## Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Eficiência de equações empíricas utilizadas para determinar lâmina de lixiviação de sais e modelagem da distribuição do sódio no solo

# **Elenilson Moreira Franco**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba 2013 Elenilson Moreira Franco Engenheiro Agrônomo

# Eficiência de equações empíricas utilizadas para determinar lâmina de lixiviação de sais e modelagem da distribuição do sódio no solo

Orientador: Prof. Dr. JARBAS HONORIO DE MIRANDA

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba 2013

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP

Franco, Elenilson Moreira

Eficiência de equações empíricas utilizadas para determinar lâmina de lixiviação de sais e modelagem da distribuição do sódio no solo / Elenilson Moreira Franco.- - Piracicaba, 2013.

70 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Sódio 2. Salinidade 3. Recuperação de solo 4. Modelagem computacional I. Título

CDD 631.41 F825e

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

3

Aos meus pais Sebastião de Jesus Franco e Maria Barbosa Moreira, aos meus irmãos e, também, aos meus sobrinhos (Taciele, Taciane, Gabriel e Pedro Henrique); pois são neles e em Deus que busco forças para vencer obstáculos, coragem e inspiração para superar as dificuldades. 

#### AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, sempre presente em minha vida, por me reservar saúde, proteção, e por tudo que me concede;

À minha família, pelo esforço e compreensão nos momentos de ausência, nesta e em outras caminhadas;

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), Departamento de Engenharia de Biossistemas e Programa de Pós-Graduação em Irrigação e Drenagem, pela oportunidade;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa concedida;

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas, pelos ensinamentos transmitidos durante esta jornada;

Ao Prof. Dr. Jarbas Honorio de Miranda, por seu incentivo, orientação, amizade e, principalmente, pela confiança creditada a minha pessoa;

A todos os colegas de curso, pelos momentos, experiências e conselhos partilhados no campo pessoal e profissional;

Em especial, à Lívia, Luciano e Rafaelly, também pela ajuda, de grande valia, prestada no decorrer dos experimentos;

Aos funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas, pelo apoio e colaboração;

Aos parentes, mestres e amigos, que não foram nominalmente citados; mas que, de alguma forma contribuíram para que este momento pudesse acontecer.

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	17
2 DESENVOLVIMENTO	19
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19 19
2.1.2 Caracterização e classificação dos solos afetados por sais	21
2.1.4 Monitoramento de íons e do conteúdo de água no solo	22
<ul><li>2.1.5 Recuperação de solos com problemas de salinidade</li><li>2.1.6 Dinâmica da água e transporte de solutos no perfil do solo</li></ul>	25 29
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	31
2.2.2 Salinização dos solos nas colunas de percolação	32
2.2.3 Cálculo e aplicação das lâminas de lixiviação	35 37
2.2.5 Avaliação do desempenho das equações empíricas	40
2.2.6 Obtenção dos parâmetros de entrada e aplicação do MIDI 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42 45
2.3.1 Construção das curvas de salinização artificial	45
2.3.3 Monitoramento da umidade e da salinidade do solo	46
2.3.4 Análise da lixiviação do sódio e recuperação dos solos	50 53
2.3.6 Mobilidade e distribuição do íon sódio no perfil do solo	56
3 CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS	65

# SUMÁRIO

#### RESUMO

# Eficiência de equações empíricas utilizadas para determinar lâmina de lixiviação de sais e modelagem da distribuição do sódio no solo

A definição adequada da lâmina para lixiviação de sais e recuperação de solos salinos depende da qualidade dos resultados obtidos por meio das diversas equações disponíveis para esse fim. Sabendo disso, objetivou-se, com este trabalho: a) avaliar a eficiência de equações empíricas utilizadas para determinar a lâmina de água necessária à recuperação de solos salinos, bem como, b) a caracterização da mobilidade e distribuição do íon sódio em colunas de solo usando dados experimentais e simulados no modelo computacional MIDI. O estudo constou de etapas experimentais e de simulação e foi conduzido nas dependências do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP, Piracicaba - SP. O experimento em casa de vegetação consistiu na aplicação de três lâminas de lixiviação para lavagem e recuperação de dois materiais de solos, armazenados em 36 colunas. Anteriormente, cada solo foi artificialmente salinizado, por meio da aplicação de cloreto de sódio, elevando-se a condutividade elétrica da solução do solo para valores aproximados de 3,0 e 6,0 dS m<sup>-1</sup>. Assim, os tratamentos, em delineamento de blocos ao acaso, com três repetições, corresponderam a um fatorial de 3 x 2 x 2, decorrente das combinações de três lâminas de lixiviação com dois tipos de solo e dois níveis de salinidade. As lâminas, calculadas a partir do volume de poros de cada solo, foram aplicadas por meio de um sistema de irrigação (gotejamento) a uma vazão de 8 L h<sup>-1</sup>. Após a aplicação das lâminas, a solução do solo de cada coluna foi extraída e levada ao laboratório para se determinar a condutividade elétrica e concentração de sódio. Nesta etapa foram avaliadas as alterações nas características químicas do solo, em resposta à aplicação das lâminas. Em seguida, equações empíricas foram utilizadas para estimar as concentrações de sais remanescentes na solução do solo, em função das lâminas de lixiviação aplicadas; enquanto que o modelo MIDI foi empregado para simular a distribuição do sódio no perfil do solo. Os cenários teóricos gerados a partir do uso das equações e do modelo MIDI foram comparados com os resultados experimentais, observados nos ensaios com as colunas de solos instaladas na casa de vegetação. As concentrações de sódio e, consequentemente, os valores de condutividade elétrica da solução do solo reduziram de maneira inversamente proporcional com a aplicação das lâminas de lixiviação; sendo os melhores resultados observados no solo arenoso, em funcão da maior mobilidade do sódio neste material. De maneira geral, as equações testadas foram mais eficientes no solo arenoso e, dentre elas, a proposta de Cordeiro (2001) foi a que apresentou respostas mais coerentes com os resultados obtidos experimentalmente.

Palavras-chave: Sódio; Salinidade; Recuperação de solo; Modelagem computacional

#### ABSTRACT

# Efficiency of empirical equations used to determine salt leaching water depth and modeling of sodium distribution in soil

The method to properly determine salt leaching water depth and recovery of saline soils depends on the quality of the results obtained by various equations available for this purpose. The objectives of this research were: a) to evaluate the efficiency of empirical equations used to determine the water depth required for saline soils reclamation and b) to characterize the mobility and distribution of sodium in soil columns using experimental and simulated data via the MIDI model. The study consisted of experimental and simulated steps and was carried out at the Department of Biosystems Engineering ("Luiz de Queiroz" College of Agriculture - ESALQ/USP), in Piracicaba, SP. The greenhouse experiment began by applying three leaching water depth for washing and reclaiming two soil types stored in 36 columns. Previously each soil sample was artificially salinized by applying sodium chloride, increasing electrical conductivity (EC) in the soil solution to approximate values of 3.0 and 6.0 dS m<sup>-1</sup>. Thus, the treatments in random block design, with three replications, corresponded to a factorial 3 x 2 x 2, arisen from the combinations of three water depth with two soils types and two levels of salinity. The water depth was calculated based on the pore volume of each soil type, were applied by drip irrigation system at a flow rate of 8 L h<sup>-1</sup>. After the water depth application, the soil solution of each column was extracted and taken to the laboratory to determine the EC and sodium concentration. The changes in soil chemical properties in response to application of the water depths were then evaluated. Empirical equations were used to estimate the remaining sodium concentrations in the soil solution according to the applied water depth; while the MIDI model was used to simulate the sodium ion distribution in the soil profile. The theoretical scenarios generated from the use of the equations along with the MIDI model were compared with the experimental results observed in tests with soil columns installed in the greenhouse. The sodium concentrations and the values of EC in the soil solution were reduced inversely proportional to the application of leaching water depth. The best results were observed in sandy soil, owing to the greater mobility of sodium in this material. In general, the equations tested in sandy soil were more efficient and, among them, the one proposed by Cordeiro (2001) was the most accurate when compared to results obtained experimentally.

Keywords: Sodium; Salinity; Soil reclamation; Computational modeling

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Amostras de solo acondicionadas em vasos de PVC com capacidade para
20 litros (a) e extratores de cápsula cerâmica instalados para obtenção da
solução do solo (b)33
Figura 2 - Distribuição dos solos na área experimental, conforme o delineamento
estatístico de blocos34
Figura 3 - Ilustração do sistema de irrigação, destacando a divisão da descarga dos
gotejadores e os pontos de aplicação da água na superfície do solo37
Figura 4 - Detalhes da instalação no solo (a) e da construção dos extratores de
cápsula cerâmica (b)38
Figura 5 - Preparo do solo para instalação do tubo de acesso (a) e vista geral dos
tubos instalados (b)39
Figura 6 - Estrutura para coleta de efluente (a) e Mariotte usado para aplicação da
solução salina (b)42
Figura 7 - Saturação do solo nas colunas (a) e posterior lavagem com aplicação de
água destilada (b)43
Figura 8 - Curvas de salinização artificial, obtidas por análise de regressão, para os
solos estudados45
Figura 9 - Curva de calibração e equação ajustada para o solo arenoso (a) e para o
solo argiloso (b)47
Figura 10 - Condutividade elétrica (dS m <sup>-1</sup> ) na solução do solo, obtidos a partir do
uso das equações empíricas e da aplicação das lâminas de lixiviação no
solo arenoso53
Figura 11 - Condutividade elétrica (dS m <sup>-1</sup> ) na solução do solo, obtidos a partir do
uso das equações empíricas e da aplicação das lâminas de lixiviação no
solo argiloso55
Figura 12 - Curvas de efluente elaboradas a partir das concentrações de sódio
obtidas no laboratório, com a aplicação de 450 ppm de cloreto de sódio
no solo arenoso (a) e no solo argiloso (b)57
Figura 13 - Representação dos perfis de umidade, obtidos em condições
experimentais e por meio de simulações com o modelo MIDI, para o solo
arenoso (a) e para o solo argiloso (b)59

### LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conteúdo de cloretos, em %, e textura do solo, utilizados para obtenção
do coeficiente proposto por Volobuyev. (Adaptado de CORDEIRO, 2001)
Tabela 2 - Resultados da análise granulométrica dos solos utilizados para
preenchimento das colunas34
Tabela 3 - Terminologia atribuída aos tratamentos do ensaio realizado com as
colunas de percolação (CEes = condutividade elétrica no extrato de
saturação; ε = volume de poros)36
Tabela 4 - Valores de condutividade elétrica no extrato de saturação (CEes) após
salinização artificial46
Tabela 5 - Valores de umidade do solo e respectivas leituras de frequência,
utilizadas para calibração da sonda Diviner: $\theta$ = umidade volumétrica (%)
e SF = frequência normalizada47
Tabela 6 - Valores médios de condutividade elétrica (dS m <sup>-1</sup> ), obtidos na solução do
solo após a aplicação das lâminas de lixiviação
Tabela 7 - Valores médios de concentração de sódio (mg L <sup>-1</sup> ), obtidos na solução do
solo após a aplicação das lâminas de lixiviação49
Tabela 8 - Quadro de análise de variância para os efeitos do solo, condutividade
elétrica inicial e lâmina de lixiviação, sobre a concentração de sódio na
camada 0-20 cm no perfil do solo50
Tabela 9 - Análise de variância para o desdobramento da interação solo*salinidade,
considerando o fator solo dentro de cada nível de salinidade51
Tabela 10 - Análise de variância para o desdobramento da interação solo*salinidade,
considerando o fator salinidade dentro de cada nível de solo51
Tabela 11 - Quadro de análise de variância para o desdobramento da interação
solo*lâmina, considerando solo dentro de cada nível de lâmina52
Tabela 12 - Quadro de análise de variância para o desdobramento da interação
solo*lâmina, analisando o efeito das lâminas dentro de cada nível de
solo52
Tabela 13 - Médias de concentração de sódio (mg L <sup>-1</sup> ) obtidas na solução extraída
da camada de 0 a 20 cm no perfil do solo, após a aplicação das lâminas
de lixiviação53

- uso de equações empíricas para simular as respostas da aplicação de lâminas de lixiviação em solo argiloso......56

#### 1 INTRODUÇÃO

Algumas regiões do Brasil e do mundo apresentam limitações à Agricultura Irrigada, sendo a salinidade do solo e, ou, da água de irrigação um problema que afeta frequentemente as lavouras. Estima-se que 19,5% das terras irrigadas no mundo (45 milhões de hectares) e 2,1% das não irrigadas (32 milhões de hectares) estejam afetadas por sais e que, anualmente, sejam abandonados em torno de 1,5 milhões de hectares devido a esses entraves (FAO, 2006).

Sabe-se que, em condições salinas, ocorre redução na disponibilidade de água para as plantas, pelo decréscimo do componente osmótico do potencial total da água do solo (TESTER E DAVENPORT, 2003), afetando sua absorção pelas plantas, que produzem sintomas semelhantes aos encontrados em situações de seca. Além do efeito osmótico, efeitos específicos, que podem ser de natureza tóxica ou de desbalanceamento de nutrientes, podem atuar separados ou em conjunto.

Apesar da salinidade interferir negativamente sobre os processos fisiológicos e metabólicos das plantas, comprometendo o rendimento e a qualidade da produção, solos com características salinas podem ser recuperados e reincorporados ao processo produtivo. Segundo Cruciani (1986), o primeiro requisito para a recuperação é a existência de condições para a drenagem adequada. Tendose drenagem, a salinidade pode ser reduzida a um nível aceitável por meio da lixiviação, que neste caso denomina-se "lavagem".

Em tempos de escassez, e considerando que maior parte dos solos salinos e sódicos ocorre principalmente em áreas áridas e semiáridas, onde as altas taxas de evapotranspiração e baixa precipitação favorecem ao acúmulo de sais na superfície do solo, a definição adequada da lâmina a ser aplicada assume papel importante do ponto de vista econômico e ambiental na recuperação desses solos. Se por um lado a aplicação de uma lâmina aquém da necessária não produz os efeitos desejados, por outro, uma lâmina de percolação excessiva, promove a eluviação de nutrientes, causando desperdício de recursos e contaminação do lençol freático.

De acordo com Rhoades e Loveday (1990), as estimativas da quantidade de água de lixiviação necessária são baseadas em relações empíricas derivadas de pesquisas e experiências de campo. Indiferentes aos diversos processos que ocorrem simultaneamente ao fluxo de água no solo, estes métodos consideram a zona radicular como uma camada com uma distribuição uniforme do sal, a partir da qual uma quantidade deste é removida pela água que percola através do perfil do solo. Consequentemente, nem sempre essas equações estimam a lâmina com precisão.

Desde o método proposto por Richards (1954), para calcular a lixiviação requerida, numerosos experimentos foram realizados, com colunas de solo no laboratório e no campo, levando ao desenvolvimento de modelos que descrevem o transporte de solutos no solo, baseados em curvas de distribuição de efluente. Mais recentemente, com a introdução do conceito de água móvel e imóvel e fator de retardamento (parâmetro de transporte de solutos no solo), os resultados obtidos a partir dos modelos foram melhorados. Ainda assim, existe uma grande dificuldade em envolver todos os parâmetros pertinentes ao ambiente e, para que possam fornecer resultados mais realísticos, a avaliação desses modelos torna-se uma etapa imprescindível para a validação e a recomendação de uso em condições específicas.

Tendo em vista esses aspectos, e considerando que atualmente existem diversos modelos para o cálculo da lâmina de lixiviação, resultando em uma grande variação na quantidade de água recomendada, pretendeu-se avaliar a eficiência de equações empíricas utilizadas para determinar a lâmina de lixiviação necessária à recuperação de solos afetados por sais e sódio. E, a fim de compreender melhor as interações deste íon com o solo, buscou-se conhecer seus parâmetros de transporte, utilizando-os posteriormente para simulação da sua distribuição no perfil do solo. Para tanto, este trabalho de pesquisa apresentou como objetivos específicos:

- a) avaliar a dessalinização de materiais de solo com propriedades distintas, a partir da aplicação de diferentes lâminas de lixiviação;
- b) utilizar equações empíricas para estimar cenários químicos obtidos em resposta à aplicação das lâminas de lavagem, e avaliar o desempenho dessas equações;
- c) obter os parâmetros de transporte do sódio, simular a distribuição deste íon no solo por meio da aplicação do modelo computacional MIDI e comparar com os dados experimentais.

#### 2 DESENVOLVIMENTO

#### 2.1 Revisão Bibliográfica

#### 2.1.1 Salinidade e agricultura irrigada

Os sais são produtos da intemperização das rochas e, quando em excesso, afetam negativamente os solos, as águas e as plantas. A maior parte dos solos salinos e sódicos ocorre, principalmente, em áreas áridas e semiáridas, onde as altas taxas de evapotranspiração e baixa precipitação favorecem ao acúmulo de sais na superfície do solo. Os processos de salinização e sodificação também são frequentemente acelerados pela irrigação pouco eficiente ou insuficiente drenagem (CORDEIRO, 2001).

A prática da irrigação nas regiões áridas e semiáridas é indispensável, devido à taxa de evapotranspiração exceder à de precipitação durante a maior parte do ano, quando ocorre déficit hídrico para as culturas (HOLANDA E AMORIM, 1997); no entanto, se realizada de maneira inadequada, a irrigação pode provocar salinização dos solos e acarretar prejuízos para o rendimento das culturas (PIZARRO, 1978). Existem muitas evidências no mundo de que, após os benefícios iniciais da irrigação, grandes áreas têm-se tornado impróprias à Agricultura.

No passado, o homem desconhecia as causas que levavam um solo a se tornar salino com a irrigação; hoje, a salinização ocorre pela negligência dos órgãos e pessoas envolvidas com a irrigação, uma vez que suas causas são bem conhecidas, assim como os meios de evitar esse tipo de degradação dos solos (MEDEIROS, 2007). Sabe-se, por exemplo, que um projeto de irrigação, para seu desenvolvimento e operação, deve envolver não apenas a aplicação de água, mas também o controle da salinidade do solo mediante seu manejo adequado (CRUCIANI, 1986).

A água de irrigação, que é responsável pela salinização secundária dos solos nas áreas irrigadas, apresenta uma composição química bastante variada, dependendo da fonte de água, da sua localização geográfica, da época de coleta, etc. (DONEEN, 1975; MEDEIROS, 1992; RICHARDS, 1954; SHALHEVET E KAMBUROV, 1976). Além disso, o excesso de fertilização e a ausência de drenagem adequada podem resultar em situações que favorecem a degradação dos solos (SILVA et al., 2008).

O problema da salinidade em áreas irrigadas se agrava quando o balanço de sais revela maior entrada que saída, promovendo acréscimo da concentração salina na área considerada. E determinadas condições, a água de irrigação, além de contribuir para o aumento da concentração salina, pode também provocar a elevação do lençol freático que passa a fornecer água e sais à zona radicular (SILVA, et al., 2008). Esses sais se acumulam na superfície à medida que a água evapora ou é consumida pelas plantas e, com o tempo, atingem níveis prejudiciais ao desenvolvimento das culturas.

A acumulação de sais na rizosfera prejudica o crescimento e o desenvolvimento das culturas, provocando decréscimos de produtividade e, em casos mais severos, total colapso da produção agrícola (LIMA, 1998). Em se tratando de plantas sensíveis, a menor absorção de água em condições salinas produz sintomas como, por exemplo: murchamento temporário, queimaduras das folhas, coloração verde azulada nas folhas, crescimento reduzido e folhas pequenas (DOORENBOS E PRUITT, 1977).

Assim, solos inicialmente salinos exigem a remoção do excesso de sais, em alguns casos, com aplicação de corretivos químicos. Por outro lado, para evitar-se a salinização de solos que inicialmente sejam normais, a irrigação deve permitir que um excesso de água atravesse a zona radicular e seja eliminado pelo sistema de drenagem (RICHARDS, 1970). Com o aumento na quantidade de água aplicada em cada irrigação, o nível de salinidade do solo pode ser reduzido devido ao aumento do volume de água percolado para baixo da região radicular (PETERSEN, 1996).

