	25	30
	%					
Neossolo Flúvico	9,4	14,7	17,8	23,0	27,8	36,0
Luvissolo Háplico	6,8	10,2	18,7	24,4	26,6	34,0
Planossolo Háplico	7,8	12,4	20,0	22,7	29,2	35,8
Luvissolo Crômico	5,6	9,1	20,5	24,1	27,8	31,6
Vertissolo Háplico	8,3	11,5	22,0	27,3	30,5	34,2
Cambissolo Háplico	6,0	9,2	15,1	20,5	28,9	30,4
Chernossolo Argilúvico	6,0	7,4	16,9	21,1	24,9	28,6

3.4.2. Determinação da argila dispersa

Antes de determinar a argila dispersa (AD), as soluções concentradas apresentadas no Quadro 6, que apresentavam CE de aproximadamente $5,0 \text{ dS m}^{-1}$, foram diluídas com água deionizada para atingir as condutividades elétricas de trabalho de 0,3; 0,6; 0,9; e $1,2 \text{ dS m}^{-1}$. O tratamento de 0 dS m^{-1} foi realizado apenas com água deionizada. Utilizou-se o termo genérico “soluções de trabalho”, com base na consideração que água destilada ou deionizada pode ser considerada como solução infinitamente diluída.

Os procedimentos para a determinação da AD foram realizados, segundo a rotina do Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da UFV:

- Pesaram-se 10 g de TFSA em garrafas plásticas de 500 mL com aproximação de 0,01 g, para cada valor da PST preestabelecido (5, 10, 15, 20, 25 e 30%).
- Adicionaram-se, seguidamente, 400 mL de solução de trabalho (0; 0,3; 0,6; 0,9 e $1,2 \text{ dS m}^{-1}$) na relação Na:Ca indicada para cada PST (Quadro 6), com agitação durante 16 h, em agitador rotatório tipo Wagner, a 50 rpm.
- Transferiu-se a suspensão para proveta de 500 mL, após decorrer o tempo, com a complementação do volume com a solução de trabalho adequada a cada caso.
- Calculou-se o tempo de sedimentação, nos 5 cm superficiais da proveta, de acordo com a Lei de Stokes, após a determinação da temperatura. Nos cálculos, foram utilizadas a densidade de partículas de cada solo (Quadro 3) e a densidade de cada solução de trabalho, utilizando-se o densímetro digital de bancada modelo DMA 5000 M Anton Paar (Quadro 8).
- Decorrido o tempo calculado, retirou-se alíquota de 25 mL, levando-se a estufa a 100°C por 48 horas e pesando-se com aproximação de 0,0001 g;
- Paralelamente realizou-se uma prova em branco com três repetições, onde foi retirada alíquota de 25 mL das soluções de trabalho, levadas a estufa a 100°C por 48 horas e pesadas com aproximação de 0,0001 g, obtendo-se com isso, a massa dos sais ao qual foi subtraída nos cálculos para determinação da argila dispersa.
- Com os valores obtidos calculou-se a proporção de argila dispersa (AD). Calcularam-se também o índice de dispersão (ID), determinado pela razão entre

os valores de argila dispersa e argila total de cada solo (Quadro 3) e o índice de dispersão relativo (IDR), atribuindo-se valor unitário ao máximo valor médio de ID de cada solo. Os valores de ID e IDR permitem padronizar resultados e comparar solos com diferentes proporções de argila total.

Quadro 8. Densidade média das soluções de trabalho determinada a 25 °C, considerando a percentagem de sódio trocável pretendida e a condutividade elétrica da solução (CE)

Condutividade elétrica	Percentagem de sódio trocável (%)					
	5	10	15	20	25	30
dS m ⁻¹	kg m ⁻³					
0	997,160	997,159	997,167	997,171	997,161	997,160
0,3	997,260	997,271	997,264	997,263	997,260	997,267
0,6	997,391	997,386	997,379	997,379	997,368	997,372
0,9	997,511	997,470	997,507	997,483	997,488	997,441
1,2	997,630	997,617	997,617	997,611	997,604	997,595

3.4.3. Determinação da condutividade hidráulica em meio saturado

A condutividade hidráulica em meio saturado (K_0) foi determinada nas amostras com PST ajustado a 5, 15 e 30%, utilizando-se soluções percolantes de CE igual 0; 0,6; e 1,2 dS m⁻¹.

Prévia à determinação da K_0 , as soluções concentradas apresentadas no Quadro 3, com CE de aproximadamente 5,0 dS m⁻¹, foram diluídas com água deionizada de forma a atingir os valores de trabalho de 0,6 e 1,2 dS m⁻¹. O tratamento de 0 dS m⁻¹ foi realizado apenas com água deionizada.

O procedimento, com cinco repetições, foi realizado seguindo a rotina do Laboratório de Física do Solo da UFV:

- As amostras dos solos ajustadas aos valores da PST foram secas ao ar, destorroadas, passadas em peneira de 2,0 mm e acondicionadas uniformemente nos permeâmetros a uma altura de $L = 4,0$ cm (Figura 1). Seguidamente, essas foram levadas para saturar por um período de 48 horas

(Freire et al., 2003a), que ocorreu em sentido ascendente, para eliminar o máximo de ar presente nos poros do solo. Utilizou-se água deionizada ou as soluções indicadas para cada tratamento.

- Os permeâmetros, após saturação, foram transferidos para a estrutura exemplificada na Figura 1. Seguidamente, uma lâmina de solução de 3 cm de espessura (ℓ) foi aplicada, utilizando-se o sistema de frasco de Mariotte, para manutenção de carga constante (Ferreira, 1999). Um funil, também preso ao suporte por uma garra, recolheu a solução percolada para uma proveta.
- O escoamento permanente foi estabelecido, cronometrando-se o tempo (t) para o recolhimento de um volume de água na proveta (V). Foram considerados adequados os valores de V e t , que apresentaram reprodutibilidade em cinco determinações sucessivas. Com esses valores, calculou-se a condutividade hidráulica em meio saturado à temperatura de trabalho (K_e):

$$K_e = \frac{VL}{At(L + \ell)}$$

Para ser estabelecida a condutividade hidráulica em meio saturado a 20 °C (K_0), levou-se em consideração a relação de viscosidades (η) entre a temperatura de trabalho (e) e a temperatura de 20 °C, utilizada na padronização:

$$K_0 = K_e \frac{\eta_{20}}{\eta_e}$$

Com intuito de facilitar a visualização nas modificações da K_0 com os tratamentos impostos, foi determinada a condutividade hidráulica relativa (K_{0R}) descrita por Freire et al. (2003a), atribuindo-se valor unitário à máxima K_0 média de cada solo.

3.5. Análises Estatísticas

Os valores de AD, ID e IDR foram analisados estatisticamente. Na análise de variância, os solos foram agrupados, após verificação de homogeneidade de variâncias. No Quadro 9, apresenta-se o esquema da análise de variância.

Quadro 9. Esquema da análise de variância dos teores de argila dispersa

Fonte	GL
Blocos	2
Solos	6
PST e CE d/ Neossolo Flúvico	29
PST e CE d/ Luvisolo Háptico	29
PST e CE d/ Planossolo Háptico	29
PST e CE d/ Luvisolo Crômico	29
PST e CE d/ Vertissolo Háptico	29
PST e CE d/ Cambissolo Háptico	29
PST e CE d/ Chernossolo Argilúvico	29
Resíduo	418

Os 29 graus de liberdade para a PST do solo e CE da solução de trabalho foram analisados, para cada solo, ajustando-se superfícies de resposta. Escolheu-se o modelo com maior coeficiente de determinação ajustado que apresentasse parâmetros significativos até 5% pelo teste t.

Os valores de K_0 e de K_{0R} foram também analisados estatisticamente. Na análise de variância os solos, esses foram agrupados após verificação de homogeneidade de variâncias. No Quadro 10, é apresentado o esquema da análise de variância, considerando-se a totalidade dos solos estudados.

Os oito graus de liberdade para PST do solo e CE da solução de trabalho foram analisados, por meio de contrastes ortogonais (Quadro 11). Na apresentação dos resultados, utilizaram-se contrastes médios, calculados, dividindo o valor numérico dos contrastes pela soma dos módulos dos coeficientes divididos por dois (Alvarez V. & Alvarez, 2006). Já na discussão desses, foi indicada a diferença estatística para contrastes significativos até 5%, reservando-se a expressão “tendência” para contrastes significativos entre 5 e 20%.

Quadro 10. Esquema da análise de variância da condutividade hidráulica

Fonte	GL
Blocos	4
Solos	6
PST e CE d/ Neossolo Flúvico	8
PST e CE d/ Luvisolo Háplico	8
PST e CE d/ Planossolo Háplico	8
PST e CE d/ Luvisolo Crômico	8
PST e CE d/ Vertissolo Háplico	8
PST e CE d/ Cambissolo Háplico	8
PST e CE d/ Chernossolo Argilúvico	8
Resíduo	248

Quadro 11. Contrastes ortogonais (C_i) analisados para comparar a condutividade hidráulica em cada solo, considerando a percentagem de sódio trocável (PST) e a condutividade elétrica da solução aplicada (CE)

PST	CE	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
%	dS m ⁻¹								
5	0	-2	0	-1	-1	0	0	0	0
	0,6	-2	0	-1	1	0	0	0	0
	1,2	-2	0	2	0	0	0	0	0
15	0	1	-1	0	0	-1	-1	0	0
	0,6	1	-1	0	0	-1	1	0	0
	1,2	1	-1	0	0	2	0	0	0
30	0	1	1	0	0	0	0	-1	-1
	0,6	1	1	0	0	0	0	-1	1
	1,2	1	1	0	0	0	0	2	0

^{1/} C_1 : PST 5% vs 15 e 30%. C_2 : PST 15% vs 30%. C_3 : CE 0 e 0,6 dS m⁻¹ vs 1,2 dS m⁻¹ d/PST 5%. C_4 : CE 0 dS m⁻¹ vs 0,6 dS m⁻¹ d/PST 5%. C_5 : CE 0 e 0,6 dS m⁻¹ vs 1,2 dS m⁻¹ d/PST 15%. C_6 : CE 0 dS m⁻¹ vs 0,6 dS m⁻¹ d/PST 15%. C_7 : CE 0 e 0,6 dS m⁻¹ vs 1,2 dS m⁻¹ d/PST 30%. C_8 : CE 0 dS m⁻¹ vs 0,6 dS m⁻¹ d/PST 30%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Argila Dispersa

Os resultados da argila dispersa (AD) para os sete solos em estudo são apresentados nos Quadros 12 e 13. Verifica-se, em relação às determinações utilizando-se apenas água deionizada como solução de trabalho, que os valores da AD crescem com o incremento na PST do solo. Essa análise, normalmente realizada em laboratório e indicada como argila dispersa em água (ADA), é usada na caracterização do solo e em estudos normalmente associados ao manejo do solo, como forma de determinar a eventual susceptibilidade à erosão ou o comprometimento da estrutura.

O aumento na concentração de sais nas soluções de trabalho resultou em decréscimos nos valores da AD para todos os solos em estudo (Quadros 12 e 13). Em solos afetados por sais, onde geralmente há predominância de argila de alta atividade, a concentração salina da solução é de fundamental importância para os fenômenos de floculação e dispersão (Lindsay, 1979).

Quadro 12. Argila dispersa das amostras do Neossolo Flúvico, Luvisolo Háplico, Planossolo Háplico e Luvisolo Crômico, considerando a percentagem de sódio trocável e a condutividade elétrica da solução utilizada (CE)

CE	Percentagem de sódio trocável (%)					
	5	10	15	20	25	30
dS m ⁻¹	kg kg ⁻¹					
Neossolo Flúvico						
0	0,1023	0,1147	0,1331	0,1538	0,1737	0,1973
0,3	0,0154	0,0404	0,1050	0,1200	0,1285	0,1519
0,6	0,0039	0,0070	0,0150	0,0177	0,0968	0,1324
0,9	0,0011	0,0059	0,0087	0,0049	0,0151	0,0494
1,2	0,0027	0,0036	0,0044	0,0029	0,0056	0,0081
Luvisolo Háplico						
0	0,0662	0,0748	0,1025	0,1121	0,1166	0,1502
0,3	0,0068	0,0009	0,0821	0,0690	0,0754	0,1071
0,6	0,0041	0,0017	0,0073	0,0004	0,0052	0,0320
0,9	0,0027	0,0027	0,0083	0,0018	0,0012	0,0022
1,2	0,0017	0,0010	0,0012	0,0010	0,0008	0,0000
Planossolo Háplico						
0	0,1848	0,2071	0,1973	0,2193	0,2505	0,2668
0,3	0,0094	0,0127	0,1647	0,1862	0,2005	0,2026
0,6	0,0020	0,0049	0,0075	0,0168	0,0626	0,1897
0,9	0,0034	0,0000	0,0055	0,0035	0,0094	0,0150
1,2	0,0003	0,0024	0,0049	0,0018	0,0031	0,0055
Luvisolo Crômico						
0	0,1342	0,1416	0,1491	0,2209	0,2308	0,2634
0,3	0,0032	0,0030	0,0048	0,0176	0,1454	0,1768
0,6	0,0035	0,0017	0,0013	0,0017	0,0020	0,0041
0,9	0,0024	0,0007	0,0073	0,0012	0,0023	0,0004
1,2	0,0055	0,0070	0,0015	0,0021	0,0012	0,0000

Quadro 13. Argila dispersa das amostras do Vertissolo Crômico, Cambissolo Háplico e Chernossolo Argilúvico, considerando a percentagem de sódio trocável e a condutividade elétrica da solução utilizada (CE)

CE	Percentagem de sódio trocável (%)					
	5	10	15	20	25	30
dS m ⁻¹	kg kg ⁻¹					
Vertissolo Háplico						
0	0,1075	0,1043	0,1147	0,1309	0,1388	0,1537
0,3	0,0072	0,0034	0,0259	0,0989	0,1091	0,1061
0,6	0,0040	0,0015	0,0066	0,0029	0,0115	0,0206
0,9	0,0012	0,0018	0,0024	0,0020	0,0047	0,0025
1,2	0,0059	0,0027	0,0041	0,0057	0,0028	0,0006
Cambissolo Háplico						
0	0,0029	0,0069	0,0061	0,0081	0,0148	0,0541
0,3	0,0050	0,0010	0,0041	0,0063	0,0012	0,0034
0,6	0,0023	0,0010	0,0054	0,0012	0,0010	0,0026
0,9	0,0038	0,0025	0,0057	0,0019	0,0021	0,0021
1,2	0,0036	0,0034	0,0036	0,0024	0,0022	0,0008
Chernossolo Argilúvico						
0	0,0038	0,0083	0,0054	0,0122	0,0681	0,1255
0,3	0,0042	0,0018	0,0054	0,0055	0,0023	0,0038
0,6	0,0030	0,0057	0,0033	0,0008	0,0029	0,0030
0,9	0,0030	0,0011	0,0011	0,0029	0,0035	0,0004
1,2	0,0053	0,0047	0,0030	0,0065	0,0023	0,0012

As modificações na CE da solução solo, pelo acréscimo de elevado volume de água deionizada ou destilada na determinação da ADA, podem interferir nos resultados da AD, principalmente em solos salinos e salino-sódicos. Velasco-Molina et al. (1971) e Freire et al. (2003b) relatam que não foram verificadas diferenças acentuadas nos valores da ADA, em resposta ao incremento da CE do extrato da pasta de saturação do mesmo solo, utilizando o método para

determinação da ADA apenas com água deionizada como solução de trabalho para as análises. Freire et al. (2003b) citam que esse fato deve estar relacionado à diluição da concentração salina desses solos durante a determinação da ADA, favorecendo à superestimação dos valores de argila naturalmente dispersa. Levando em consideração que 10 g de solo são submetidos à dispersão física, com volume final de 500 mL, e que a porosidade do solo é de aproximadamente $0,5 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, a diluição da concentração salina do extrato da pasta de saturação é de aproximadamente 100 vezes.