Algumas vezes os níveis de salinidade do solo não podem ser reduzidos ao longo do tempo, mediante práticas de manejo da irrigação. Então, quando a salinidade do solo supera o limite de tolerância das culturas, deve-se interromper o cultivo temporariamente e acelerar o processo de remoção dos sais por uso de práticas de recuperação. Para seleção da prática de recuperação apropriada, é necessário fazer o diagnóstico da causa do problema de salinidade (RHOADES E LOVEDAY, 1990).

#### 2.1.2 Caracterização e classificação dos solos afetados por sais

Todos os solos contêm sais, que normalmente são encontrados nas formas de íons em solução, cátions adsorvidos no complexo sortivo do solo ou sal precipitado. Os solúveis consistem, em grande parte, de proporções variadas dos cátions sódio, cálcio e magnésio e dos ânions cloreto e sulfato, sendo que, em quantidades menores, se encontram os ânions bicarbonatos e nitrato (CORDEIRO, 2001).

De acordo com Bernardo et al. (2009), as concentrações desses sais nos solos podem variar com o local (variação espacial), com o tempo (variação temporal) e com a umidade do solo. A relação entre a quantidade de sódio e dos demais cátions adsorvidos, conhecida como Percentual de Sódio Trocável (PST) e determinada pela equação 1, é muito importante nos estudos de solos afetados por sais; sobretudo nos casos em que há predominância do íon sódio no complexo sortivo do solo.

$$PST = \frac{Na^{+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Na^{+} + H^{+} + Al^{3+}} . 100$$
(1)

Os solos afetados por sais podem apresentar características bem diferenciadas, resultado dos diversos fatores de formação, recebendo as denominações de solo salino, solo sódico e solo salino-sódico (Richards, 1954; Allison, 1964). Nessa classificação, estabelecida pelo "U.S. Salinity Laboratory", aplica-se o termo salino àqueles cuja condutividade elétrica do extrato da pasta de saturação (CEes) é maior que 4 dS m<sup>-1</sup> e a porcentagem de sódio trocável (PST) é menor que 15%. Esses solos, com pH geralmente inferior a 8,5, em situações extremas, são reconhecidos pela presença de uma crosta branca na superfície, provocada pela precipitação de sais (BERNARDO et al., 2009).

Solos sódicos são aqueles cuja porcentagem de sódio trocável é maior que 15% e a condutividade elétrica do extrato da pasta de saturação (CEes) é menor que 4 dS m<sup>-1</sup>, com pH geralmente variando entre 8,5 e 10. Já os salino-sódicos, cuja condutividade elétrica do extrato da pasta de saturação é menor que 4 dS m<sup>-1</sup> e a porcentagem de sódio trocável é maior que 15, formam-se como resultado dos

processos combinados de salinização e sodificação (RICHARDS, 1954). Estes últimos, por sua vez, são os que predominam no Semiárido Nordestino.

De acordo com Paliwal e Ghandhi (1976) e Jensen et al. (1990), com o aumento na proporção de sódio, este pode substituir o cálcio e/ou magnésio do complexo sortivo, refletindo-se na perda da capacidade produtiva das terras. Em solos salinos, os efeitos sobre as plantas ocorrem devido, principalmente, ao aumento do potencial osmótico da solução do solo e toxidez resultante da concentração salina de íons específicos (CORDEIRO, 2001); já nos solos sódicos o efeito é mais sobre as características físicas do solo, devido à dispersão dos colóides, que provoca desestruturação do solo, criando problemas de compactação e infiltração da água.

#### 2.1.3 Manejo de irrigação em condições salinas

As práticas de manejo de irrigação em condições salinas são, frequentemente, diferentes daquelas empregadas onde a salinidade não está presente. Nessas condições, as informações básicas requeridas para as decisões de manejo de irrigação incluem desde como as culturas respondem à salinidade até os efeitos dos sais sobre as características físico-hídricas do solo. De acordo com Hoffman (1992), também devem ser considerados os efeitos de fatores ambientais sobre a tolerância das culturas à salinidade, além da corrosão de equipamentos.

Segundo Rhoades et al. (1992), desde que se adote um manejo adequado do sistema solo-água-planta, solos salinos podem ser explorados de forma econômica. Neste caso, a produção fica condicionada ao manejo da irrigação, com vistas ao controle da salinização e à tolerância das culturas à salinidade. Esta última, definida como a capacidade da planta suportar determinados níveis de sais na solução do solo (MAAS, 1990), varia conforme a espécie, variedade, etc. (HEBRON, 1967).

No solo, o controle da salinidade é feito por intermédio do balanço de sais na zona radicular, promovendo-se a lixiviação de sais abaixo desta região durante o período de irrigação (BLANCO, 1999). Segundo Hoffman et al. (1992), quando a água não é muito salina de modo que, durante o ciclo da cultura, a salinidade do solo não ultrapasse a salinidade limiar, não são necessárias lixiviações constantes, podendo-se realizar apenas uma lavagem de recuperação ao final do ciclo da cultura. O monitoramento da condutividade elétrica da solução do solo, extraída por cápsulas porosas, permite evitar possíveis processos de salinização e ou a deficiência nutricional das culturas (SILVA, 2002). De acordo com Padilla (1998), quando as causas da redução de rendimento das culturas forem os problemas de salinidade, criados pelo manejo inadequado dos fertilizantes, deve-se corrigi-los antes de se empregar algum outro tipo de esforço físico ou econômico.

Nos casos em que os níveis salinos são prejudiciais às plantas, geralmente, a lixiviação é a chave para a irrigação bem sucedida. No entanto, o êxito dessa operação depende essencialmente da existência de um sistema de drenagem eficiente que remova a água lixiviada (CRUCIANI, 1986). Segundo Bernardo et al. (2009), a drenagem é necessária, mesmo nas regiões onde a ocorrência de chuvas significativas dispensa a aplicação de uma lâmina de irrigação, para lixiviação de sais.

A qualidade da água de irrigação também é um fator importante para o balanço de sais, devendo-se levar em consideração a sua composição, a tolerância das culturas, as práticas de manejo de solo, das culturas, as condições climatológicas, o método de irrigação e as condições de drenagem (CONTRERAS E ELIZONDO, 1980). A utilização de águas salinas pode representar riscos, tanto para a cultura quanto para o solo e, segundo Alencar (2003), em certos casos, promover alterações físico-químicas no solo, criando condições desfavoráveis ao desenvolvimento das culturas.

A frequência das irrigações é outro fator citado como uma das práticas potenciais de manejo para enfrentar solos e águas salinas. Poucas evidências experimentais existentes, entretanto, sustentam como recomendação comum, que o intervalo de irrigação deveria ser diminuído quando se utiliza água de irrigação salina (HOFFMAN et al., 1992; RHOADES et al., 1992). Os efeitos prejudiciais da alta frequência de irrigação têm sido relatados mais frequentemente pelos pesquisadores. Wagenet et al. (1980), cultivando cevada em pequenas parcelas, em uma casa de vegetação, irrigando a cada 2 ou 4 dias, concluíram que a tolerância da cultura à salinidade foi maior para a menor frequência de irrigação.

De acordo com Aquino (2005), em solos salinos e solos com altos teores de boro, a prática comum é o cultivo de plantas tolerantes, juntamente com gradagens e aplicações de altas lâminas de irrigação para lavagem de sais solúveis em excesso. Em solos sódicos, quando a infiltração é inadequada, opções de manejo são dirigidas para melhorar a condutividade hidráulica do solo. Assim, para melhorar as propriedades físicas do solo, podem ser utilizadas várias combinações de práticas de lavra, uso de corretivos e práticas culturais (GHEYI, 2000).

#### 2.1.4 Monitoramento de íons e do conteúdo de água no solo

O monitoramento de íons no solo constitui-se em uma das principais ferramentas no manejo da fertirrigação (RHOADES E OSTER, 1986); suas concentrações podem ser expressas em valores de condutividade elétrica (CE), que é a medida mais utilizada para o monitoramento da salinidade. Vários são os métodos para determinar a CE e avaliar a salinidade do solo, em condições de campo, tais como as técnicas de indução eletromagnética e de Reflectometria no Domínio do Tempo (RHOADES, 1994), além do uso de extratores de solução.

Cada um dos métodos disponíveis apresenta vantagens e desvantagens, sendo o uso de extratores de cápsula porosa, atualmente, um dos mais preconizados, em função do baixo custo e o fato de a CE obtida refletir as condições reais em que a planta se desenvolve (SILVA, 2002). Segundo Medeiros (2007), a determinação da condutividade elétrica a partir da solução obtida, com o uso de extratores de cápsula cerâmica, é bastante eficiente, devido à facilidade, à versatilidade e à praticidade; destacando-se, ainda, a possibilidade de avaliação de outros parâmetros a partir da solução recolhida.

Quando se utilizam extratores para se obter a solução do solo, é importante conhecer, também, os valores de umidade do solo no momento da coleta. De acordo com Richards (1954), o teor de água do solo reflete diretamente a concentração de íons na solução e, consequentemente, no resultado de leitura da CE desta solução para sais de alta solubilidade. Neste sentido, Silva et al. (1999) verificaram que a CE obtida a partir da solução de extratores e corrigida para umidade de saturação tem boa equivalência com a CE do extrato de saturação, obtida pelo método padrão.

No que se refere à mensuração do conteúdo de água no solo, embora a amostragem gravimétrica seja a técnica padrão, essa metodologia apresenta algumas dificuldades, tais como: resposta lenta, penosa e que altera a estrutura do solo. Como alternativa, os sensores baseados na capacitância elétrica do solo têm sido utilizados e difundidos em pesquisas envolvendo a umidade do solo e o manejo da irrigação (CRUZ et al., 2010). O método não destrutivo e que permite o

monitoramento ao longo do tempo, consiste na medida da capacitância elétrica da matriz do solo, que é uma função do conteúdo de água presente. Os sinais obtidos são convertidos em porcentagens de umidade volumétrica (θ) mediante uma equação de calibração ajustada.