Os valores determinados da AD foram analisados estatisticamente, verificando-se a homogeneidade de variâncias para os sete solos, o que possibilitou a comparação entre médias, aplicando o teste Scott-Knott (Quadro 14). Um dos fatores relacionados às proporções médias da AD é a caracterização mineralógica dos solos em estudo (Quadro 5). Verificou-se que valores médios extremamente baixos da AD foram apresentados pelo Chernossolo Argilúvico, com goethita na fração argila e pelo Cambissolo Háplico, com a presença de hematita (Quadro 5).

Considera-se, em consequência, a região fisiográfica onde ocorreu a coleta dos solos determinante nos resultados da AD. A coleta dos cinco solos (Neossolo Flúvico, Luvisolo Háplico, Planossolo Háplico, Luvisolo Crômico e Vertissolo

Quadro 14. Valores médios da argila dispersa dos solos em estudo, comparados pelo teste de Scott-Knott

Solo	Argila dispersa ^{1/}
	kg kg ⁻¹
Planossolo Háplico	0,0818 A
Neossolo Flúvico	0,0607 B
Luvisolo Crômico	0,0512 C
Vertissolo Háplico	0,0395 D
Luvisolo Háplico	0,0346 E
Chernossolo Argilúvico	0,0100 F
Cambissolo Háplico	0,0054 G

^{1/} Letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas a 5%.

Háplico) foi realizada em ambientes tipicamente semiáridos, que apresentam baixos índices pluviométricos, precipitação inconstante e elevadas temperaturas em todas as épocas do ano. A coleta do Chernossolo Argilúvico foi realizada na Zona da Mata, região com elevados índices pluviométricos, quando comparada ao semiárido nordestino. Já o Cambissolo Háplico foi coletado em uma região do sertão de Pernambuco, conhecida como brejo de altitude, que constitui uma disjunção da Mata Atlântica, formando ilhas de floresta úmida em plena região semiárida. Apresenta condição climática bastante atípica, favorecida pela ocorrência de chuvas orográficas, com precipitação pluvial que pode atingir valores superiores a 1.200 mm por ano (Souza et al., 2010). As condições ambientais em que se inserem os dois últimos solos possibilitam a formação de microagregados estáveis, dificilmente dispersos pela agitação mecânica aplicada na determinação da proporção de argilas no laboratório.

Os resultados obtidos para AD (Quadro 14) apresentam elevada correlação ($r = 0,85^{**}$) com os valores de P-remanescente (Quadro 4). Alvarez V. et al. (2000) destacam que os resultados de P-remanescente são influenciados pela textura do solo. Nesse contexto, solos mais argilosos tendem a apresentar maior adsorção de P e, com isso, menores valores de P-remanescente quando comparado a solos mais arenosos.

Nos solos deste estudo, a correlação entre a proporção de argila (Quadro 3) e o P-remanescente (Quadro 4) não foi significativa ($r = -0,25$), em razão das proporções próximas de argila total e da elevada variabilidade do P-remanescente.

Os valores do P-remanescente, se não respondem à composição granulométrica, devem variar em resposta à mineralogia da fração argila. Nesse caso, a maior proporção de argilas ativas, com menor afinidade pelo P, frente aos materiais mais oxídicos nos solos com menor dispersão de argilas, justifica o sinal positivo do coeficiente de correlação linear ($r = 0,85^{**}$), quando relaciona a AD com o P-remanescente.

Com a utilização dos valores da AD, determinados para cada solo, foram calculadas as superfícies de resposta, relacionando essa variável dependente com a PST do solo e a CE da solução de trabalho. No cálculo das superfícies de resposta, utilizaram-se, para cada solo, os valores da PST apresentados no Quadro 7. Os modelos ajustados são apresentados no Quadro 15.

O Cambissolo Háplico teve resposta diferenciada, com valores praticamente nulos da AD nos tratamentos com $CE \geq 0,3 \text{ dS m}^{-1}$ (Quadro 13). Nesse solo, com presença de hematita, somente foi determinada a relação entre AD e PST no tratamento que utilizou água deionizada (Quadro 15). Mesmo nesse tratamento, os teores da ADA ficaram no intervalo de 0,0029 a 0,0541 kg kg^{-1} , para PST de 5 e 30%, respectivamente.

Nas superfícies de resposta listadas no Quadro 15, foram realizadas cortes, determinando-se curvas para valores da PST de 10,15, 20, 25 e 30% (Figuras 2 e 3). Esses valores da PST foram escolhidos por corresponder aos inicialmente propostos para o ensaio e por estarem inclusos no intervalo de abrangência dos PST determinados nos diferentes solos. Nenhum solo apresentou $PST \leq 5\%$ (Quadro 7).

Quadro 15. Equações de regressão relacionando a argila dispersa das amostras de solo (AD), em kg kg⁻¹, com a percentagem de o sódio trocável (PST) e a condutividade elétrica (CE), em dS m⁻¹

Solo	Equação de regressão	R ²
Neossolo Flúvico	$AD = 0,04004 + 0,004633 **PST + 0,00001540 *PST^2 - 0,1415 ** CE + 0,08107 ** CE^2 - 0,003563 ** PST CE$	0,925
Luvissolo Háplico	$AD = 0,03574 + 0,003463** PST - 0,1464** CE + 0,1051** CE^2 - 0,003290** PST CE$	0,933
Planossolo Háplico	$AD = 0,1084 + 0,004440** PST + 0,00004056** PST^2 - 0,3005** CE + 0,1728** CE^2 - 0,004408 ** PST CE$	0,880
Luvissolo Crômico	$AD = 0,1181 - 0,001019** PST + 0,0001768** PST^2 - 0,3412 ** CE + 0,2540** CE^2 - 0,005415 ** PST CE$	0,898
Vertissolo Háplico	$AD = 0,07422 + 0,001015 *PST + 0,00004787** PST^2 - 0,2106** CE + 0,1434** CE^2 - 0,002737 ** PST CE$	0,919
Cambissolo Háplico ^{1/}	$AD = 1/(319,2530 - 9,5950** PST)$	0,759
Chernossolo Argilúvico	$AD = - 0,003314 + 0,00009293 PST + 0,0001027** PST^2 + 0,05102** CE - 0,01542 *CE^{0,5} - 0,004012 ** PST CE^{0,5}$	0,710

* e **: significativos a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste t.

^{1/} Equação de regressão calculada com dados experimentais de CE = 0 dS m⁻¹.

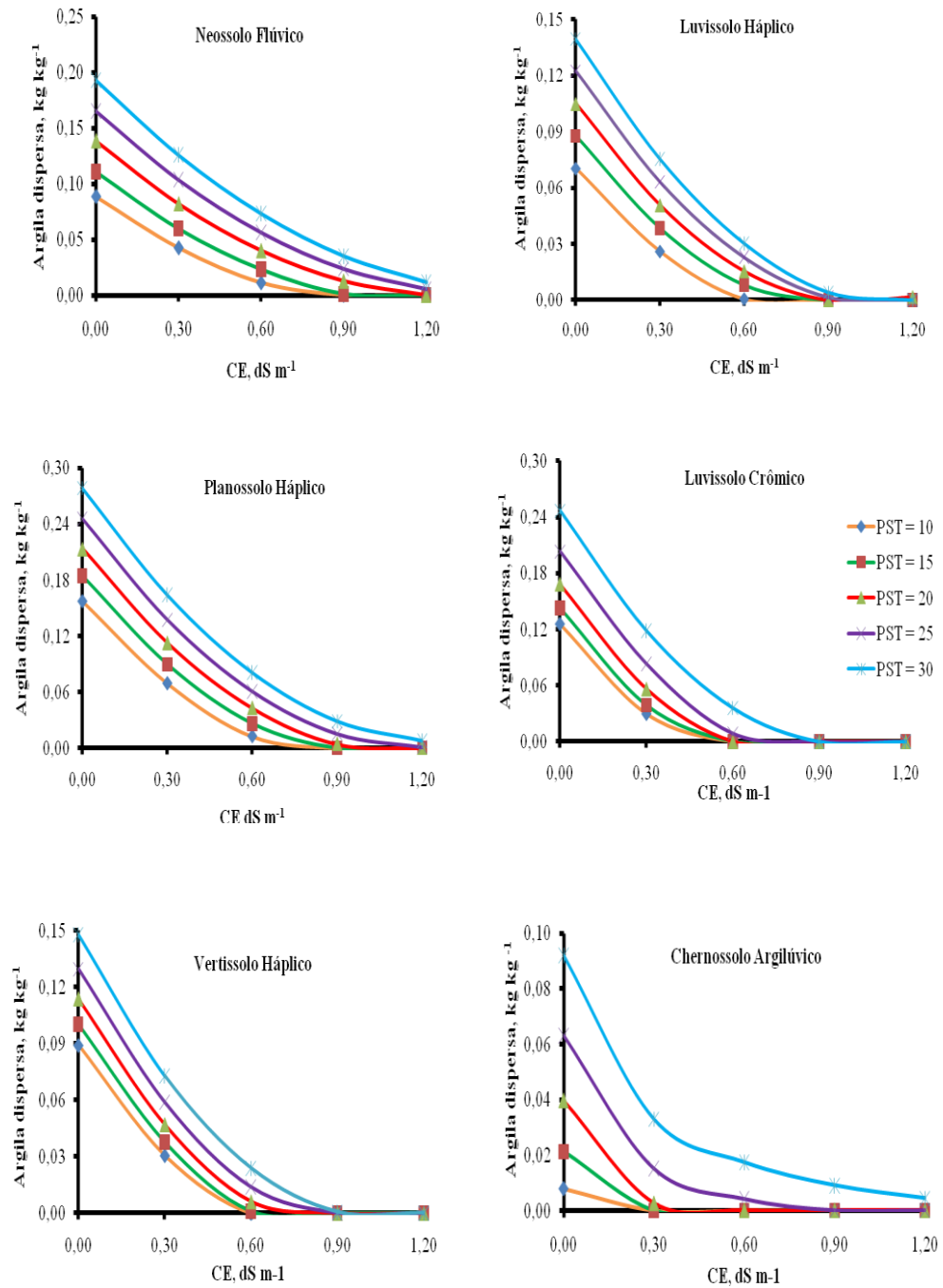


Figura 2. Argila dispersa do Neossolo Flúvico, Luvisolo Háptico, Planossolo Háptico, Luvisolo Crômico, Vertissolo Háptico e Chernossolo Argilúvico, em resposta à condutividade elétrica (CE) da solução, para diferentes porcentagens de sódio trocável (PST).

Pelos cortes realizados nas superfícies de resposta, apresentados no Quadro 15 e representados nas Figuras 2 e 3, observa-se, nos seis solos, que a interação significativa PST x CE leva ao não paralelismo entre as diferentes curvas de cada solo. Em todos os casos, há estreitamento nas diferenças dos valores de AD, para os distintos valores da PST, com o incremento da CE. Nas maiores CE, a proporção da AD é desprezível.

O Chernossolo Argilúvico foi o solo com diferenças mais acentuadas, proporcionalmente nos valores da AD com o incremento na PST (Figura 3). Apesar de ser o material mais argiloso, foi o que apresentou a segunda menor proporção da ADA ($CE = 0 \text{ dS m}^{-1}$) (Figuras 3 e 4). Nesse solo, a resposta à CE da solução de trabalho levou à floculação praticamente integral das argilas na solução de $0,3 \text{ dS m}^{-1}$ para valores da PST inferiores a 20%.

O Cambissolo Háplico, como foi ressaltado, foi o solo menos susceptível à dispersão, mantendo praticamente a totalidade de argilas floculadas, já com a utilização da solução de trabalho com CE de $0,3 \text{ dS m}^{-1}$. Em consequência, a curva de resposta da AD ao incremento da PST é somente apresentada para a determinação de 0 dS m^{-1} (Figura 4). Nela, observa-se que a resposta, como esperado, indica relação direta entre a ADA e a PST do solo.