Dentre os equipamentos comercialmente disponíveis com essa tecnologia, a sonda Diviner 2000<sup>®</sup> tem se destacado por apresentar características como facilidade de uso, leituras rápidas e segurança do operador (ANDRADE JÚNIOR et al., 2007). A sonda é composta por um coletor de dados com display e teclado (datalogger) acoplado, via cabo, a um sensor, que ao ser inserido em tubos instalados no solo, denominados "tubos de acesso", faz automaticamente leituras em intervalos regulares de 0,1m de profundidade.

Apesar de o equipamento prover uma calibração universal, o fabricante, bem como resultados apresentados em estudos científicos (PALTINEANU E STARR, 1997; MORGAN et al., 1999; BAUMHARDT et al., 2000; FARES et al., 2004 e GROVES E ROSE, 2004), ressaltam a importância de calibrações locais; estas podem melhorar a precisão das leituras, haja visto que o equipamento determina o conteúdo de água no solo de forma indireta.

#### 2.1.5 Recuperação de solos com problemas de salinidade

Existem diferentes métodos de recuperação de solos afetados por sais: métodos físicos, biológicos, elétricos e químicos. A seleção do método a ser utilizado requer o conhecimento das características estruturais dos solos, do tipo de sais, das condições físicas e químicas do perfil, assim como da capacidade natural de drenagem (CORDEIRO, 2001). Neste contexto, para se tomar decisões acertadas, é importante o diagnóstico correto da natureza e extensão do problema.

Alguns solos, classificados como salinos, podem ser recuperados por lavagem, necessitando apenas que apresentem drenagem apropriada a um bom fluxo lixiviador dos sais; no entanto, solos sódicos e salino-sódicos demandam maior atenção. Em solos salino-sódicos, caso o excesso de sais solúveis seja lixiviado, suas propriedades mudam significativamente, tornando-os sódicos, e as partículas se dispersam deixando-os com baixa permeabilidade, pesados e difíceis de ser trabalhados. O manejo para recuperação destes é a sua lavagem, associada à aplicação de corretivos (BERNARDO et al., 2009).

Várias substâncias podem ser utilizadas como corretivos de solos sódicos e salino-sódicos. Por apresentar baixo custo e pela relativa abundância com que é encontrado em várias partes do mundo, o gesso é o corretivo mais utilizado para recuperação de solos sódicos e salino-sódicos. A eficiência do gesso como corretivo é dependente da sua dissolução (BARROS et al., 2004). De acordo com esses autores, alguns dos fatores que influenciam a taxa de dissolução do gesso no solo são a granulometria das partículas do gesso e o método de aplicação do corretivo.

A quantidade de corretivo a ser aplicada é calculada com base na capacidade de troca de cátions do solo, da porcentagem de sódio trocável que se deseja substituir, e da profundidade e superfície do solo a recuperar (CORDEIRO, 2001). Uma boa relação pode ser obtida com a seguinte equação:

$$N.C. = \frac{(PST_i - PST_f)}{100} . CTC$$
(2)

em que:

N.C. – necessidade de corretivo para cada 100 gramas de solo, meq;

PSTi – porcentagem de sódio trocável inicial, %;

PSTf – porcentagem de sódio trocável final, %;

CTC – capacidade de troca de cátions, miliequivalentes por 100g de solo.

A recuperação de solos sódicos e salino-sódicos tem como objetivo principal a redução da concentração dos sais solúveis e do sódio trocável no perfil do solo, a um nível não prejudicial ao desenvolvimento das culturas (BARROS et al., 2004). De acordo com Richards (1954), Daker (1984) e Pizarro (1985), a diminuição do grau de salinidade envolve o processo de solubilização e a consequente remoção dos sais pela água de percolação, enquanto que a diminuição do teor de sódio trocável envolve a sua substituição pelo cálcio no complexo de troca, antes do processo de lixiviação.

Para o caso de recuperação dos solos salinos, Barros et al. (2005) afirmam que a lixiviação é o método mais eficaz. A técnica recomendada é a aplicação de apenas água para dissolver e transportar os sais solúveis até o sistema de drenagem. A quantidade de água que deve ser lixiviada abaixo da zona radicular, depende da concentração de sais na água de irrigação, do solo e da água do lençol

freático, da tolerância das culturas a serem exploradas, das condições climáticas, e do manejo do solo e da água (HOFFMAN, 1981).

Embora se tenha desenvolvido modelos determinísticos para simular a recuperação de solos salinos, as estimativas da quantidade de água de lixiviação necessária para recuperação de solos salinos são baseadas em relações empíricas derivadas de pesquisas e experiências de campo (RHOADES E LOVEDAY, 1990). E, segundo Palácios (1969), a relação mais indicada é a proposta por Volobuyev, por apresentar resultados mais aproximados aos obtidos em campo e laboratório. A equação de Volobuyev tem a seguinte expressão:

$$L = a \log \frac{CEi}{CEf}$$
(3)

em que:

*L* – lâmina de água necessária para lavar um metro de profundidade de solo, cm; *CEi* – condutividade elétrica inicial do extrato de saturação do solo, mmhos cm<sup>-1</sup>; *CEf* – condutividade elétrica final desejada no extrato, mmhos cm<sup>-1</sup> a 25° C; *a* – coeficiente que depende do conteúdo de cloretos e da textura do solo, Tabela 1.

Teedowe	Conteúdo de Cloretos (%)					
Textura –	60 - 40	40 - 20	20 - 10	<10		
Pesada	122	132	142	178		
Média	92	102	112	148		
Ligeira	62	72	82	118		

Tabela 1 - Conteúdo de cloretos, em %, e textura do solo, utilizados para obtenção do coeficiente proposto por Volobuyev. (Adaptado de CORDEIRO, 2001)

Embora tenha sido bastante difundida, Cordeiro (2001) relata que esta equação possui várias limitações, por exemplo: o coeficiente "a" é obtido apenas em função do conteúdo de cloretos e da textura do solo, sem considerar a influência que outros sais podem ter sobre o comportamento físico e químico dos solos a serem lavados. Como alternativa, o autor apresenta uma equação (4) desenvolvida a partir da anterior, porém com a vantagem de que ao coeficiente "a" estão integrados fatores como: a qualidade química da água de lavagem, as condições de salinidade do solo, a profundidade de lavagem, etc.

28

$$L = 9,0 \ (p) \ 0,75 \ \frac{(70 - CEr)}{(CEi - CEr)} \ . \ 0,3 \ . \ \log \frac{CEi}{CEf}$$
(4)

em que:

- L lâmina de água necessária, cm;
- p-profundidade do solo, cm;
- *CEr* condutividade elétrica da água de lavagem, mmhos cm<sup>-1</sup>;
- *CEi* condutividade elétrica inicial, mmhos cm<sup>-1</sup>;
- CEf condutividade elétrica final desejada, mmhos cm<sup>-1.</sup>

Jury et al. (1979) estabeleceram a relação apresentada na equação 5:

$$\frac{C}{C_o} \cdot \frac{D_l}{D_s \cdot \theta} = 0.8 \tag{5}$$

em que:

- C concentração de sais na solução do solo depois da recuperação, mg L<sup>-1</sup>;
- $C_o$  concentração de sais na solução do solo antes da recuperação, mg L<sup>-1</sup>;
- $D_l$  lâmina de água a ser aplicada no solo para a lixiviação dos sais, cm;
- D<sub>s</sub> profundidade do solo que se deseja recuperar, cm;
- $\theta$  conteúdo volumétrico de água no solo, cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>.

Baseado em dados experimentais de campo, Hoffman (1980) propôs a utilização de um coeficiente na relação anterior, resultando na equação 6, para recuperação de solos salinos com água de boa qualidade.

$$\frac{C}{C_o} \cdot \frac{D_l}{D_s} = K \tag{6}$$

em que:

- C concentração de sais na solução do solo depois da recuperação, mg L<sup>-1</sup>;
- $C_o$  concentração de sais na solução do solo antes da recuperação, mg L<sup>-1</sup>;
- $D_l$  lâmina de água a ser aplicada no solo para a lixiviação dos sais, cm;
- $D_{\rm s}$  profundidade do solo que se deseja recuperar, cm;
- K constante que varia com o tipo de solo e método de aplicação de água.

O coeficiente *K* varia de 0,3 a 0,1 quando a recuperação é realizada por inundação e o solo varia de argiloso a arenoso. Quando a aplicação de água e feita por aspersão ou gotejamento, utiliza-se o valor 0,1, independente do tipo de solo. Entretanto, Blanco & Folegatti (2001), avaliando diferentes lâminas de lavagem e métodos de aplicação de água, concluíram que a aplicação por gotejamento foi a mais eficiente na lixiviação de sais acumulados no solo. Os mesmos autores recomendam a adoção de K = 0,1 e K = 0,2 para gotejamento e inundação, respectivamente.

Para Rhoades E Loveday (1990), quando a água de irrigação apresenta concentração significativa de sais, sua salinidade pode entrar na equação em subtração a  $C \in C_o$ , aperfeiçoando o cálculo; ou seja, considerando a concentração salina da água aplicada ( $C_a$ ), ( $C/C_o$ ) pode ser substituído por ( $C-C_a$ )/( $C_o-C_a$ ).

#### 2.1.6 Dinâmica da água e transporte de solutos no perfil do solo

A compreensão da dinâmica da água e do transporte de solutos no solo, assim como dos processos envolvidos, é de interesse não só da agricultura mas, também, da Hidrologia e das ciências ambientais, em geral. Além do aspecto econômico, relacionado às perdas por lixiviação de fertilizantes e outros produtos químicos aplicados nas lavouras, este tipo de informação auxilia a previsão de riscos de contaminação ambiental.

A primeira experiência que quantificou o fluxo de água em um meio poroso saturado foi publicada em 1856 pelo engenheiro hidráulico Henry Darcy. Resultado de seus experimentos sobre escoamento de água em meio arenoso, a equação de Darcy tornou-se a base científica para estudos de movimento de água em meios porosos. Essa equação foi adaptada mais tarde para solos não saturados, passando a chamar-se equação de Darcy-Buckingham (REICHARDT E TIMM, 2004).

A equação de Darcy-Buckingham ou Buckingham-Darcy permite expressar a densidade de fluxo de água através de um meio poroso, por unidade de superfície, em função da condutividade hidráulica do material e do gradiente hidráulico. Baseado no princípio de Conservação de Massa, Richards combinou a equação de Buckingham- Darcy com a Equação da Continuidade e obteve a equação geral que descreve o movimento de água em solos não saturados, a qual é conhecida na literatura de ciência do solo como equação de Richards (BOTREL, 1988).

Sabe-se que o transporte de solutos é vinculado ao fluxo de água no solo e este, por sua vez, pode ser descrito com base na lei de Darcy. Porém, essa abordagem não é suficiente para abranger o movimento de solutos no solo. A complexidade do transporte de solutos no solo está no fato de que eles podem interagir com a matriz do solo, podem precipitar se os limites de solubilidade forem excedidos, e podem interagir com eles mesmos (FRANKFURT, 2008).

A quantificação do fluxo de água e do transporte de solutos no solo pode ser realizada por meio de medidas em campo, por modelagem física ou por modelagem matemática. As medidas de campo demandam tempo para coleta de dados e tem custos elevados; enquanto que a principal vantagem do uso de modelos é a economia de tempo e capital investido, haja vista que possibilitam simular múltiplos cenários, ao invés de se utilizar longos períodos de observação e de coleta de dados (AZEVEDO et al., 1996).

Dentro dessa perspectiva, a modelagem vem sendo utilizada por muitos pesquisadores em todo o mundo. Segundo Genuchten e Wierenga (1986), vários modelos teóricos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos para descrever o transporte de solutos no solo. O sucesso desses modelos, no entanto, depende em grande parte da capacidade de se quantificar os parâmetros de transporte, que são variáveis de entrada para esses modelos.

Durante o seu doutoramento, e a partir da resolução numérica de equações complexas que descrevem o movimento da água e transporte de solutos no solo, Miranda (2001) desenvolveu e testou um modelo computacional para simular o fluxo de água e a dinâmica de nitrato no solo. O modelo, denominado MIDI, foi capaz de estimar com êxito o potencial matricial da água e as variações na concentração de soluto no perfil do solo ao longo do tempo.

Em suas operações, o MIDI considera a velocidade da água nos poros de uma coluna de solo subdividida em uma série de camadas, a dispersão hidrodinâmica ou coeficiente dispersivo-difusivo e o retardamento que ocorre quando há interação química entre o soluto e o solo. De acordo com Borges Júnior e Andrade (2008), o método mais adequado para estimar esses parâmetros é o ajustamento de modelos teóricos a dados experimentais da curva de efluente, obtida em laboratório.

#### 2.2 Material e Métodos

O estudo foi realizado em quatro etapas: 1) salinização dos solos armazenados em colunas, 2) recuperação dos solos salinizados, 3) estimativa das concentrações de sódio remanescente nos solos após o procedimento de dessalinização, e 4) simulação da distribuição deste íon no perfil de cada solo. A primeira etapa teve início em laboratório, com ensaios preliminares para obtenção de curvas de salinização artificial, e culminou com a salinização dos solos armazenados em colunas de percolação, previamente instaladas em uma casa de vegetação.

A segunda etapa, que consistiu na aplicação de lâminas de lixiviação para lavagem e recuperação dos solos salinizados, foi conduzida no interior de uma estrutura metálica, com área de aproximadamente 100 m<sup>2</sup> cobertos por um filme plástico de 150 micras. A estrutura, localizada nas dependências do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP, Piracicaba - SP, abrigava 36 colunas de percolação preenchidas com dois materiais de solo classificados como Latossolo Vermelho e Nitossolo (LELIS NETO, 2008).

Na etapa seguinte, as equações empíricas extraídas de publicações técnicas e científicas foram utilizadas para estimar as concentrações de sódio remanescente na solução de cada solo, após a aplicação das lâminas de lixiviação e dessalinização destes materiais. Os cenários teóricos obtidos com o uso dessas equações, comumente utilizadas e/ou recomendadas para determinação da lâmina de lixiviação, foram comparados com resultados experimentais observados no ensaio com as colunas de percolação instaladas na casa de vegetação.

A quarta e última etapa foi a obtenção dos parâmetros de transporte do cátion sódio e a aplicação do modelo MIDI para simular a distribuição deste íon no perfil de cada solo estudado. Esta etapa, desenvolvida no laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP, iniciou-se com a realização de ensaios de deslocamento miscível para elaboração de curvas de distribuição de efluente. Os coeficientes dispersivo-difusivos e fatores de retardamento, obtidos a partir das curvas, constituíram parâmetros de entrada para o modelo MIDI.

#### 2.2.1 Construção das curvas de salinização artificial

A construção das curvas de salinização artificial visou a obtenção de equações capazes de estimar a quantidade de cloreto de sódio necessária ao preparo de cada uma das soluções a serem aplicadas aos solos das colunas de percolação, para que a condutividade elétrica no extrato de saturação atingisse valores aproximados de 3,0 e 6,0 dS m<sup>-1</sup>. Para isso, em laboratório, foi preparada uma solução padrão (4800 mg L<sup>-1</sup>) de cloreto de sódio dissolvido em água. A partir da diluição de alíquotas desta solução, outras diferentes concentrações também foram obtidas.

Paralelamente, amostras de solo foram colocadas para secar ao ar, peneiradas e acondicionadas em vasos de PVC, cujas bases continham furos associados a um sistema de drenagem, composto por uma camada de brita e uma manta de tecido geotêxtil. Foram utilizados dois materiais de solo com classes texturais distintas: os mesmos utilizados nos demais ensaios em laboratório e na casa de vegetação.

Após o acondicionamento dos solos nos vasos, a umidade de cada um foi elevada à máxima capacidade de retenção, utilizando, para isso, as soluções de concentrações conhecidas (de 960 a 4800 mg L<sup>-1</sup>, em intervalos de 960 mg L<sup>-1</sup>, o que corresponde às condutividades teóricas variando de 1,5 a 7,5 dS m<sup>-1</sup>) obtidas anteriormente. Para relacionar a concentração do sal dissolvido (*C*) à condutividade elétrica da solução (*CEs*) foi utilizada a equação (7) proposta por Richards (1954):

$$C = 640 . CEs$$
 (7)

em que:

C – concentração do sal na solução, mg L<sup>-1</sup>;

*CEs* – condutividade elétrica da solução, dS m<sup>-1</sup>.

Uma solução correspondente à *CEs* de 0,5 dS m<sup>-1</sup> também foi utilizada, de modo que o ensaio foi conduzido com a aplicação de seis concentrações de sódio em cada tipo de solo, totalizando 12 unidades experimentais. E, como pode ser observado nas Figuras 1a e 1b, em cada unidade experimental (vaso) foi instalado

um extrator de cápsula cerâmica para obtenção da solução do solo armazenada em sua câmara, depois de atingido o equilíbrio entre a cápsula e o solo.



Figura 1 - Amostras de solo acondicionadas em vasos de PVC com capacidade para 20 litros (a) e extratores de cápsula cerâmica instalados para obtenção da solução do solo (b)

Passadas 48 horas da aplicação das soluções salinas, e após a eliminação de uma camada de aproximadamente 2 cm da superfície do solo, a solução de cada vaso foi extraída (Figura 1b) e as amostras encaminhadas ao laboratório para aferição da condutividade elétrica. Os resultados foram tabulados e, por meio de análise de regressão, foi obtida uma curva de salinização artificial para cada solo.

#### 2.2.2 Salinização dos solos nas colunas de percolação

No interior da casa de vegetação encontravam-se distribuídas 36 bombonas plásticas medindo respectivamente, 0,6 e 0,8 m, de diâmetro e altura. Durante sua instalação, cada bombona foi perfurada para drenagem e posicionada sobre um degrau de tijolos, a fim de evitar a obstrução do sistema de drenagem, composto por uma camada interna de 0,1 m de pedra brita e uma manta de tecido geotêxtil. Em seguida, estas mesmas bombonas foram preenchidas com os materiais de solo, passando a constituir as colunas de percolação utilizadas neste estudo.

Para o preenchimento foram utilizados dois materiais de solo: um de textura arenosa e outro de textura mais argilosa. Provenientes da camada arável no campo (de 0 a 20 cm), os solos foram destorroados e peneirados em malha de 5 mm. Nesta

oportunidade, amostras individuais foram coletadas e enviadas ao Laboratório Agrotécnico de Piracicaba (Pirassolo) para sua caracterização física (Tabela 2).

Solo	Argila	Silte	Areia Total	Areia Grossa	Areia Fina
	<0,002mm	0,053-0,002mm		2,00-0,210mm	0,210-0,053mm
			g/kg		
Arenoso	217	13	770	340	430
Argiloso	451	99	450	150	300

Tabela 2 - Resultados da análise granulométrica dos solos utilizados para preenchimento das colunas

A disposição dos solos na área experimental foi realizada de acordo com o delineamento estatístico de blocos ao acaso, com três repetições, conforme o croqui apresentado na Figura 2. Ao final do preenchimento das bombonas, foram realizadas sucessivas irrigações a fim de promover a lixiviação de íons e a acomodação dos solos.



Figura 2 - Distribuição dos solos na área experimental, conforme o delineamento estatístico de blocos

Para obter o nível de salinidade imposto a cada tratamento, os solos tiveram seus valores de condutividade elétrica no extrato de saturação elevados a aproximadamente 3,0 e 6,0 dS m<sup>-1</sup>, por meio da adição de uma solução salina obtida a partir de cloreto de sódio dissolvido em água da rede de abastecimento da ESALQ. A quantidade do sal utilizada no preparo de cada solução foi calculada com base na curva de salinização artificial do respectivo solo.