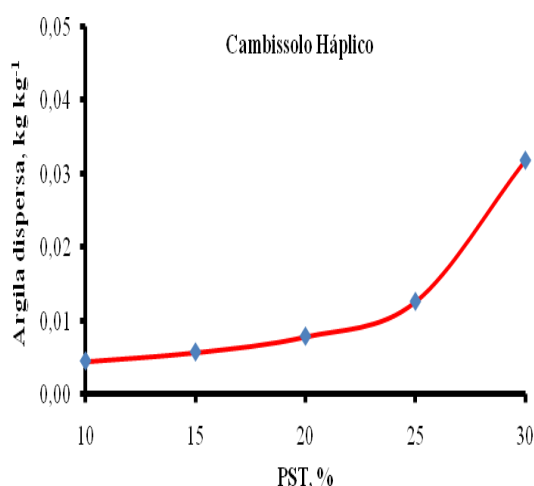


Figura 3. Argila dispersa em água ($CE = 0 \text{ dS m}^{-1}$) do Cambissolo Háplico, em resposta à percentagem de sódio trocável (PST).

Os resultados apresentam claramente que a determinação da argila dispersa em água não é uma análise adequada para solos afetados por sais, em especial os salinos e salino-sódicos. O limite classicamente estabelecido para diferenciar os solos salinos corresponde à $CE \geq 4 \text{ dS m}^{-1}$. Nas condições experimentais, utilizando amostras de sete solos representativos do Estado de Pernambuco, observou-se floculação praticamente integral de argilas, em todos os solos, quando se utilizou a solução de $CE = 1,2 \text{ dS m}^{-1}$ (Figuras 2 e 3).

Uma análise laboratorial mais demorada, porém apropriada para os solos indicados, deveria levar em consideração a CE do extrato da pasta de saturação e a proporção de Na no complexo de troca catiônica. Para simplificar a análise, a CE do extrato da pasta de saturação poderia ser substituída pela CE do extrato 1:1 e duplicar esse valor para utilizá-lo na solução de trabalho (CE_{ST}). Com os valores dos cátions trocáveis, calcular-se-ia a relação $Na/(Ca + Mg + K)$. Essa relação seria usada para indicar as proporções no preparo de solução de $NaCl + CaCl_2$, expressas em $mmol_c L^{-1}$, que logo seria ajustada à CE_{ST} .

Associado à AD, o índice de dispersão (ID) é definido pela razão entre os valores da argila dispersa (AD) (Quadros 12 e 13) e os da argila total de cada amostra de solo, determinada pela análise textural (Quadro 3). O ID permite avaliar o comportamento de solos com diferentes proporções de argila total, facilitando a comparação. Os valores médios do ID para os sete solos em estudo encontram-se nos Quadros 16 e 17.

Assim como na determinação da AD, foram estabelecidas equações de regressão para cada solo, em que a variável dependente ID foi relacionada com a PST do solo e a CE na solução de trabalho (Quadro 18). De forma semelhante, foram realizados cortes nas superfícies de resposta, estabelecendo-se curvas para valores da PST no intervalo entre 10 e 30% (Figuras 5 e 6). As respostas mais acentuadas à CE e PST foram observadas nos solos coletados em regiões de clima tipicamente semiárido, com ênfase para o Neossolo Flúvico. No Cambissolo Háplico, pelas razões previamente expostas, somente ajustou-se a equação de regressão para o tratamento de 0 dS m^{-1} (Figura 7).

Quadro 16. Índice de dispersão das amostras do Neossolo Flúvico, Luvissole Háplico, Planossolo Háplico e Luvissole Crômico, considerando a percentagem de sódio trocável e a condutividade elétrica da solução utilizada (CE)

CE	Percentagem de sódio trocável (%)					
	5	10	15	20	25	30
dS m ⁻¹						
Neossolo Flúvico						
0	0,4803	0,5387	0,6251	0,7221	0,8153	0,9262
0,3	0,0722	0,1896	0,4929	0,5635	0,6035	0,7131
0,6	0,0184	0,0330	0,0706	0,0832	0,4542	0,6215
0,9	0,0049	0,0275	0,0406	0,0229	0,0709	0,2318
1,2	0,0129	0,0171	0,0206	0,0135	0,0264	0,0380
Luvissole Háplico						
0	0,2758	0,3118	0,4269	0,4672	0,4858	0,6257
0,3	0,0283	0,0037	0,3419	0,2875	0,3142	0,4463
0,6	0,0169	0,0071	0,0306	0,0018	0,0215	0,1333
0,9	0,0112	0,0114	0,0346	0,0076	0,0051	0,0090
1,2	0,0072	0,0041	0,0049	0,0043	0,0034	0,0000
Planossolo Háplico						
0	0,4586	0,5139	0,4269	0,5441	0,6215	0,6621
0,3	0,0233	0,0316	0,3419	0,4620	0,4975	0,5027
0,6	0,0050	0,0121	0,0306	0,0418	0,1553	0,4708
0,9	0,0084	0,0000	0,0346	0,0086	0,0233	0,0373
1,2	0,0007	0,0060	0,0049	0,0044	0,0076	0,0137
Luvissole Crômico						
0	0,4029	0,4252	0,4479	0,6634	0,6931	0,7910
0,3	0,0097	0,0089	0,0144	0,0530	0,4367	0,5310
0,6	0,0106	0,0052	0,0040	0,0051	0,0060	0,0124
0,9	0,0071	0,0020	0,0219	0,0035	0,0070	0,0011
1,2	0,0165	0,0209	0,0045	0,0062	0,0035	0,0000

Quadro 17. Índice de dispersão das amostras do Vertissolo Crômico, do Cambissolo Háplico e do Chernossolo Argilúvico, considerando a percentagem de sódio trocável e a condutividade elétrica da solução utilizada (CE)

CE	Percentagem de sódio trocável (%)					
	5	10	15	20	25	30
dS m ⁻¹						
	Vertissolo Háplico					
0	0,3181	0,3086	0,3394	0,3873	0,4106	0,4549
0,3	0,0213	0,0101	0,0767	0,2925	0,3229	0,3138
0,6	0,0119	0,0043	0,0195	0,0085	0,0340	0,0610
0,9	0,0037	0,0054	0,0072	0,0058	0,0139	0,0075
1,2	0,0175	0,0080	0,0097	0,0169	0,0082	0,0017
	Cambissolo Háplico					
0	0,0089	0,0211	0,0186	0,0246	0,0451	0,1643
0,3	0,0153	0,0029	0,0124	0,0190	0,0035	0,0103
0,6	0,0070	0,0031	0,0163	0,0037	0,0032	0,0079
0,9	0,0114	0,0076	0,0174	0,0059	0,0064	0,0065
1,2	0,0111	0,0102	0,0110	0,0072	0,0068	0,0025
	Chernossolo Argilúvico					
0	0,0076	0,0167	0,0109	0,0245	0,1368	0,2521
0,3	0,0084	0,0036	0,0109	0,0110	0,0047	0,0077
0,6	0,0059	0,0114	0,0065	0,0016	0,0058	0,0059
0,9	0,0061	0,0023	0,0023	0,0057	0,0070	0,0007
1,2	0,0106	0,0094	0,0059	0,0130	0,0046	0,0024

Quadro 18. Equações de regressão, relacionando o índice de dispersão das amostras de solo (ID) com a percentagem de sódio trocável (PST) e a condutividade elétrica (CE), em dS m⁻¹

Solo	Equação de regressão	R ²
Neossolo Flúvico	ID = 0,1561 + 0,02505** PST – 0,6643** CE + 0,3806** CE ² – 0,01673** PST CE	0,925
Luvissolo Háplico	ID = 0,1489 + 0,01443** PST – 0,6099** CE + 0,4380** CE ² – 0,01371** PST CE	0,933
Planossolo Háplico	ID = 0,2689 + 0,01102** PST + 0,0001006 ** PST ² – 0,7456** CE + 0,4289** CE ² – 0,01094** PST CE	0,880
Luvissolo Crômico	ID = 0,3547 - 0,003059** PST + 0,0005310** PST ² - 1,0246** CE + 0,7629** CE ² – 0,01626** PST CE	0,900
Vertissolo Háplico	ID = 0,2196 + 0,003003** PST + 0,0001416** PST ² – 0,6232** CE + 0,4243** CE ² – 0,008098** PST CE	0,919
Cambissolo Háplico ^{1/}	ID = 1/ (105,0340 – 3,1568** PST)	0,759
Chernossolo Argilúvico	ID = - 0,006655 + 0,0001866 PST + 0,0002062** PST ² + 0,1025** CE - 0,03095 *CE ^{0,5} – 0,008056** PST CE ^{0,5}	0,709

* e **: significativos a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste t.

^{1/} Equação de regressão calculada com dados experimentais de CE = 0 dS m⁻¹.

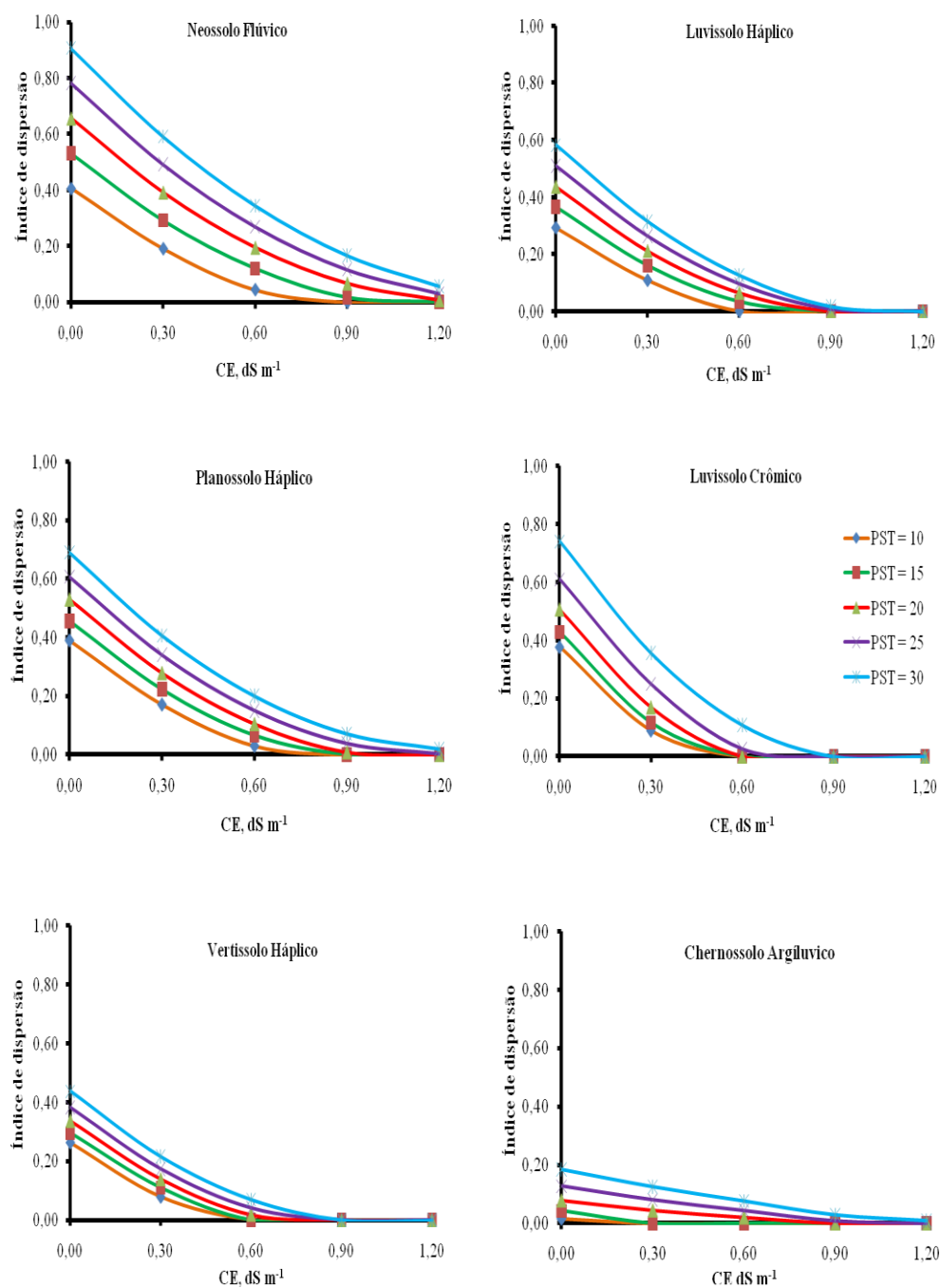


Figura 4. Índice de dispersão do Neossolo Flúvico, Luvissole Háplico, Planossolo Háplico, Luvissole Crômico, Vertissolo Háplico e Chernossolo Argilúvico, em resposta à condutividade elétrica (CE) da solução, para diferentes porcentagens de sódio trocável (PST).

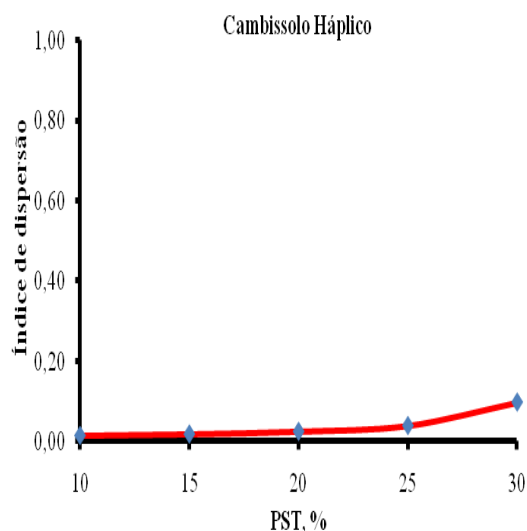


Figura 5. Índice de dispersão ($CE = 0 \text{ dS m}^{-1}$) do Cambissolo Háplico, em resposta à percentagem de sódio trocável (PST).

Na consideração da PST e CE, o ID dos outros solos menos intemperizados e com presença maior de argilas mais ativas (Luvissole Háplico, Planossolo Háplico, Luvissole Crômico e Vertissolo Háplico) teve resposta semelhante ao relatado para o Neossolo Flúvico. Apesar de menos acentuados nas suas diferenças, os valores de ID sempre aumentaram com o incremento nos valores da PST e decresceram com a elevação da CE da solução de trabalho. Os resultados obtidos são adequados às afirmações de Pratt e Suarez (1990), os quais ressaltam a dificuldade de estabelecerem-se critérios relacionados à salinidade para solos muito diferentes; no entanto, é possível relacionar características específicas a solos de uma mesma região.