Uma vez estimada a concentração do sal *(C)*, necessária ao preparo de cada solução, por meio da equação ajustada a partir da curva de salinização, efetuou-se a

correção dos valores para a umidade de saturação. Assim, a concentração corrigida *(Cf)* foi obtida aplicando a expressão apresentada na equação 8:

$$Cf = \frac{Us}{Ucc} \cdot C \tag{8}$$

em que:

Cf – concentração final de sódio na solução salina, mg L<sup>-1</sup>;

C – concentração de sódio, obtida a partir da curva de salinização, mg L<sup>-1</sup>;

Us – umidade de saturação do solo (pasta saturada), g g<sup>-1</sup>;

Ucc – umidade do solo na capacidade de campo, g g<sup>-1</sup>.

A aplicação das soluções salinas se deu por meio de um sistema de irrigação e, ao término das aplicações, os níveis de condutividade elétrica na solução do solo foram aferidos por meio da análise das soluções extraídas do solo 48 horas após a salinização. Feito isso, as colunas foram cobertas com plástico, para evitar evaporação, permanecendo assim até o solo atingir umidade próxima à da capacidade de campo.

#### 2.2.3 Cálculo e aplicação das lâminas de lixiviação

O processo de recuperação dos solos salinizados consistiu na aplicação de três lâminas de água para lixiviação dos sais e redução da condutividade elétrica por meio da técnica de lavagem. As lâminas corresponderam a frações do volume de poros de cada solo, calculado a partir da equação 9:

$$\varepsilon = \alpha . V$$
 (9)

em que:

 $\varepsilon$  – volume de poros na coluna de solo, cm<sup>3</sup>;

 $\alpha$  – porosidade do solo, decimal;

V – volume ocupado por solo na coluna, cm<sup>3</sup>.

Foram adotadas lâminas equivalentes às seguintes frações: L1 (1,0 volume de poros); L2 (2,0 volumes de poros); e L3 (3,0 volumes de poros). Estes valores foram adaptados do estudo realizado por Barros et al. (2005), que avaliaram lâminas de lixiviação necessárias para correção da salinidade de dois materiais de solo do Estado de Pernambuco.

As três lâminas, combinadas aos dois tipos de solo e aos dois níveis de salinidade, constituíram os tratamentos (Tabela 3) deste ensaio. Deste modo, o experimento correspondeu a um arranjo fatorial 3 x 2 x 2 (três lâminas de lixiviação, dois tipos de solo e dois níveis de condutividade elétrica no extrato de saturação) e foi conduzido em delineamento experimental de blocos ao acaso, com três repetições.

Tratamento	Terminologia	Significado
T1	ARC3L1	Solo arenoso, <i>CEes</i> 3,0 dS m <sup>-1</sup> , recebeu lâmina igual a 1ɛ
T2	ARC3L2	Solo arenoso, <i>CE</i> es 3,0 dS m <sup>-1</sup> , recebeu lâmina igual a $2\epsilon$
Т3	ARC3L3	Solo arenoso, <i>CEes</i> 3,0 dS m <sup>-1</sup> , recebeu lâmina igual a 3ɛ
Τ4	AGC3L1	Solo argiloso, <i>CE</i> es 3,0 dS m <sup>-1</sup> , recebeu lâmina igual a 1ε
T5	AGC3L2	Solo argiloso, <i>CE</i> es 3,0 dS m <sup>-1</sup> , recebeu lâmina igual a 2ε
Т6	AGC3L3	Solo argiloso, <i>CE</i> es 3,0 dS m <sup>-1</sup> , recebeu lâmina igual a 3ε
Τ7	ARC6L1	Solo arenoso, <i>CEes</i> 6,0 dS m <sup>-1</sup> , recebeu lâmina igual a 1ε
Т8	ARC6L2	Solo arenoso, <i>CE</i> es 6,0 dS $m^{-1}$ , recebeu lâmina igual a 2 $\epsilon$
Т9	ARC6L3	Solo arenoso, <i>CEes</i> 6,0 dS m <sup>-1</sup> , recebeu lâmina igual a 3ɛ
T10	AGC6L1	Solo argiloso, <i>CE</i> es 6,0 dS m <sup>-1</sup> , recebeu lâmina igual a 1ε
T11	AGC6L2	Solo argiloso, <i>CEes</i> 6,0 dS m <sup>-1</sup> , recebeu lâmina igual a 2ε
T12	AGC6L3	Solo argiloso, <i>CEes</i> 6,0 dS m <sup>-1</sup> , recebeu lâmina igual a 3ε

Tabela 3 - Terminologia atribuída aos tratamentos do ensaio realizado com as colunas de percolação (*CEes* = condutividade elétrica no extrato de saturação; ε = volume de poros)

Com cada lâmina testada ocupando 12 unidades experimentais, representadas por colunas de solo, totalizaram-se 36 unidades experimentais no ensaio. A água foi aplicada à superfície do solo de cada coluna, por gotejamento, a uma vazão de 8 L h<sup>-1</sup>. O sistema de irrigação utilizou emissores compensadores de vazão, do tipo botão, inseridos em linhas de tubo de polietileno. A fim de obter uniformidade de distribuição da água na superfície do solo, cada gotejador foi conectado a um divisor de descarga, como ilustrado na Figura 3. Também foram instaladas válvulas no início de cada linha lateral para facilitar a condução do experimento.



Figura 3 - Ilustração do sistema de irrigação, destacando a divisão da descarga dos gotejadores e os pontos de aplicação da água na superfície do solo

A água utilizada na aplicação das lâminas foi proveniente da rede de abastecimento do campus da Escola, uma vez que o local do ensaio dispunha de tubulação com acesso a esse sistema. O tempo de aplicação foi definido conforme a extensão da lâmina em cada tratamento, e o controle foi realizado com o auxílio de um sistema de automação que permitiu ajustar o tempo de funcionamento do conjunto moto-bomba àquele necessário para aplicação de cada lâmina.

#### 2.2.4 Monitoramento da umidade e salinidade do solo

As alterações nas características químicas do solo, em resposta à aplicação das lâminas de lixiviação, foram avaliadas por meio do monitoramento da condutividade elétrica e da concentração de sódio remanescente na solução do solo de cada coluna. Para isso, a solução do solo foi obtida com o uso de extratores, posteriormente à aplicação das lâminas, e as variáveis químicas foram medidas em laboratório e corrigidas para umidade de saturação.

Com este objetivo, foram instalados três extratores de cápsula cerâmica no solo de cada uma das colunas (Figura 4a); foram utilizadas, portanto, 108 unidades deste dispositivo que consiste basicamente de um tubo de PVC com uma cápsula porosa na extremidade inferior (Figura 4b). Com o auxílio de um trado, as cápsulas foram posicionadas em três profundidades (20, 40 e 60 cm) no perfil do solo.





A solução do solo foi obtida com a aplicação de uma tensão de 80 kPa na câmara de cada extrator, utilizando uma bomba de vácuo, 24 horas após o fim da aplicação das lâminas. Passadas outras 24 horas, para que ocorresse a redistribuição da solução e equilíbrio entre a cápsula e o solo, as soluções recolhidas pelos extratores foram coletadas com uma seringa hospitalar e armazenadas em tubos de acrílico, sendo conduzidas para análise.

Em laboratório, determinou-se a condutividade elétrica de cada amostra, por meio de um condutivímetro de bancada, e a concentração de sódio por fotometria de chama. Os valores de condutividade elétrica e concentrações de sódio, determinados mediante a solução extraída pelas cápsulas porosas, foram corrigidos para a umidade de saturação empregando a equação 10:

$$C_{corrigida} = \frac{Ccp \cdot Ucp}{Us}$$
(10)

#### em que:

 $C_{corrigida}$  – condutividade elétrica ou concentração de sódio no extrato de saturação, estimada a partir dos valores determinados na solução do solo, dS m<sup>-1</sup> ou mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>; Ccp – condutividade elétrica ou concentração de sódio na solução do solo, obtida com extrator de cápsula porosa, dS m<sup>-1</sup> ou mmol<sub>c</sub> L<sup>-1</sup>;

*Ucp* – umidade do solo durante aplicação de tensão na cápsula dos extratores, g g<sup>-1</sup>; *Us* – umidade de saturação do solo (pasta saturada), g g<sup>-1</sup>. A umidade do solo, no momento da aplicação de tensão na cápsula dos extratores, foi aferida por meio de medições pontuais utilizando-se uma sonda de capacitância modelo Diviner 2000<sup>®</sup>. Para isso, um tubo de PVC (DE = 56,5 mm, DI = 51 mm e comprimento de 1,0 m), denominado tubo de acesso, foi instalado no solo de cada uma das colunas (Figuras 5a e 5b) e as medições ocorreram nas mesmas profundidades onde se encontravam as cápsulas dos extratores.







Figura 5 - Preparo do solo para instalação do tubo de acesso (a) e vista geral dos tubos instalados (b)

A sonda foi calibrada seguindo os procedimentos recomendados pelo fabricante (SENTEK, 2007) e adaptados para as condições do experimento, quais sejam: primeiramente foi realizada a normalização do sensor (registro de leituras com o sensor dentro do tubo de acesso exposto ao ar e à água) e só depois, foi realizada a calibração propriamente dita. Durante a calibração, os solos das colunas foram umedecidos e à medida que iam secando eram realizadas leituras com a sonda, em camadas de 10 cm, até a profundidade de 60 cm. Simultaneamente, foram coletadas três amostras de solo, a cada profundidade, para determinar a umidade pelo método gravimétrico (RICHARDS, 1954). As frequências normalizadas foram calculadas com a equação 11:

$$SF = (F_A - F_S) (F_A - F_W)^{-1}$$
(11)

em que:

SF – frequência normalizada ou contagem relativa, adimensional;

 $F_A$  – leituras com o tubo de acesso suspenso no ar, Hertz;

 $F_W$  – leituras com o tubo de acesso imerso em água, Hertz;  $F_S$  – leituras com o tubo de acesso instalado no solo, Hertz.

Relacionando as frequências normalizadas aos seus correspondentes valores de umidade, determinada pelo método gravimétrico, foi obtida uma curva de calibração para cada solo estudado. Os coeficientes das curvas foram inseridos no *datalogger* da sonda para obtenção de leituras mais confiáveis no decorrer do experimento.

#### 2.2.5 Avaliação do desempenho das equações empíricas

Terminados os ensaios na casa de vegetação, equações empíricas citadas em publicações técnicas e científicas foram utilizadas para estimar as concentrações de sódio remanescentes na solução de cada solo, após a aplicação das lâminas de lixiviação e dessalinização destes materiais. Para efeito de comparação, foram adotadas nos cálculos as mesmas lâminas de lixiviação aplicadas nos ensaios reais e as condições químicas iniciais também foram as mesmas dos solos armazenados nas colunas de percolação.

Desta forma, as concentrações de sódio foram calculadas empregando-se as equações 3, 4, 5 e 6; para facilidade de cálculo, foram isoladas as variáveis de interesse em cada uma das equações, obtendo-se as relações apresentadas nas equações 12, 13, 14 e 15, respectivamente. É importante observar que algumas equações apresentam como resultado a condutividade elétrica enquanto outras apresentam concentração de íons. Nestes casos os resultados foram convertidos em concentrações de sódio e condutividade elétrica multiplicando-se ou dividindo os resultados das equações por 640, conforme proposta de Richards já referenciada em tópicos anteriores deste texto.

$$CE_f = CE_i \cdot 10^{-\left(\frac{L}{a}\right)}$$
(12)

em que:

*CEf* – condutividade elétrica final no extrato de saturação, mmhos cm<sup>-1</sup>; *CEi* – condutividade elétrica inicial do extrato de saturação, mmhos cm<sup>-1</sup>; L – lâmina de água a ser aplicada no solo para a lixiviação dos sais, mm;

a – coeficiente que depende do conteúdo de cloretos e textura do solo.

$$CE_{f} = CE_{j} \cdot 10^{-\left(\frac{L}{2,025 \cdot (p) \cdot \left(\frac{70 \cdot CE_{r}}{CE_{j} \cdot CE_{r}}\right)}\right)}$$
(13)

em que:

*CEf* – condutividade elétrica final no extrato de saturação, mmhos cm<sup>-1</sup>;

*CEi* – condutividade elétrica inicial do extrato de saturação, mmhos cm<sup>-1</sup>;

L – lâmina de água a ser aplicada no solo para a lixiviação dos sais, mm;

p – profundidade do solo a ser recuperado, cm;

*CEr* – condutividade elétrica da água de lavagem, mmhos cm<sup>-1</sup>;

*CEi* – condutividade elétrica inicial, mmhos cm<sup>-1</sup>.

$$C = 0.8 \cdot C_{o} \cdot \theta \cdot \left(\frac{D_{s}}{D_{l}}\right)$$
(14)

em que:

C – concentração de sais na solução do solo depois da recuperação, mg L<sup>-1</sup>;

 $C_{o}$  – concentração de sais na solução do solo antes da recuperação, mg L<sup>-1</sup>;

 $\theta$  – umidade volumétrica do solo, cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;

 $D_{\rm s}$  – profundidade do solo que se deseja recuperar, cm;

 $D_l$  – lâmina de água a ser aplicada no solo para a lixiviação dos sais, cm.

$$C = C_o \cdot K \cdot \left(\frac{D_s}{D_l}\right) \tag{15}$$

em que:

C - concentração de sais na solução do solo depois da recuperação;

- C<sub>o</sub> concentração de sais na solução do solo antes da recuperação;
- K constante que varia com o tipo de solo e método de aplicação de água.
- D<sub>s</sub> profundidade do solo que se deseja recuperar;
- $D_l$  lâmina de água a ser aplicada no solo para a lixiviação dos sais.

O desempenho das equações foi avaliado utilizando os cálculos obtidos com o uso destas equações, comparando-os aos resultados experimentais observados no ensaio com as colunas de percolação instaladas na casa de vegetação.

#### 2.2.6 Obtenção dos parâmetros de entrada e aplicação do MIDI

A distribuição do sódio no solo foi obtida por meio de simulações realizadas empregando o modelo computacional MIDI (MIRANDA, 2001). Parâmetros relativos aos solos e à solução deslocada através destes constituíram as variáveis de entrada para o modelo; sendo que os parâmetros da curva de retenção de água foram obtidos por meio da equação de Genuchten (1980), a partir da caracterização físico-hídrica de amostras de solo enviadas para análise em laboratório.

Para determinar os parâmetros relativos ao sódio, foram elaboradas curvas de distribuição de efluentes, a partir de dados experimentais obtidos com a realização de ensaios em colunas de deslocamento miscível (Figura 6). Nos ensaios, desenvolvidos no laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ, foram utilizadas colunas de 19,8 cm de altura, confeccionadas a partir de tubo PVC de 4,8 cm de diâmetro. Cada coluna foi preenchida com um volume conhecido de solo, previamente destorroado, seco ao ar e peneirado em malha de 2 mm.



Figura 6 - Estrutura para coleta de efluente (a) e Mariotte usado para aplicação da solução salina (b)

A solução salina, obtida a partir de cloreto de sódio dissolvido em água (450 mg L<sup>-1</sup>), foi aplicada aos solos utilizando um Frasco de Mariotte (Figura 6b) de forma a manter constante a taxa de aplicação. É importante ressaltar que, antes mesmo de iniciar a aplicação da solução, o solo de cada coluna foi saturado com água destilada e de forma lenta. A saturação se deu de baixo para cima, facilitando a expulsão do ar contido nos poros do solo e a ocupação destes pela água. Em seguida, o conjunto ficou em repouso por um período de aproximadamente 24 horas (Figura 7a).



(a)

(b)

Figura 7 - Saturação do solo nas colunas (a) e posterior lavagem com aplicação de água destilada (b)

O ensaio propriamente dito iniciou-se com a passagem de água destilada através da coluna (também por um período aproximado de 24 horas), para que todo o sódio eventualmente presente na solução do solo pudesse ser lixiviado (Figura 7b). Uma vez observado um fluxo constante, realizou-se a troca dos recipientes de abastecimento, substituindo a água destilada pela solução de cloreto de sódio.

Com o início da aplicação da solução, iniciou-se também a coleta do efluente que atravessava a coluna de solo. Para isso, foram utilizados recipientes coletores com capacidade para 20 mL, sendo que o volume coletado individualmente foi de 15 mL. Paralelamente às coletas, eram feitas anotações do tempo necessário para preenchimento de cada recipiente. A aplicação da solução e a coleta do efluente permaneceram até que a concentração iônica neste se aproximou à concentração na solução aplicada; neste momento os ensaios foram interrompidos e as amostras conduzidas para análise química. De posse das anotações feitas durante os ensaios e das concentrações de sódio, medidas em um fotômetro de chamas, foram elaboradas as curvas de efluente (eluição). A partir das curvas, os parâmetros de transporte do sódio foram estimados utilizando o software STANMOD (SIMUNEK et al., 1998) na versão 2.0 para Windows. As estimativas consideraram os dados provenientes dos ensaios até a coleta de um volume de efluente equivalente a seis vezes o volume ocupado pelos poros do solo na coluna, sendo os parâmetros obtidos por tentativas, de modo a atingir um maior coeficiente de determinação entre os dados experimentais e os simulados pelo modelo.

Uma vez conhecidos os parâmetros de transporte do sódio em cada um dos materiais de solo estudados, o modelo MIDI foi empregado para simular as concentrações iônicas em diferentes camadas de uma coluna de solo hipotética. Nesta etapa foram consideradas colunas medindo 60 cm de comprimento e subdivididas em camadas de 10 cm. Após a simulação o modelo apresentou como saída, a umidade e a concentração de sódio em cada uma das camadas. Estes resultados, juntamente com os parâmetros de transporte, permitiram avaliar a mobilidade e a distribuição do sódio no solo, auxiliando no entendimento dos resultados observados no ensaio com as colunas de percolação instaladas na casa de vegetação.

#### 2.3 Resultados e Discussão

#### 2.3.1 Construção das curvas de salinização artificial

As curvas que correlacionam a concentração de cloreto sódio (*C*) nas soluções salinas aplicadas aos solos e os correspondentes valores de condutividade elétrica da solução destes solos (*CEes*) foram obtidas por meio da análise de regressão e são apresentadas na forma de diagrama de dispersão (Figura 8). A análise de regressão em estudos envolvendo concentração iônica e condutividade elétrica vem sendo empregada com sucesso por vários pesquisadores, tais como: Silva Júnior et al. (1999), Nunes Filho et al. (2000), Maia et al. (2001) e Medeiros et al. (2009).



Figura 8 - Curvas de salinização artificial, obtidas por análise de regressão, para os solos estudados

Analisando as equações ajustadas às curvas na Figura 8, além da boa correlação entre as grandezas em ambos os solos ( $R^2 = 0.99$ ), observa-se que a taxa de variação da condutividade elétrica da solução do solo em função da concentração de sódio na solução aplicada foi ligeiramente maior no solo argiloso; a diferença entre os dois solos fica mais evidente quando se aplicou soluções mais concentradas.

Estes resultados apontam uma tendência à ocorrência de maior lixiviação de sódio no solo arenoso, refletindo na necessidade de aplicação de maiores quantidades do sal neste tipo de solo, para que sua solução atinja a condutividade

elétrica desejada em um processo de salinização artificial. Tal comportamento pode ser explicado pela maior facilidade de drenagem observada em solos de textura arenosa, o que contribui para a lixiviação de sais.

#### 2.3.2 Salinização dos solos nas colunas de percolação

As equações ajustadas às curvas de salinização artificial foram utilizadas para direcionar o processo de salinização dos solos armazenados nas colunas de percolação. É importante ressaltar que, para se obter um mesmo valor de condutividade elétrica na solução do solo, a concentração do sal foi ligeiramente superior nas soluções aplicadas ao solo arenoso. Na Tabela 4 encontram-se distribuídos, por tratamento, os valores médios de condutividade elétrica medidos na solução dos solos após o procedimento de salinização artificial.