O ID do Chernossolo Argilúvico foi o que menos respondeu aos tratamentos impostos, considerando os seis solos que possibilitaram o ajuste de superfícies de resposta (Figuras 5 e 6). Apesar de ser o solo mais argiloso (Quadro 3), observa-se o valor do ΔpH mais próximo de zero (Quadro 4), indicando o equilíbrio de cargas elétricas, tornando muito fracas as forças de repulsão, fato que favorece a atração entre as partículas com a consequente floculação (Gillman, 1974). Apesar de ocorrerem variações nos valores da AD, ao

alterarem-se a PST e CE, como apresentadas na Figura 3, essas foram relativamente baixas em relação à proporção de argila total.

Para o Cambissolo Háplico, observa-se que apesar da utilização apenas de água deionizada, condição que favorece a dispersão, os valores de ID permaneceram baixos com o incremento da PST (Figura 7). Verifica-se que tanto em relação ao Cambissolo Háplico como ao Chernossolo Argilúvico a presença de óxidos, que são agentes cimentantes, favoreceu a estabilidade dos microagregados de difícil dispersão, apresentando os menores valores de ID, em resposta aos tratamentos.

Os resultados em relação a esses dois solos assemelham-se aos obtidos por Grohmann e Raij (1977) e Donagemma et al. (2003). Esses autores verificaram que mesmo na análise granulométrica, em que ocorre a adição de um dispersante químico, favorecendo a separação das partículas, os solos com presença marcante de óxidos apresentam dificuldade de dispersão, em razão da formação de microagregados estáveis, que impossibilitam a total separação das partículas, levando, geralmente, a superestimar as frações silte e areia desses solos.

Os mesmos autores relatam que para maximizar a dispersão nesses solos, visando à total separação das partículas, é aconselhável a utilização de um pré-tratamento para a remoção dos óxidos antes de ser realizado o procedimento da análise granulométrica.

Outra forma de apresentar o índice de dispersão de argilas de um solo, e permitir a comparação entre solos com valores diferenciados de ID, é calcular o índice de dispersão relativo (IDR), em que se atribui valor unitário ao maior valor do ID. Nesse caso, o IDR foi calculado com o maior valor “médio” do ID. Os resultados são apresentados nos Quadros 19 e 20. A facilidade de visualização desse índice permite observar que, em todos os casos, a maior média de dispersão de argilas foi atingida no tratamento de $CE = 0 \text{ dS m}^{-1}$ e $PST = 30\%$, com IDR de 1,000.

Quadro 19. Índice de dispersão relativo das amostras do Neossolo Flúvico, Luvisolo Háplico, Planossolo Háplico e Luvisolo Crômico, considerando a percentagem de sódio trocável e a condutividade elétrica da solução utilizada (CE)

CE	Percentagem de sódio trocável (%)					
	5	10	15	20	25	30
dS m ⁻¹						
Neossolo Flúvico						
0	0,5186	0,5816	0,6749	0,7797	0,8803	1,0000
0,3	0,0780	0,2047	0,5322	0,6084	0,6516	0,7699
0,6	0,0198	0,0356	0,0762	0,0898	0,4904	0,6711
0,9	0,0053	0,0297	0,0439	0,0247	0,0766	0,2503
1,2	0,0139	0,0184	0,0223	0,0146	0,0285	0,0411
Luvisolo Háplico						
0	0,4408	0,4984	0,6822	0,7467	0,7764	1,0000
0,3	0,0453	0,0059	0,5464	0,4596	0,5021	0,7133
0,6	0,0270	0,0114	0,0489	0,0029	0,0343	0,2131
0,9	0,0178	0,0182	0,0553	0,0122	0,0082	0,0143
1,2	0,0114	0,0066	0,0078	0,0069	0,0055	0,0000
Planossolo Háplico						
0	0,6839	0,7664	0,7300	0,8251	0,9104	1,0000
0,3	0,0347	0,0471	0,6095	0,6717	0,7748	0,7636
0,6	0,0074	0,0181	0,0276	0,0653	0,2243	0,7160
0,9	0,0125	0,0000	0,0205	0,0079	0,0334	0,0526
1,2	0,0011	0,0089	0,0182	0,0066	0,0116	0,0281
Luvisolo Crômico						
0	0,5094	0,5375	0,5662	0,8386	0,8762	1,0000
0,3	0,0123	0,0112	0,0182	0,0670	0,5521	0,6713
0,6	0,0134	0,0065	0,0050	0,0064	0,0076	0,0156
0,9	0,0090	0,0025	0,0276	0,0044	0,0089	0,0014
1,2	0,0209	0,0264	0,0057	0,0078	0,0044	0,0000

Quadro 20. Índice de dispersão relativo das amostras do Vertissolo Crômico, Cambissolo Háplico e Chernossolo Argilúvico, considerando a percentagem de sódio trocável e a condutividade elétrica da solução utilizada (CE)

CE	Percentagem de sódio trocável (%)					
	5	10	15	20	25	30
dS m ⁻¹						
	Vertissolo Háplico					
0	0,6992	0,6784	0,7461	0,8513	0,9026	1,0000
0,3	0,0469	0,0221	0,1685	0,6430	0,7098	0,6899
0,6	0,0261	0,0094	0,0429	0,0187	0,0747	0,1340
0,9	0,0081	0,0119	0,0158	0,0128	0,0305	0,0165
1,2	0,0385	0,0177	0,0270	0,0371	0,0181	0,0037
	Cambissolo Háplico					
0	0,0541	0,1283	0,1132	0,1497	0,2742	1,0000
0,3	0,0931	0,0176	0,0755	0,1157	0,0214	0,0629
0,6	0,0424	0,0189	0,0994	0,0222	0,0193	0,0482
0,9	0,0696	0,0461	0,1057	0,0361	0,0390	0,0394
1,2	0,0675	0,0621	0,0667	0,0440	0,0415	0,0155
	Chernossolo Argilúvico					
0	0,0301	0,0662	0,0432	0,0974	0,5426	1,0000
0,3	0,0334	0,0142	0,0432	0,0438	0,0186	0,0306
0,6	0,0235	0,0454	0,0259	0,0064	0,0232	0,0235
0,9	0,0241	0,0091	0,0091	0,0228	0,0279	0,0029
1,2	0,0419	0,0374	0,0235	0,0514	0,0180	0,0095

De forma semelhante ao ID, ajustaram-se, para seis dos solos, superfícies de resposta que são apresentadas no Quadro 21. Como o cálculo do IDR envolve simplesmente o quociente dos valores por uma constante, os modelos e coeficientes de determinação apresentados no Quadro 21 são semelhantes aos do Quadro 18. O Cambissolo Háplico também teve equação de regressão ajustada somente para $CE = 0 \text{ dS m}^{-1}$ (Quadro 21).

Quadro 21. Equação de regressão, relacionando o índice de dispersão relativo das amostras de solo (IDR) com a percentagem de sódio trocável (PST) e a condutividade elétrica (CE), em dS m⁻¹

Solo	Equação de regressão	R ²
Neossolo Flúvico	IDR = 0,1685 + 0,02704** PST – 0,7172** CE + 0,4109** CE ² – 0,01806** PST CE	0,925
Luvissolo Háplico	IDR = 0,2380 + 0,02306**PST – 0,9748 ** CE + 0,7000** CE ² – 0,02191** PST CE	0,933
Planossolo Háplico	IDR = 0,4011 + 0,01643** PST + 0,0001501** PST ² – 1,1119** CE + 0,6396** CE ² – 0,01631** PST CE	0,880
Luvissolo Crômico	IDR = 0,4484 – 0,003867 *PST + 0,0006713** PST ² – 1,2953** CE + 0,9644** CE ² – 0,02056 ** PST CE	0,900
Vertissolo Háplico	IDR = 0,4827 + 0,006602** PST + 0,0003113** PST ² – 1,3699** CE + 0,9328** CE ² – 0,01780** PST CE	0,919
Cambissolo Háplico ^{1/}	IDR = 1/(17,2571 – 0,5187** PST)	0,759
Chernossolo Argilúvico	IDR = - 0,02640 + 0,0007401 PST + 0,0008181 **PST ² + 0,4064 **CE - 0,1228 *CE ^{0,5} – 0,03196 **PST CE ^{0,5}	0,709

* e **: significativos a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste t.

^{1/} Equação de regressão calculada com dados experimentais de CE = 0 dS m⁻¹.

As curvas calculadas com cortes realizados nas superfícies de resposta, nos valores da PST de 10, 15, 20, 25 e 30%, são apresentadas nas Figuras 8 e 9. O Cambissolo Háplico aparece representado na Figura 10. A comparação das curvas das Figuras 8 e 9 com as das Figuras 5 e 6 evidencia as diferenças na representação de valores absolutos (Figuras 5 e 6) e relativos (Figuras 8 e 9) do índice de dispersão. Essa diferença é mais acentuada em solos com valores relativamente baixos de ID, com destaque para o Chernossolo Argilúvico e, em menor grau, para o Vertissolo Háplico (Figuras 6 e 9).

Excluindo a forma de apresentação, as considerações colocadas para discutir os resultados do ID são semelhantes quando se analisam os valores calculados para o IDR.

De acordo com os Quadros 16 e 17, no cálculo do IDR, utilizaram-se os valores máximos do ID: Neossolo Flúvico (0,9262); Luvisolo Háplico (0,6257); Planossolo Háplico (0,6621); Luvisolo Crômico (0,7910); Vertissolo Háplico (0,4549); Cambissolo Háplico (0,1643); e Chernossolo Argilúvico (0,2521).

Verifica-se que o ID máximo desses solos apresenta a sequência: Neossolo Flúvico (0,9262) > Luvisolo Crômico (0,7910) > Planossolo Háplico (0,6621) > Luvisolo Háplico (0,6257) > Vertissolo Háplico (0,4549) > Chernossolo Argilúvico (0,2521) > Cambissolo Háplico (0,1643).

Tomando como referência o menor ID máximo dos sete solos estudados, Cambissolo Háplico = 0,1643, a relação entre os ID dos diferentes solos é:

$$5,64:4,81:4,02:3,81:2,77:1,53:1.$$

Como anteriormente apontado, os solos da região semiárida de Pernambuco, com a presença de maior proporção de argilas mais ativas, são mais susceptíveis à dispersão. Verifica-se a importância do ID para comparar a dispersão de argilas, em solos diferentes. O IDR para esses solos seria unitário, em todos os casos; portanto, esse deve ser utilizado para estudar a resposta aos tratamentos impostos quando cada solo é analisado separadamente.

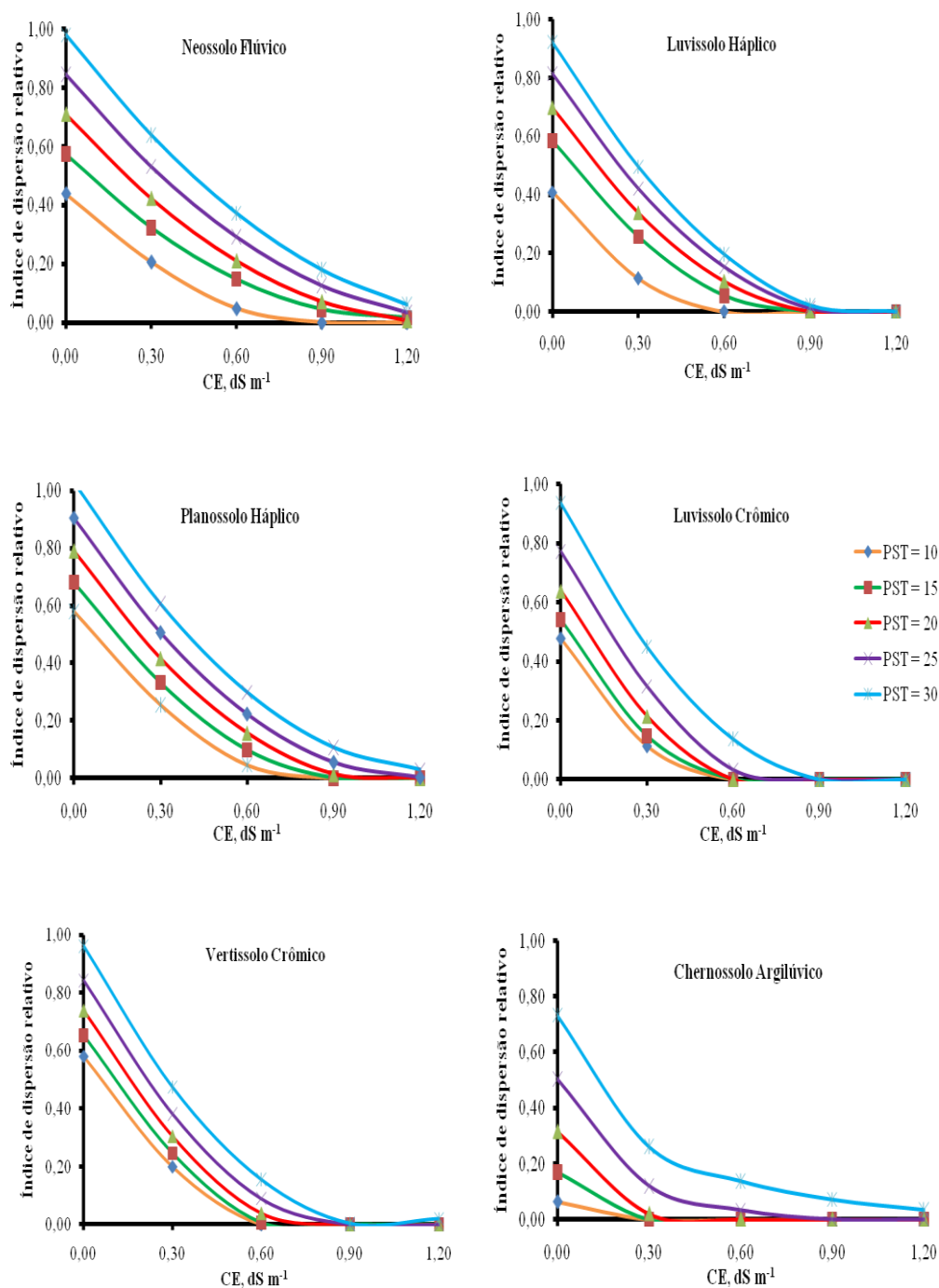


Figura 6. Índice de dispersão relativo do Neossolo Flúvico, Luvisolo Háplico, Planossolo Háplico, Luvisolo Crômico, Vertissolo Háplico e Chernossolo Argilúvico, em resposta à condutividade elétrica (CE) da solução para diferentes porcentagens de sódio trocável (PST).

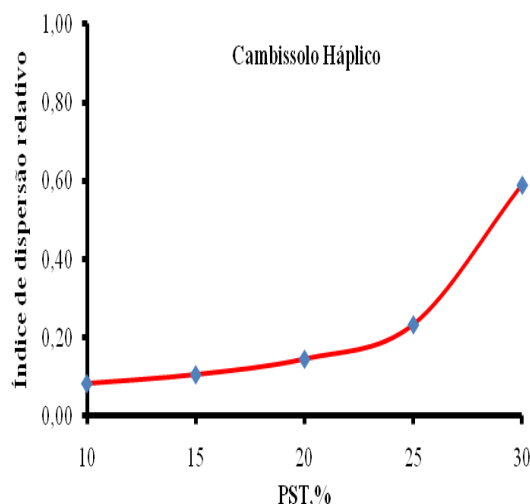


Figura 7. Índice de dispersão relativo ($CE = 0 \text{ dS m}^{-1}$) do Cambissolo Háplico, em resposta à percentagem de sódio trocável (PST).

Segundo Chhabra (1996), o efeito do sódio na dispersão e expansão dos minerais pode ser minimizado pelo controle da espessura da dupla camada difusa com o aumento da concentração eletrolítica da solução percolante ou da água de irrigação.

Nesse contexto, em busca de resultados que melhor avaliem a degradação estrutural nos solos, causada pelo uso de água de irrigação com diferentes níveis de RAS e CE, Neto et al. (2009) publicaram uma proposta de classificação. Trabalhando com solos do Estado de Minas Gerais, esses autores classificaram os riscos em relação à dispersão de argilas em três classes: risco baixo (até 10% de aumento nos valores da ADA), risco médio (10 a 50% de aumento nos valores da ADA) e risco alto (> 50% de aumento no valor da ADA).

Neste trabalho, utilizando os critérios estabelecidos por esses autores, os riscos foram atribuídos considerando o IDR. Para um risco baixo (até 10% de aumento nos valores do IDR), médio (10 a 50% de aumento nos valores do IDR), e alto (> 50 % de aumento no valor do IDR). Observou-se pelos resultados obtidos que para todos os solos em estudo, dentro de um mesmo valor da PST, os resultados do IDR podem ser reduzidos drasticamente apenas pelo incremento na CE da solução de trabalho. Essas reduções são mais acentuadas nos valores mais elevados da PST, ratificando que quanto maior for a PST, maior será a

necessidade de se determinar a AD, utilizando soluções de CE semelhante a do extrato da pasta de saturação do solo.

Analisou-se, portanto, que riscos classificados como baixo, médio e alto podem ser atribuídos apenas por modificações nas concentrações salinas das soluções de trabalho (Quadros 19 e 20). Esse fato pode levar à obtenção de resultados que não representem as reais condições apresentadas pelos solos em condições de campo.

Com relação à resposta dos solos aos diferentes ajustes nos valores da PST (10 a 30%), observaram-se variações nos intervalos das concentrações salinas que possibilitaram a manutenção dos menores valores do IDR. As soluções de trabalho com CE (entre 0,6 e 0,9 dS m⁻¹) possibilitaram a maior floculação para o Luvisolo Háplico, Luvisolo Crômico e Vertissolo Háplico (Figuras 8 e 9).

Para o Neossolo Flúvico e Planossolo Háplico, as concentrações salinas das soluções de trabalho que possibilitaram a obtenção de valores do IDR próximos de zero foram mais elevadas, variando de 0,9 a 1,2 dS m⁻¹ (Figura 8). Verificou-se que, mesmo para o menor valor da PST (10%), há necessidade de preservar determinado nível de CE da solução, evitando a dispersão.

Para o Chernossolo Argilúvico, observou-se a maior amplitude na utilização das diferentes soluções de trabalho, em que valores de CE entre 0,3 e 1,2 dS m⁻¹ proporcionaram as maiores reduções do IDR em relação aos ajustes nos valores da PST (Figura 9). Já para o Cambissolo Háplico, a solução de trabalho com valor de CE igual a 0,3 dS m⁻¹ possibilitou a total floculação de argilas, independentemente da PST em estudo.

Verificou-se, portanto, que, para solos afetados por sais, a utilização de soluções de trabalho com CE semelhante à da solução do solo permite uma avaliação mais aproximada da floculação de argilas em condições de campo, contribuindo na prevenção dos riscos associados à erosão e à redução na permeabilidade. A preservação da estrutura desses solos é de fundamental importância, pois uma vez desencadeado o processo dispersivo provocado pelo sódio, o retorno às condições naturais é de difícil solução, podendo apenas conter

e, ou, minimizar o problema, antes da formação de camadas de acúmulo de material de granulometria mais fina em profundidade.

4.2. Condutividade Hidráulica em Meio Saturado

Os valores médios da condutividade hidráulica em meio saturado (K_0) são apresentados no Quadro 22. Em geral, observam-se diferenças em resposta aos tratamentos, com as maiores K_0 sendo apresentadas na CE de 1,2 dS m⁻¹ e PST de 5%. O Planossolo Háplico e Cambissolo Háplico são exceções, com a maior K_0 na PST de 15%, mas sempre com CE de 1,2 dS m⁻¹.

As variações foram menores nos solos com presença de óxidos de ferro, Cambissolo Háplico e Chernossolo Argilúvico, que não apresentaram grandes diferenças de K_0 (Quadro 22). Ao determinar a K_0 em solos salinos ou salino-sódicos, a retirada de sais solúveis, pelo uso de uma solução de percolação de menor CE, pode provocar dispersão de argilas. Essas partículas, movimentando-se, podem obstruir os poros, levando ao decréscimo ou até mesmo ao impedimento do fluxo de água no solo. O Luvisolo Crômico apresentou K_0 nula na determinação com água deionizada e PST de 15 e de 30% (Quadro 22). Em solos sob irrigação, com águas de maior CE, quando esses apresentam elevada sodicidade, é recomendável proceder à irrigação na época de chuvas, mesmo na ausência de cultivo. Essa irrigação contribui na prevenção de eventual dispersão excessiva de argilas e diminuição acentuada da K_0 .

Mesquita e Moraes (2004) indicam que o decréscimo da condutividade hidráulica é mais dependente da estrutura do que da textura do solo. Nesse contexto, a utilização de técnicas que preservem a estrutura do solo para determinações em laboratório torna-se necessária, a fim de se evitar interferências nos valores de K_0 . Nesta pesquisa, trabalhou-se obrigatoriamente com amostras peneiradas, pois os valores da PST foram ajustados em laboratório.

Yousaf et al. (1987) e Melo et al. (1988) afirmam que uma redução de 25% nos valores de K_0 já seria considerada como crítica. No entanto, verifica-se pelos resultados que somente a modificação na concentração salina da solução de trabalho já foi capaz de provocar redução na K_0 superior ao valor considerado crítico (Quadro 22).

Quadro 22. Condutividade hidráulica em meio saturado, considerando a percentagem de sódio trocável (PST) e condutividade elétrica da solução utilizada (CE)

Solo	CE	PST (%)		
		5	15	30
	dS m ⁻¹	cm h ⁻¹		
Neossolo Flúvico	0	0,6750	0,1130	0,0970
	0,6	0,6449	0,2350	0,1150
	1,2	0,7865	0,4213	0,2500
Luvisso Háplico	0	1,1865	0,2660	0,0528
	0,6	0,9557	0,8596	0,3775
	1,2	1,5004	0,9374	0,4482
Planossolo Háplico	0	0,3805	0,1853	0,0572
	0,6	0,6088	0,3672	0,2106
	1,2	0,6282	0,7140	0,4684
Luvisso Crômico	0	0,0798	0,0000	0,0000
	0,6	0,1750	0,0769	0,0474
	1,2	0,2115	0,1018	0,0483
Vertissolo Háplico	0	0,3158	0,1551	0,0860
	0,6	0,6960	0,2916	0,1131
	1,2	0,7560	0,4333	0,1363
Cambissolo Háplico	0	1,5699	2,5368	1,7587
	0,6	1,5823	1,9983	2,8495
	1,2	2,4905	3,0100	1,6931
Chernossolo Argilúvico	0	1,3519	1,3989	1,3273
	0,6	1,5720	1,6678	1,7939
	1,2	1,9039	1,6749	1,3244

Esse fato sugere que o uso de soluções de trabalho, com água de CE diferente à da solução do solo, em solos com problemas de salinidade, pode conduzir a resultados errôneos. Eram esperadas maiores diferenças em solos que

apresentassem maior força iônica na sua solução, considerando que a resposta provocada pela diluição seria mais intensa em solos com CE elevada.

Na análise de variância, constatou-se a não homogeneidade de variâncias para todos os solos em estudo, impossibilitando a realização do teste de comparação de médias. Essa não homogeneidade de variâncias pode ser atribuída à disparidade de valores de K_0 apresentados por alguns solos.

Segundo Ferreira (1999), a K_0 pode ser classificada em sete classes: muito rápida (superior a 25 cm h^{-1}); rápida (de 25 a $12,5 \text{ cm h}^{-1}$); moderadamente rápida (de $12,5$ a $6,25 \text{ cm h}^{-1}$); moderada (de $6,25$ a $2,00 \text{ cm h}^{-1}$); moderadamente lenta (de $2,00$ a $0,50 \text{ cm h}^{-1}$); lenta (de $0,50$ a $0,125 \text{ cm h}^{-1}$) e muito lenta (inferior a $0,125 \text{ cm h}^{-1}$).

Pelos valores listados no Quadro 22, nota-se que o Luvisolo Crômico apresentou o menor valor de K_0 , variando da classe lenta a muito lenta, o que indicaria que em condições de campo podem aparecer problemas relacionados à infiltração e ao movimento de água no longo do perfil. Enfatiza-se que os impactos na estrutura dos solos neste trabalho podem ter sido minimizados pelo uso de amostras peneiradas por malha de 2 mm, ou seja, com estrutura deformada. Nesse contexto, em condições naturais, a utilização de água de baixa concentração salina tende a limitar ou até mesmo impedir o uso dos solos para fins agrícolas, por causa principalmente da intensiva degradação na estrutura dos solos, reduzindo a macroporosidade e consequentemente a K_0 , o que impossibilita o crescimento e desenvolvimento das culturas. Em regiões de climas áridos e semiáridos, a criação de perímetros irrigados tornou-se boa alternativa para o desenvolvimento da agricultura. No entanto, milhares de hectares vêm sendo abandonados anualmente, principalmente em razão dos problemas nas propriedades físicas dos solos, intensificados por um manejo inadequado na irrigação (Magalhães, 1995).

Para o Neossolo Flúvico, Luvisolo Háplico, Planossolo Háplico e Vertissolo Crômico, a K_0 variou de moderadamente lenta a muito lenta, conforme os tratamentos aplicados. Em relação ao Chernossolo Argilúvico e

Cambissolo Háplico, a condutividade hidráulica variou de moderadamente lenta a moderada, apresentando os maiores valores médios de K_0 (Quadro 22).

Estudos realizados na Austrália indicam que o valor crítico para K_0 , considerando a degradação da estrutura do solo, é de $0,1 \text{ cm h}^{-1}$ (Mcintyre, 1979). Foram observados valores iguais ou inferiores a $0,1 \text{ cm h}^{-1}$ de K_0 em cinco dos sete solos em estudo (Quadro 22). Para o Neossolo Flúvico, Luvisolo Háplico, Planossolo Háplico, Luvisolo Crômico e Vertissolo Háplico, esse valor crítico de K_0 foi diretamente relacionado ao tratamento da maior PST, de aproximadamente 30% (Quadro 7), com a utilização de solução de trabalho com o menor valor de CE (0 dS m^{-1}). Oster e Schroer (1979) destacam que a utilização de água com valores reduzidos de CE, particularmente abaixo de $0,5 \text{ dS m}^{-1}$, tende a afetar a estrutura dos solos, mesmo quando são irrigados com águas apresentando baixos teores de sódio. Nota-se, com isso, que mesmo em amostras deformadas, o efeito dispersivo que leva à obstrução dos poros é intensificado pela interação de concentrações elevadas de sódio com o uso de água com CE reduzida.

De acordo com o Quadro 22, os resultados deste estudo assemelham-se aos de Bagarello et al. (2006), os quais observaram redução nos valores de K_0 ao utilizarem apenas água deionizada como solução de percolação em solos saturados, em contraste com soluções de relação de adsorção de sódio (RAS) de 10, 20 e $30 (\text{mmol}_c \text{ L}^{-1})^{0,5}$. Pelos valores inseridos no Quadro 22, verifica-se que ao incrementar a CE das soluções de trabalho nas determinações de K_0 , para todos os valores da PST, apenas o Luvisolo Crômico permaneceu com K_0 considerada crítica; seus valores foram inferiores a $0,1 \text{ cm h}^{-1}$, exceto para PST de 5% e CE de 0,6 e $1,2 \text{ dS m}^{-1}$. O Luvisolo Crômico apresentou comportamento semelhante aos solos estudados por McIntyre (1979). Esse autor verificou que, para os solos australianos, a PST de 5% causaria danos à estrutura do solo, reduzindo a K_0 para níveis críticos, alertando para a importância de um criterioso controle da água usado na irrigação dos solos, principalmente para aquela de baixa concentração eletrolítica e que contém sódio.

Minhas e Sharma (1986) relatam que a simples passagem de água de chuva também poderá agravar os problemas, lavando os sais e permitindo que o sódio atue na dispersão dos solos, promovendo restrições quanto ao movimento de água e de ar no perfil do solo. Mace e Amrhein (2001) sugerem a aplicação de corretivos à água, a fim de evitar problemas relacionados à condutividade hidráulica, desencadeados principalmente no período chuvoso.

Com a finalidade de facilitar a visualização nas modificações da K_0 após os tratamentos, determinou-se a condutividade hidráulica relativa (K_{0R}), atribuindo valor unitário à máxima K_0 média de cada solo. A K_{0R} tem sido amplamente estudada na tentativa de melhor avaliação dos efeitos do sódio sobre as propriedades físicas do solo (Yousaf et al., 1987; Melo et al., 1988; Freire et al., 2003a). De acordo com o Quadro 22, para o cálculo da K_{0R} , utilizaram-se para os respectivos solos os seguintes valores: Neossolo Flúvico, $0,7865 \text{ cm h}^{-1}$; Luvisolo Háplico, $1,5004 \text{ cm h}^{-1}$; Planossolo Háplico, $0,7140 \text{ cm h}^{-1}$; Luvisolo Crômico, $0,2115 \text{ cm h}^{-1}$; Vertissolo Háplico, $0,7560 \text{ cm h}^{-1}$; Cambissolo Háplico, $3,0001 \text{ cm h}^{-1}$; e Chernossolo Argilúvico, $1,9039 \text{ cm h}^{-1}$.

Os valores de K_{0R} são apresentados no Quadro 23, associados aos da PST preestabelecidos (5, 15 e 30%) e da CE das soluções de trabalho (0, 0,6 e $1,2 \text{ dS m}^{-1}$). Observa-se que, predominantemente, os valores máximos de K_{0R} foram associados ao menor valor de sódio trocável (PST = 5%) com a utilização de solução de trabalho com maior concentração eletrolítica ($\text{CE} = 1,2 \text{ dS m}^{-1}$).

Quadro 23. Condutividade hidráulica relativa em meio saturado, considerando a percentagem de sódio trocável (PST) e a condutividade elétrica da solução utilizada (CE)

Solo	CE	PST (%)		
		5	15	30
	dS m ⁻¹			
Neossolo Flúvico	0	0,858	0,143	0,123
	0,6	0,820	0,298	0,146
	1,2	1	0,536	0,318
Luvisso Háplico	0	0,791	0,177	0,035
	0,6	0,637	0,573	0,252
	1,2	1	0,625	0,299
Planossolo Háplico	0	0,439	0,214	0,066
	0,6	0,702	0,423	0,243
	1,2	0,724	1	0,540
Luvisso Crômico	0	0,377	0,000	0,000
	0,6	0,828	0,364	0,224
	1,2	1	0,481	0,228
Vertissolo Háplico	0	0,409	0,201	0,114
	0,6	0,921	0,377	0,146
	1,2	1	0,561	0,176
Cambissolo Háplico	0	0,522	0,843	0,584
	0,6	0,526	0,664	0,947
	1,2	0,827	1	0,562
Chernossolo Argilúvico	0	0,710	0,735	0,697
	0,6	0,826	0,876	0,942
	1,2	1	0,880	0,696

Irurtia e Peinemann (1986), Yousaf et al. (1987) e Melo et al. (1988) indicam que reduções na K_{0R} entre 25 e 50% seriam consideradas como críticas. Observa-se que o incremento dos valores da PST, até 30%, reduz a K_{0R} em 50% ou mais para vários solos (Quadro 23). Destacam-se o Neossolo Flúvico,

Luvissolo Háplico, Luvisolo Crômico e Vertissolo Háplico, que apresentam essa resposta, mesmo utilizando solução de trabalho de $CE = 1,2 \text{ dS m}^{-1}$. O Vertissolo Háplico, por exemplo, apresentou baixa resposta da K_{0R} ao incremento da CE, no tratamento da PST igual a 30% (Quadro 23), sugerindo que, provavelmente, nesse nível elevado da PST, o uso de soluções de trabalho com CE superior a $1,2 \text{ dS m}^{-1}$ seria indicada para atenuar o efeito do sódio na degradação da estrutura desses solos. Para PST alta, a CE mínima para preservar a estrutura dos agregados deve, também, ser elevada; caso contrário, podem ocorrer reduções na permeabilidade e drenagem do solo, deficiência de aeração e encrostamento superficial (Mcbride, 1994).

Após padronização, com o cálculo da K_{0R} , a análise de variância apresentou homogeneidade de variâncias para todos os solos em estudo, permitindo a comparação de médias pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) (Quadro 24). Observa-se que os maiores valores de K_{0R} foram obtidos para o Chernossolo Argilúvico e Cambissolo Háplico. Esse fato pode ser explicado pelo maior grau de intemperismo desses solos, que apresentam na constituição deles, na fração argila, óxidos de ferro (Freire et al., 2003b; Souza et al., 2010), características importantes no balanço de cargas e consequentemente em relação à floculação das partículas. Os resultados da K_{0R} para esses solos são condizentes com os menores valores apresentados de argila dispersa (Quadro 13).

Dos cinco solos restantes, com maior proporção de argilas mais ativas (Quadro 5), o Planossolo Háplico apresentou a maior K_{0R} (Quadro 24). Esse valor pode ser atribuído, ao menos parcialmente, à maior proporção de areia grossa, como evidenciado na caracterização (Quadro 3). Em acréscimo, foi o solo com menor proporção de silte, que contribui para diminuir a condutividade hidráulica dos solos, quando em proporções relativamente elevadas (Bradford & Huang, 1992).

Greene et al. (1978) ressaltam a importância da textura do solo nos processos de dispersão causados pelo sódio. Esses autores indicam que solos de textura mais grosseira são menos susceptíveis à degradação na estrutura deles,

necessitando de valores mais elevados da PST para que apresentem limitações relacionadas às propriedades físico-hídricas.

Quadro 24. Médias gerais da condutividade hidráulica relativa, em meio saturado dos solos em estudo, comparadas pelo teste de Scott-Knott

Solo	Condutividade hidráulica relativa ^{1/}
Chernossolo Argilúvico	0,818 A
Cambissolo Háplico	0,719 B
Planossolo Háplico	0,564 C
Luvissolo Háplico	0,488 D
Neossolo Flúvico	0,471 D
Vertissolo Háplico	0,439 D
Luvissolo Crômico	0,389 D

^{1/} Letras diferentes indicam diferenças estatisticamente significativas a 5% pelo teste de Scott-Knott.

Os quatro solos restantes, Luvissolo Háplico, Neossolo Flúvico, Vertissolo Háplico e Luvissolo Crômico, não apresentaram diferenças estatisticamente significativas da K_{0R} (Quadro 24). Pela caracterização, evidenciaram-se semelhanças na composição granulométrica (Quadro 3), nos valores de P-remanescente e Δ pH (Quadro 4) e na composição mineralógica da fração argila (Quadro 5), com predominância de minerais de argila de elevada atividade (Quadro 4).

Na comparação de resultados de K_0 e K_{0R} , em resposta aos tratamentos, optou-se pelo uso de contrastes ortogonais, apresentados no Quadro 25. Como indicado no item Material e Métodos, será utilizada a expressão “tendência” para diferenças estatisticamente significativas no intervalo de 5 a 20%. Verifica-se que as significâncias dos contrastes em relação aos resultados de K_0 e da K_{0R} são semelhantes. Essa similitude ocorre por causa de o cálculo da K_{0R} resultar do quociente entre K_0 e uma constante, correspondente ao valor médio máximo de K_0 para cada solo.

Quadro 25. Contrastes ortogonais médios da condutividade hidráulica em meio saturado e da condutividade hidráulica relativa em meio saturado dos solos em estudo, considerando a percentagem de sódio trocável (PST) do solo e a condutividade elétrica (CE) da solução de trabalho ^{1/}

PST	CE	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
%	dS m ⁻¹								
5	0	2	0	-1	-1	0	0	0	0
	0,6	2	0	-1	1	0	0	0	0
	1,2	2	0	2	0	0	0	0	0
15	0	-1	1	0	0	-1	-1	0	0
	0,6	-1	1	0	0	-1	1	0	0
	1,2	-1	1	0	0	2	0	0	0
30	0	-1	-1	0	0	0	0	-1	-1
	0,6	-1	-1	0	0	0	0	-1	1
	1,2	-1	-1	0	0	0	0	2	0
Condutividade hidráulica em meio saturado (cm h⁻¹)									
Neossolo Flúvico		0,497*	0,102 [#]	0,127 [#]	-0,030	0,247*	0,122	0,144 [#]	0,018
Luvissolo Háplico		0,724*	0,395*	0,429*	-0,231	0,375 [#]	0,594*	0,233	0,325 [#]
Planossolo Háplico		0,205*	0,177*	0,134 [#]	0,228*	0,437*	0,182 [#]	0,335*	0,153 [#]
Luvissolo Crômico		0,110*	0,028 [#]	0,084*	0,095*	0,063*	0,077*	0,025	0,047 [#]
Vertissolo Háplico		0,386*	0,181*	0,250*	0,380*	0,210*	0,137 [#]	0,037	0,027
Cambissolo Háplico		-0,427*	0,415*	0,914*	0,012	0,743*	-0,539*	-0,611*	1,091*
Chernossolo Argilúvico		0,078	0,099	0,442*	0,220	0,141	0,269	-0,236	0,467 [#]
Condutividade hidráulica relativa em meio saturado									
Neossolo Flúvico		0,632*	0,130 [#]	0,161 [#]	-0,038	0,314*	0,155	0,183 [#]	0,022
Luvissolo Háplico		0,483*	0,263*	0,286*	-0,154	0,250*	0,396*	0,155 [#]	0,216 [#]
Planossolo Háplico		0,288*	0,248*	0,187 [#]	0,320*	0,613*	0,255 [#]	0,469*	0,215 [#]
Luvissolo Crômico		0,519*	0,131 [#]	0,397*	0,450*	0,299*	0,364*	0,116	0,224 [#]
Vertissolo Háplico		0,511*	0,240*	0,331*	0,503*	0,278*	0,181 [#]	0,048	0,035
Cambissolo Háplico		-0,142*	0,138 [#]	0,304*	0,004	0,247*	-0,179 [#]	-0,203 [#]	0,362*
Chernossolo Argilúvico		0,041	0,052	0,232*	0,116	0,074	0,141	-0,124	0,245 [#]

^{1/} C1: PST 5% vs 15 e 30%. C2: PST 15% vs 30%. C3: CE 0 e 0,6 dS m⁻¹ vs 1,2 dS m⁻¹ d/PST 5%. C4: CE 0 dS m⁻¹ vs 0,6 dS m⁻¹ d/PST 5%. C5: CE 0 e 0,6 dS m⁻¹ vs 1,2 dS m⁻¹ d/PST 15%. C6: CE 0 dS m⁻¹ vs 0,6 dS m⁻¹ d/PST 15%. C7: CE 0 e 0,6 dS m⁻¹ vs 1,2 dS m⁻¹ d/PST 30%. C8: CE 0 dS m⁻¹ vs 0,6 dS m⁻¹ d/PST 30%.

*e [#]: Significativo a 5 e 20%, respectivamente, pelo teste F.

Ao avaliar a resposta dos solos em relação à saturação por sódio, observa-se que para o Neossolo Flúvico, Luvissolo Háplico, Planossolo Háplico, Luvissolo Crômico e Vertissolo Háplico ocorreram diferenças na comparação

entre os valores da PST 5, 15 e 30%, constatando-se redução nos valores de K_0 e K_{0R} com os incrementos nos teores de sódio trocável (Quadro 25). Esses resultados assemelham-se aos obtidos por Northcote e Skene (1972), os quais verificaram reduções na K_0 em solos australianos, provocadas pela presença de sódio no complexo de troca. Nesses solos, foram estabelecidos limites inferiores aos relatados para os solos do oeste dos Estados Unidos, que fixou em 15% o valor da PST crítico (Richards, 1954). Em grande parte dos solos estudados na Austrália, valores da PST inferiores a 10% foram suficientes para provocar degradação na estrutura do solo.

Os cinco solos citados acima apresentaram presença marcante de minerais de argila do tipo 2:1, como illita e esmectita (Quadro 4). Segundo McNeal e Coleman (1966), solos com predomínio de minerais de alta atividade são mais suscetíveis ao efeito dispersivo provocado pelo sódio, o que pode favorecer a dispersão de argilas, a obstrução dos poros e a conseguinte redução nos valores de condutividade hidráulica.

Como estão apresentadas no Quadro 25, em relação ao Cambissolo Háplico, também ocorreram diferenças na comparação entre os valores da PST 5, 15 e 30%; no entanto, verifica-se sinal negativo para o valor do C1, na comparação do menor valor da PST (igual a 5%), em relação aos maiores valores (15 e 30 %), indicando que ocorreram incrementos nos valores de K_0 e da K_{0R} com o aumento na PST. Esse fato não é de se esperar e respondeu aos maiores valores determinados para PST = 15 % (Quadro 22). Os dados experimentais de K_0 evidenciaram alta variabilidade e, nesse caso, os valores elevados para 15% da PST podem ser atribuídos ao empacotamento do solo no preparo das unidades experimentais, em que foram usadas amostras peneiradas. No C2, a diferença do C1, observa-se que o incremento na PST levou à diminuição nos valores de K_0 .

Em relação ao Chernossolo Argilúvico, verifica-se que não houve resposta em relação às diferentes proporções de sódio trocável (Quadro 25), indicando que as propriedades físicas desse solo, relacionadas ao movimento de água, se mantiveram preservadas, mesmo para elevada PST. Esse fato provavelmente está ligado à composição mineralógica (Quadro 4) e ao grau de intemperismo do solo.

Resultados semelhantes foram apresentados por Neto et al. (2009), os quais verificaram em um Latossolo Vermelho-Amarelo ausência de resposta com o incremento da RAS e da CE das soluções percolantes.

Os contrastes C3 até C8 do Quadro 25 comparam a CE das soluções de trabalho, para cada solo e PST; os de números ímpares relacionam 0 e 0,6 dS m⁻¹ com 1,2 dS m⁻¹ e os de números pares, 0 com 0,6 dS m⁻¹. Em geral, verifica-se incremento da K₀ e, conseqüentemente, da K_{0R} com acréscimo na CE, resultados semelhantes aos obtidos por Kazman et al. (1983). Esses autores observaram redução na permeabilidade de um solo saturado com água da chuva, CE próxima de 0 dS m⁻¹, em relação à saturação realizada com água de CE semelhante à da solução do solo.

Analizando o comportamento individual de cada solo em relação à utilização de diferentes soluções de trabalho, observa-se, a partir das significâncias dos contrastes três a oito (C3 a C8, Quadro 25), para o Neossolo Flúvico, que independentemente do valor da PST (5, 15 e 30%) apenas ocorreram diferenças ao se comparar a solução de trabalho com maior concentração salina (CE = 1,2 dS m⁻¹), em relação às soluções de menor valor de CE (0 e 0,6 dS m⁻¹). Esse solo não apresentou diferenças significativas na comparação das soluções percolantes de menor concentração salina (0 vs 0,6 dS m⁻¹), o que sugere que quando esse é afetado por problemas de sodicidade (PST > 5%), valor considerado como crítico por McIntyre (1979), haveria necessidade de se usar água para irrigação com CE igual ou superior a 1,2 dS m⁻¹. Esse procedimento provavelmente em campo irá preservar a estrutura do solo e conseqüentemente elevar os valores da condutividade hidráulica, diminuindo o risco de redução na permeabilidade.

De acordo com o Quadro 25, no Luvisolo Háplico, a resposta foi semelhante à indicada para o Neossolo Flúvico, no tratamento com menor PST (5%). Independentemente da significância, verifica-se acentuada diminuição da K₀ com o decréscimo da concentração salina, como evidenciada nos Quadros 22 e 23. A eventual irrigação com água de condutividade elétrica reduzida e, ou, os efeitos da água chuva, reduzindo a CE do solo, poderiam limitar a infiltração,

causar redução na permeabilidade e, conseqüentemente, interferir negativamente na condutividade hidráulica.

Em relação ao Planossolo Háplico, verifica-se que esse solo apresentou resposta aos incrementos na CE (Quadro 25). Para todos os valores da PST, ocorreram diferenças significativas na comparação entre a utilização de soluções com diferentes valores de CE (0; 0,6; e 1,2 dS m⁻¹) (C3 a C8), constatando acréscimos na K₀ e na K_{0R} ao se incrementar a concentração salina das soluções de trabalho.

O Luvisolo Crômico apresentou comportamento semelhante ao Planossolo Háplico, considerando a significância dos contrastes. Entretanto, quando ajustado à PST de 30%, não se observaram diferenças ao se compararem as soluções de menor condutividade elétricas (0,0 e 0,6 dS m⁻¹), em relação à solução com CE = 1,2 dS m⁻¹ (C7); pelo contrário, verificou-se diferença no uso de soluções com menores concentrações salinas (0 vs 0,6 dS m⁻¹, C8). Esse fato sugere que como ocorreu obstrução total nos valores de K₀ ao se utilizar apenas água deionizada (Quadro 22), a utilização de soluções com CE até 1,2 dS m⁻¹ permite melhor movimento de água no solo. Porém, essa CE não é suficiente para evitar que o solo permanecesse com valores considerados críticos para K₀, ou seja, K₀ < 0,1 cm h⁻¹ (Quadro 22) (Mcintyre, 1979).

Para o Vertissolo Háplico, notou-se que esse apresentou respostas para os incrementos nas concentrações salinas das soluções até o ajuste para PST a 15%. Ao se ajustar o solo a uma PST igual a 30%, verificou-se a não ocorrência de diferença entre as soluções aplicadas (C7 e C8). Nesse contexto, o intervalo de CE das soluções de trabalho utilizado neste estudo corresponde ao intervalo de nenhum a moderado risco de salinização causado pela água de irrigação (Ayers & Westcott, 1994). Entretanto, o valor ajustado da PST igual a 30% é duas vezes superior ao limite estabelecido por Richards (1954), o qual caracteriza o solo como sódico, o que sugere que valores elevados de CE, superiores aos indicados como de risco moderado de salinização, devem ser mantidos, a fim de aumentar a força iônica na solução do solo, minimizando, em elevados valores da PST, o efeito dispersivo do sódio.

Em relação ao Cambissolo Háplico e Chernossolo Argilúvico, evidencia-se que, da mesma forma que os solos foram pouco responsivos aos incrementos na CE da solução de trabalho, em relação às determinações da AD (Quadro 13) e do ID (Quadro 17), esses também não apresentaram respostas acentuadas com incremento na CE das soluções percolantes nas determinações da K_0 (Quadro 25). As K_0 desses solos foram as maiores determinadas, considerando os sete materiais estudados.

Para o Cambissolo Háplico, apesar de apresentar a maioria das comparações significativas, observa-se a ocorrência de sinais negativos (C3 a C8, Quadro 25), indicando incremento de K_0 com a diminuição na CE das soluções percolantes. No entanto, essa resposta, eventualmente inesperada, é coerente com a baixa resposta da dispersão de argilas aos tratamentos impostos (Quadro 13).

Apesar de ter sido coletado no sertão de Pernambuco, esse solo tem a sua localização em uma região denominada de brejos de altitude nordestinos, com ocorrência de chuvas orográficas, com precipitação pluvial em torno de 1.200 mm por ano (SOUZA et al., 2010). O menor valor de soma de bases apresentado no Quadro 4 é indicativo dessas condições, que favorecem a lixiviação.

As análises dos difratogramas apresentados por Souza et al. (2010), tanto da fração argila como do concentrado de óxidos, indicam picos expressivos de goethita e hematita em Cambissolos dessa região. Esses autores também informam a presença marcante de caulinita nesses solos. Esses fatores atribuem ao solo o caráter latossólico. A possível presença de microagregados estáveis provavelmente foi o principal motivo para manutenção de valores elevados de K_0 , mesmo quando o solo foi submetido a ajustes com altos valores da PST e percolado com água de condutividade elétrica igual a 0 dSm^{-1} .

As condições climáticas, com predominância de chuvas constantes e elevados índices pluviométricos, também são registradas no local de coleta do Chernossolo Argilúvico. Esse fato explica os resultados semelhantes aos do Cambissolo Háplico. Para o Chernossolo Argilúvico, no entanto, apenas são observadas diferenças nos contrastes três e oito (C3 e C8, Quadro 25). Pelos valores apresentados no Quadro 22, podem-se atribuir essas variações,

proporcionalmente menores, à presença de óxidos de ferro na fração argila, com as implicações previamente discutidas. Nota-se que os dois últimos solos listados apresentaram os maiores valores de K_0 (Quadro 22), podendo-se indicar que a presença de argilas mais ativas leva à diminuição da K_0 , quando comparada com solos com maior proporção de óxidos na fração fina, bem como que essas tornam os solos mais susceptíveis a variações de K_0 , em decorrência da PST, com marcada influência da CE da água eventualmente utilizada na sua irrigação.

5. CONCLUSÕES

- O aumento da PST e a diminuição na CE da solução de trabalho estão diretamente relacionados com o incremento nos valores de argila dispersa (AD).
- O incremento da AD, ao utilizarem-se soluções de trabalho com menor concentração eletrolítica, provocou diminuição nos valores da condutividade hidráulica em meio saturado (K_0), mesmo em amostras deformadas, o que indica que os efeitos adversos poderiam ser acentuados em solos de perímetros irrigados pela degradação da sua estrutura.
- A resposta aos tratamentos foi mais acentuada nos solos com maiores proporções de argilas ativas frente àqueles com presença marcante de óxidos de ferro.
- A presença de argilas mais ativas leva à diminuição da K_0 , quando comparadas com solos com maior proporção de óxidos na fração fina.
- As argilas mais ativas tornam os solos mais susceptíveis a variações de K_0 , em decorrência da PST, com marcada influência da CE da água eventualmente utilizada na sua irrigação.
- As determinações de argila dispersa em água e de condutividade hidráulica em meio saturado, geralmente associadas a problemas de infiltração, erosão e degradação da estrutura dos solos, são realizadas em laboratórios com água

deionizada ou destilada, de CE próxima de 0 dS m^{-1} . No entanto, para solos afetados por sais, as análises deveriam ser realizadas com soluções de $\text{CE} \neq 0 \text{ dS m}^{-1}$, utilizando valores próximos aos do extrato da pasta de saturação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ V., V.H. & FONSECA, D.M. Definição de doses de fósforo para determinação da capacidade máxima de adsorção de fosfatos e para ensaios em casa de vegetação. R. Bras. Ci. Solo, 14:49-55, 1990.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E. & OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso do fósforo remanescente. Bol. Inf. SBCS, 25:27-33, 2000.
- ALVAREZ V., V.H. & ALVAREZ, G.A.M. Comparação de médias ou teste de hipóteses? Contrastes! Bol. Inf. SBCS, 31:24-34, 2006.
- ARNOLD, P.W. Electrolyte interactions. In: GREELAND, D.J. & HAYES, M.H.B., eds. The chemistry of soil constituents. Chichester, John. Wiley, 1978. p.355-404.
- AYERS, R.S. & WESTCOT, D.W. Water quality for agriculture. 3.ed. Roma, FAO, 1994. 174p.
- BAGARELLO, V. Influence of well preparation on field-saturated hydraulic conductivity measured with the Guelph permeameter. Geoderma, 80:169-180, 1997.
- BAGARELLO, V.; IOVINO, M.; PALAZZOLO, E.; PANNO, M. & REYNOLDS, W.D. Field and laboratory approaches for determination sodicity effects on saturated soil hydraulic conductivity. Geoderma, 130:1-13, 2006.
- BARROS, M.F.C.; SANTOS, P.M. & SILVA, J.A. Recuperação de solos afetados por sais usando água de qualidade inferior. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 9:310-313, 2005.

- BOLT, G.H. Surface interaction between the soil solid phase and the soil solution. In: BOLT, G.H. & BRUGGENWERT, M.G.M., eds. Soil chemistry. Part A. Basic elements. 2.ed. Amsterdam, Elsevier, 1978. p.43-53.
- BRADFORD, J.M. & HUANG, C. Mechanisms of crust formation: physical components. In: SUMNER, M., STEWART, B., eds. Soil crusting: chemical and physical processes. Lewis, Ann Arbor, Mich., 1992. p.55-72..
- CHHABRA, R. Soil salinity and water quality. Rotterdam, Balkema, 1996. 283p.
- CUNHA, J.C. Comparação de dispersantes químicos na análise granulométrica de solos do estado de Pernambuco. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2010. 67p. (Dissertação de Mestrado)
- DONAGEMMA, G.K.; RUIZ, H.A.; FONTES, M.P.F.; KER, J.C. & SCHAEFER, C.E.G.R. Dispersão de Latossolos em resposta à utilização de pré-tratamentos na análise textural. R. Bras. Ci. Solo, 27:765-772, 2003.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- EL-SWAIFY, S.A. & DANGLER, E.W. Erodibilities of selected tropical soils in relation to structural and hydrologic parameters. In: NATIONAL CONFERENCE ON SOIL EROSION, 1., West Lafayette, IN, 1976. Proceedings. Ankeny, Soil Conservation Society of America, 1977. p.105-114.
- FERREIRA, P.A. Drenagem de terras agrícolas. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 187p.
- FERREIRA, P.A.; Manejo de água-planta em solos salinos. Viçosa, Curso de Engenharia Agrícola, UFV/DEA, 2002. 110p.
- FILIZOLA, H.F.; LAMOTTE, M.; FRITSCH, E.; BOULET, R.; ARAÚJO FILHO, J.C.; SILVA, F.B.R. & LEPRUN, J.C. Os fragipãs e duripãs das depressões dos tabuleiros costeiros do Nordeste brasileiro: Uma proposta de evolução. R. Bras. de Ci. Solo, 25:947-963, 2001.
- FREIRE, M.B.G.S.; RUIZ, H.A.; RIBEIRO, M.R.; FERREIRA, P.A.; ALVAREZ V., V.H. & FREIRE, F.J. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 7:45-52, 2003a.
- FREIRE, M.B.G.S.; RUIZ, H.A.; RIBEIRO, M.R.; FERREIRA, P.A.; ALVAREZ V., V.H. & FREIRE, F.J. Estimativa do risco de sodificação de solos de Pernambuco pelo uso de águas salinas. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 7:227-232, 2003b.
- FREITAS, R.A. Argila dispersa em água determinada por agitação rápida, lenta e ultrassom. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2011. 51p. (Dissertação de Mestrado)
- FRENKEL, H.; GOERTZEN, J.O. & RHOADES, J.D. Effects of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on

- clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42:32-39, 1978.
- GEE, G.W. & BAUDER, J. Particle-size analysis. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.383-412.
- GILLMAN, G.P. The influence of net charge on water dispersible clay and sorbed sulphate. *Aust. J. Soil Res.*, 12:173-176, 1974.
- GÓMEZ, J.A.; ROMERO, P.; GIRÁLDEZ, J.V. & FERERES, E. Experimental assessment of runoff and soil erosion in an olive grove on a Vertic soil in southern Spain as affected by soil management, *Soil Use Man.*, 20:426-431, 2004.
- GOLDBERG, S. & FORSTER, H.S. Flocculation of reference clays and arid-zone soil clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:714-718, 1990.
- GREENE, R.S.B.; POSNER, A.M. & QUIRK, J.P. A study of the coagulation of montmorillonite and illite suspensions using the electron microscope. In: EMERSON, W.W.; BOND, R.D. & DEXTER, A.R., eds. *Modifications of soil structure*. John Wiley, p.35-40, 1978.
- GROHMANN, F. & RAIJ, B.V. Dispersão mecânica e pré-tratamento para análise granulométrica de Latossolos argilosos. *R. Bras. Ci. Solo*, 1:52-53, 1977.
- HAMBLIN, A.P. The influence of soil structure on water movement, crop rot growth and water uptake. *Adv. Agron.*, 38:95-158, 1985.
- HARIDASAN, M. & CHIBBER, R.K. Effect physical and chemical properties on the erodibility of some soils of the Malwa Plateau. *Soil Sci.*, 19:293-298, 1971.
- HILLEL, D. *Soil and water. Physical principles and processes*. New York, Academic Press, 1971. 288p.
- IGWE C. A.; ZAREI M. & STAHR K. Clay dispersion of hardsetting Inceptisols in southeastern Nigeria as influenced by soil components. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 37:751-766, 2006.
- IRURTIA, B. & PEINEMANN, N. Efecto de la relación de adsorción de sodio y la concentración de sales sobre la conductividad hidráulica de diferentes suelos. *Ci. Suelo*, 2:165-177, 1986.
- JACOMINE, P.K.T. Distribuição geográfica, características e classificação dos solos coesos dos tabuleiros costeiros. In: REUNIÃO TÉCNICA SOBRE SOLOS COESOS DOS TABULEIROS COSTEIROS: "Pesquisa & Desenvolvimento para os tabuleiros costeiros", 1., Cruz das Almas, 1996. *Anais. Cruz das Almas, Embrapa/CPATC/CNPMF/ IGUFAB*, 1996. p.13-24.
- JEFFREY, W.D. & IZQUIERDO, J. Frijol: fisiología del potencial del rendimiento y la tolerancia al estrese. Santiago, FAO, 1989. 91p.
- KAZMAN, Z. & SHAINBERG, I.M.G.. Effect of low levels of exchangeable Na and applied phosphogypsum on the infiltration rate of various soils. *Soil Sci.*, 135:184-192, 1983.

- KJAERGAARD, C.; DE JONGE, L.W.; MOLDRUP, P. & SCHJONNING P. Water-dispersible colloids: effects of measurement method, clay content, initial soil matric potential, and wetting rate. *Vadose Zone J.*, 3:403-412, 2004.
- KLUTE, A. & DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.687-732.
- LEITE, F.R.B.; SOARES, A.M.L.; MARTINS, M.L.R. Áreas degradadas susceptíveis aos processos de desertificação no Estado do Ceará. 2ª aproximação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 7., Curitiba, 1993. *Anais. Curitiba, Sociedade Brasileira de Sensoriamento Remoto*, 1993. p.156-161.
- LIBARDI, P.L. *Dinâmica da água no solo*. 2.ed. São Paulo, Edusp, 2005. 335p.
- LINDSAY, W.L. *Chemical equilibria in soils*. New York, Wiley-Interscience, 1979. 449p.
- MACE, J.E. & AMRHEIN, C. Leaching and reclamation of a soil irrigated with moderate SAR waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:199-204, 2001.
- MAIA, C.E.; MORAIS, E.R.C. & OLIVEIRA, M. Classificação da água utilizando quatro metodologias de cálculo para a razão de adsorção de sódio - II. Região do Baixo Açu, Rio Grande do Norte. *R. Caatinga*, 11:47-52, 1998.
- MAGALHÃES, A. F. Manejo da fertilidade dos solos irrigados: produtividade, degradação e correção. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21., Petrolina, 1995. *Anais. Petrolina, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 1995. p.77-86.
- McBRIDE, M.B. *Environmental chemistry of soils*. Oxford, Oxford University Press, 1994. 406p.
- McKEAGUE, J.A. & SPROUT, P.N. Cemented subsoils (Duric Horizons) in some soils of British Columbia. *Canadian J. Soil Sci.*, 55:189-203, 1975.
- McINTYRE, D.S. Exchangeable sodium, subplasticity and hydraulic conductivity of some Australian soils. *Aust. J. Soil Res.*, 17:115-120, 1979.
- McNEAL, B. L. & COLEMAN, N.T. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 30:308-312, 1966.
- MELO, F.B.; COELHO, M. A. & FERREYRA, H.F.F. Efeitos do gesso e da concentração salina da água na condutibilidade hidráulica do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:89-92, 1988.
- MESQUITA, M.G.B.F. & MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. *Ci. Rural*, 34:963-969, 2004.
- MEURER, E.J. *Fundamentos de Química do solo*. 3.ed. Porto Alegre, Evangraf, 2006. 285p.

- MINHAS, P.S. & SHARMA, D.R. Hydraulic conductivity and clay dispersion as affected by application sequence of saline and simulated rain water. *Irr. Sci.*, 63:159-167, 1986.
- MUNNER, M. & OADES, J. M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregates stability. I. Laboratory studies with ^{14}C -glucose, CaCO_3 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Aust. J. Soil Res.*, 27, 389-399, 1989.
- NETO, O.B.A.; MATOS, A.T.; ABRAHÃO, W.A.P.; COSTA, L.M. & DUARTE, A. Influência da qualidade da água de irrigação na dispersão da argila de Latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 33:1571-1581, 2009.
- NORTHCOTE, J.H. & SKENE, J.K.M. Australian soils with saline and sodic properties. Melbourne, CSIRO, 1972. 61p.
- OSTER, J.D. & SCHROER, F.W. Infiltration as influenced by irrigation water quality. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:444-447, 1979.
- PANAYIOTOPOULOS, K.P.; BARBAYIANNIS, N. & PAPATOLIOS, K. Influence of electrolyte concentration, sodium adsorption ratio and mechanical disturbance on dispersed clay particle size and critical flocculation concentration in Alfisols. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 35:1415-1434, 2004.
- PEREIRA, F.A.M.; MEDINA, B.F.; GHEYI, H.R. & ETCHEVERS, J.D. Solos afetados por sais no Nordeste. II. Correlação entre sódio solúvel e intercambiável. *R. Bras. Ci. Solo*, 6:167-170, 1982.
- PRATT, P.F. & SUAREZ, D.L. Irrigation water quality assessments. In: TANJI, K.K., ed. *Agricultural salinity assessment and management*. New York, American Society of Civil Engineering, 1990. p.220-236. (Manuals and Reports on Engineering Practice)
- REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo, Manole, 1990. 188p.
- RENGASAMY, P. Clay dispersion in relation to changes in the electrolyte composition of dialysed red-brown earths. *J. Soil Sci.*, 34:723-732, 1983.
- RICHARDS, L.A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington DC, US Department of Agriculture, 1954. 160p. (USDA Agricultural Handbook, 60)
- RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte+argila). *R. Bras. Ci. Solo*, 29:297-300, 2005.
- SANTOS, R.V. Correção de um solo salino-sódico e absorção de nutrientes pelo feijoeiro vigna (*Vigna unguiculata* (L.) Walp). Piracicaba, USP/ESALQ, 1995. 120p. (Tese de Doutorado)
- SANTOS, P.R.; RUIZ, H.A.; NEVES, J.C.L.; ALMEIDA, E.F.A.; FREIRE, M.B.G.S. & FREIRE, F.J. Germinação, vigor e crescimento de cultivares de feijoeiro em soluções salinas. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 13:882-889, 2009.
- SHAINBERG, I. & LETEY, J. Response of soils to sodic and saline conditions. *Hilgardia*, 52:1-57, 1984.

- SOUZA, R.V.C.C.; RIBEIRO, M.R.; SOUZA JUNIOR, V.S.; CORRÊA, M.M.; ALMEIDA, M.C.; CAMPOS, M.C.C.; RIBEIRO FILHO, M.R. & SCHULZE, M.B.B. Caracterização de solos em uma topoclimossequência no maciço de Triunfo – sertão pernambucano. R. Bras. Ci. Solo, 34: 1259 - 1270, 2010.
- SPERA, S.T.; DENARDIN, J.E.; ESCOSTEGUY, P.A.V.; SANTOS, H.P. & FIGUEROA, E.A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. R. Bras. Ci. Solo, 32:2613-2620, 2008, número especial.
- SUMMER, M. E. Sodic soils: New perspectives. In NAIDU, R.; SUMMER, M.E. & RENGASAMY, P., eds. Australian sodic soils: distribution, properties and management. NATIONAL CONFERENCE AND WORKSHOP ON SODIC SOILS, 1., Adelaide, 1995. Anais. Adelaide, 1995. p.1-34.
- UEHARA, G. & GILLMAN, G. The mineralogy, chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays, Boulder, Westview, 1981. 170p.
- VELASCO-MOLINA, H.A.; SWOBODA, A.R. & GODFREY, C.L. Dispersion of soils of different mineralogy in relation to sodium adsorption ratio and electrolytic concentration. Soil Sci., 3:282-287, 1971.
- WHITE, R.E. Introduction to the principles and practice of soil science. New York, John Wiley, 1979. 198p.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of carbon in soil. Com. Soil Sci. Plant Anal., 19:1467-1476, 1988.
- YOUSAF, M.; ALI, O.M. & RHOADES, J.D. Clay dispersion and hydraulic conductivity of some salt-affected arid land soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 51:905-907, 1987.

APÊNDICE

APÊNDICE

Quadro 1A. Esquema da análise de variância da argila dispersa, considerando os sete solos estudados e os tratamentos aplicados a cada solo

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Blocos	2	0,00002430
Solos	6	0,066384*
PST e CE d/Neossolo Flúvico	29	0,01250*
PST e CE d/Luvissole Háplico	29	0,006532*
PST e CE d/Planossolo Háplico	29	0,02973*
PST e CE d/Luvissole Crômico	29	0,02131*
PST e CE d/Vertissolo Háplico	29	0,008621*
PST e CE d/Cambissolo Háplico	29	0,0002778*
PST e CE d/Chernossolo Argilúvico	29	0,001859*
Resíduo	418	0,00002970
CV (%)		13,46

*: Significativo a 5% pelo teste F.

Quadro 2A. Esquema da análise de variância do índice de dispersão para o Neossolo Flúvico, considerando os tratamentos aplicados

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Blocos	2	0,00002800
PST e CE	29	0,2756*
Resíduo	58	0,0006762
CV (%)		9,12

*: Significativo a 5% pelo teste F.

Quadro 3A. Esquema da análise de variância do índice de dispersão, considerando o Luvissole Háplico, o Planossolo Háplico, o Luvissole Crômico, o Vertissolo Crômico, o Cambissolo Háplico e o Chernossolo Argilúvico e os tratamentos aplicados a cada solo

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Blocos	2	0,0001986
Solos	5	0,5152*
PST e CE d/Luvissole Háplico	29	0,1134*
PST e CE d/Planossolo Háplico	29	0,1830*
PST e CE d/Luvissole Crômico	29	0,1922*
PST e CE d/Vertissolo Háplico	29	0,07546*
PST e CE d/Cambissolo Háplico	29	0,002567*
PST e CE d/Chernossolo Argilúvico	29	0,007496*
Resíduo	358	0,0002326
CV (%)		13,99

*: Significativo a 5% pelo teste F.

Quadro 4A. Esquema da análise de variância do índice de dispersão relativo, considerando o Neossolo Flúvico, o Luvissole Háplico, o Planossolo Háplico, o Luvissole Crômico e o Vertissolo Crômico e os tratamentos aplicados a cada solo

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Blocos	2	0,0005277
Solos	4	0,2081*
PST e CE d/Neossolo Flúvico	29	0,3212*
PST e CE d/Luvissole Háplico	29	0,2897*
PST e CE d/Planossolo Háplico	29	0,4071*
PST e CE d/Luvissole Crômico	29	0,3071*
PST e CE d/Vertissolo Háplico	29	0,3647*
Resíduo	298	0,0007976
CV (%)		10,93

*: Significativo a 5% pelo teste F.

Quadro 5A. Esquema da análise de variância do índice de dispersão relativo, considerando o Cambissolo Háplico, o Chernossolo Argilúvico e os tratamentos aplicados a cada solo

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Blocos	2	0,004093
Solos	1	0,01805*
PST e CE d/ Cambissolo Háplico	29	0,09508*
PST e CE d/Chernossolo Argilúvico	29	0,1179*
Resíduo	118	0,002718
CV (%)		58,17

*: Significativo a 5% pelo teste F.

Quadro 6A - Esquema da análise de variância da condutividade hidráulica em meio saturado, considerando o Neossolo Flúvico, o Planossolo Háplico, o Vertissolo crômico e os tratamentos aplicados a cada solo

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Blocos	4	0,03542
Solos	2	0,05649
PST e CE d/Neossolo Flúvico	8	0,3645*
PST e CE d/Planossolo Háplico	8	0,2498*
PST e CE d/Vertissolo Háplico	8	0,3137*
Resíduo	104	0,02564
CV (%)		43,50

*: Significativo a 5% pelo teste F.

Quadro 7A. Esquema da análise de variância da condutividade hidráulica em meio saturado, considerando o Luvisolo Háplico, o Cambissolo Háplico, o Chernossolo Argilúvico e os tratamentos aplicados a cada solo

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Blocos	4	0,2864
Solos	2	23,3073*
PST e CE d/Luvisolo Háplico	8	1,1190*
PST e CE d/Cambissolo Háplico	8	1,5851*
PST e CE d/Chernossolo Argilúvico	8	0,2355
Resíduo	104	0,1475
CV (%)		25,85

*: Significativo a 5% pelo teste F.

Quadro 8A. Esquema da análise de variância da condutividade hidráulica em meio saturado para o Luvisolo Crômico, considerando os tratamentos aplicados

Fonte de variação	GL	Quadrado médio
Blocos	4	0,004393
PST e CE	8	0,02601*
Resíduo	32	0,08319
CV (%)		51,17

*: Significativo a 5% pelo teste F.

Quadro 9A. Esquema da análise de variância da condutividade hidráulica relativa em meio saturado (K_{0R})

Fonte	GL	K_{0R}
Blocos	4	0,06208
Solos	6	1,1163*
PST e CE d/Neossolo Flúvico	8	0,5893*
PST e CE d/Luvisolo Háplico	8	0,4979*
PST e CE d/Planossolo Háplico	8	0,4905*
PST e CE d/ Luvisolo Crômico	8	0,5815*
PST e CE d/ Vertissolo Háplico	8	0,5493*
PST e CE d/ Cambissolo Háplico	8	0,1749*
PST e CE d/ Chenossolo Argilúvico	8	0,06498
Resíduo	248	0,04358
CV (%)		37,59

*: Significativo a 5% pelo teste F.