Tratamento	CEes (dS m⁻¹)	Tratamento	CEes (dS m <sup>-1</sup> )
T1	3,36	T7	6,25
T2	3,26	Т8	6,24
Т3	3,18	Т9	6,21
T4	3,26	T10	5,82
T5	3,21	T11	6,09
Т6	3,02	T12	6,18
CV(%)	2,34	CV(%)	1,93

Tabela 4 - Valores de condutividade elétrica no extrato de saturação (CEes) após salinização artificial

De acordo com a Tabela 4, os valores de condutividade elétrica obtidos na solução do solo, após a aplicação da solução salina, afastaram-se pouco da média desejada. A relação linear e a boa correlação entre a concentração de sódio na solução aplicada e a condutividade elétrica na solução do solo fizeram com que os tratamentos associados à mesma condutividade elétrica inicial apresentassem pouca variação.

#### 2.3.3 Monitoramento da umidade e da salinidade do solo

Anteriormente à aplicação das lâminas de lixiviação, a sonda de capacitância foi calibrada e as equações obtidas foram inseridas em seu *datalogger* para obtenção de leituras mais confiáveis durante a extração da solução do solo. As leituras de frequência normalizada, obtidas nos pontos amostrais em cada tipo de

solo, são apresentadas na Tabela 5, associadas aos respectivos valores de umidade determinados pelo método gravimétrico. Durante o procedimento foram observados níveis de umidade variando de 0,05 a aproximadamente 0,30 cm<sup>3</sup> de água por cm<sup>3</sup> de solo, em ambos os solos.

Ponto	Solo	Solo Arenoso		Solo Argiloso		Solo Arenoso		Solo Argiloso	
Fonto	θ	SF	θ	SF	Fonto	θ	SF	θ	SF
1	11,43	0,65898	5,79	0,49903	10	29,23	0,95765	14,66	0,76688
2	12,65	0,72257	16,00	0,76688	11	23,23	0,84052	9,11	0,56159
3	11,95	0,65898	20,47	0,82594	12	5,17	0,58141	11,12	0,60123
4	27,69	0,96913	33,68	0,98818	13	17,77	0,77719	7,05	0,61340
5	30,26	0,99133	33,10	0,95758	14	22,01	0,90902	12,39	0,63654
6	24,23	0,89609	29,64	0,91372	15	25,78	0,96913	27,61	0,85274
7	20,77	0,80999	34,16	0,97818	16	18,16	0,81173	23,66	0,88301
8	8,76	0,63504	25,67	0,86557	17	16,69	0,76045	17,55	0,80785
9	13,65	0,70252	11,96	0,69794	18	6,57	0,64096	27,94	0,93688

Tabela 5 - Valores de umidade do solo e respectivas leituras de frequência, utilizadas para calibração da sonda Diviner: θ = umidade volumétrica (%) e SF = frequência normalizada

As leituras com a sonda, assim como as amostragens para a determinação da umidade gravimétrica, foram realizadas em diferentes profundidades no perfil do solo; no entanto, optou-se pelo ajuste de apenas uma curva de calibração para cada tipo de solo (Figuras 9a e 9b). Este procedimento foi adotado, pois, oriundos de uma camada pouco profunda no campo, cada solo foi peneirado e acomodado nas colunas de forma que constituiu uma única fase. Também é importante ressaltar que, antes da calibração da sonda, foi feita a normalização do sensor, obtendo-se as leituras 164.216 e 121.427 com o sensor em contato com o ar e com a água, respectivamente.



Figura 9 - Curva de calibração e equação ajustada para o solo arenoso (a) e para o solo argiloso (b)

As equações foram ajustadas por análise de regressão a partir dos dados apresentados na Tabela 5 e, de acordo com os resultados, embora a calibração tenha sido realizada em condições de solo confinado, os valores de frequência lidos com a sonda tiveram boa correlação com a umidade determinada pelo método considerado padrão, tanto no solo arenoso ( $R^2$ = 0,92) quanto no argiloso ( $R^2$ = 0,94).

Com a calibração, obtiveram-se os valores 0,3065 e 0,3353 para os coeficientes A e B da equação ajustada, para o solo arenoso, e os valores 0,2747 e 0,3571 para esses mesmos parâmetros em solo argiloso. ANDRADE JUNIOR et al., (2007) encontraram valores que diferem dos obtidos nesta pesquisa; provavelmente, por terem trabalhado com solos diferentes dos utilizados nesse experimento. Entretanto, qualquer que tenha sido a causa, apenas reforça a necessidade de calibração da sonda nas mesmas condições em que se deseja avaliar o conteúdo de água no solo.

O monitoramento da salinidade foi realizado por meio de leituras de condutividade elétrica e de concentração de sódio na solução do solo. Estas variáveis determinadas a partir da solução coletada com o uso de extratores foram corrigidas em função dos valores de umidade lidos com a sonda no momento da extração. As médias relativas a cada tratamento da etapa de lixiviação são apresentadas nas Tabelas 6 e 7, identificando os tratamentos e as camadas de solo. Uma média englobando todas as camadas (0-60 cm) também foi obtida, para que se possa ter uma ideia do efeito das lâminas no perfil como um todo.

Sala	Salinidade	Lâmina	Tratamento —	Profundidade (cm)			
3010	(dS m⁻¹)	(vol. poros)		0-20	20-40	40-60	0-60
	C3	L1	T1	1,29	2,55	3,19	2,34
Arenoso	C3	L2	T2	1,27	2,08	2,92	2,09
	C3	L3	Т3	0,62	1,97	3,28	1,96
	C3	L1	T4	1,35	3,19	4,30	2,95
Argiloso	C3	L2	T5	1,10	2,33	2,86	2,09
	C3	L3	T6	1,43	1,70	2,98	2,04
	C6	L1	T7	2,73	3,80	5,19	3,91
Arenoso	C6	L2	T8	2,48	4,32	6,39	4,40
	C6	L3	Т9	2,44	2,86	3,45	2,92
Argiloso	C6	L1	T10	1,74	3,12	3,75	2,87
	C6	L2	T11	2,28	3,67	5,39	3,78
	C6	L3	T12	2,57	2,88	3,33	2,93

Tabela 6 - Valores médios de condutividade elétrica (dS m<sup>-1</sup>), obtidos na solução do solo após a aplicação das lâminas de lixiviação

Na Tabela 6, pode-se observar que a aplicação das lâminas levou, em geral, ao decréscimo dos valores de condutividade elétrica; a magnitude do efeito de cada lâmina variou conforme o solo e a condutividade inicialmente presente. Analisando dos tratamentos individualmente, nota-se que o efeito das lâminas foi mais pronunciado na camada 0-20 cm. As camadas subjacentes tiveram mudanças moderadas, quando comparadas à camada superficial, e em alguns tratamentos as alterações foram no sentido de elevação da condutividade (T1 e T4). Além desta constatação, o que une estes tratamentos é o fato de terem recebidos a mesma quantidade de água; indicando que a lâmina aplicada (L1) foi inferior à necessária para lixiviação do sódio em todo o perfil, resultando em acúmulo nas camadas subjacentes.

Considerando o perfil como um todo (0-60 cm), merecem atenção os resultados obtidos nos tratamentos T10 e T12. Embora submetidos a lâminas diferentes (L1 e L3, respectivamente), as respostas obtidas foram muito semelhantes em termos de valores de condutividade elétrica. Provavelmente isto se deveu ao baixo fluxo proporcionado pela lâmina L1 aplicada ao tratamento T10, não sendo suficiente para expor os íons à ação das cápsulas extratoras. Os resultados das leituras de concentração de sódio observados nos tratamentos T10, T11 e T12 (Tabela 7) corroboram este raciocínio.

Sala	Salinidade	Lâmina	Trotomonto		Profundidade (cm)			
0010	(dS m⁻¹)	(vol. poros)		0-20	20-40	40-60	0-60	
	C3	L1	T1	780	1642	1972	1464	
Arenoso	C3	L2	T2	786	1361	1681	1276	
	C3	L3	Т3	372	1226	1967	1188	
	C3	L1	T4	806	1241	1678	1242	
Argiloso	C3	L2	T5	673	1494	1765	1310	
	C3	L3	Т6	873	1082	1865	1273	
	C6	L1	Τ7	1626	3194	3575	2798	
Arenoso	C6	L2	Т8	1397	2817	4026	2746	
	C6	L3	Т9	1387	1811	2137	1779	
Argiloso	C6	L1	T10	1045	1958	2276	1760	
	C6	L2	T11	1294	2309	3378	2327	
	C6	L3	T12	1461	1874	2060	1798	

Tabela 7 - Valores médios de concentração de sódio (mg L<sup>-1</sup>), obtidos na solução do solo após a aplicação das lâminas de lixiviação

Na Tabela 7 observa-se que com a aplicação de lâminas crescentes, houve uma tendência à diminuição da concentração de sódio em solução, observada em ambos os solos; exceção se faz para o solo argiloso, quando se partiu de uma condutividade inicial de 6 dS m<sup>-1</sup> e utilizou-se uma lâmina equivalente a duas vezes o volume de poros do solo. Este resultado sugere que, para lixiviação de sódio em solos argilosos, sejam utilizadas lâminas maiores que 2 vezes o volume de poros, sobre pena de agravar o problema caso sejam adotadas lâminas inferiores. Uma vez aplicadas lâminas insuficientes para lixiviar o sal, o volume de água apenas contribui para solubilizar o sal precipitado aumentando sua concentração na solução do solo. O excesso de sódio em solução afeta o potencial osmótico do solo, além das suas características físicas, com implicações diretas sobre os cultivos.

#### 2.3.4 Análise da lixiviação do sódio e recuperação dos solos

As concentrações do íon sódio observadas nas soluções coletadas pelos extratores instalados no solo das colunas de percolação variaram bastante com os tratamentos, encontrando-se valores de 372 até 4545 mg L<sup>-1</sup>. A partir da análise estatística, utilizando o teste F e respeitando o delineamento experimental de blocos ao acaso, interpretaram-se os efeitos dos três fatores que compunham os tratamentos, sobre a variável concentração de sódio no perfil do solo (Tabela 8). A normalidade dos resíduos foi verificada aplicando-se o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância e, uma vez detectado que os resíduos das médias obtidas considerando o perfil como um todo (0-60 cm) não apresentam distribuição normal, optou-se por analisar a os resultados considerando as camadas de solo individualmente.

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Bloco	2	65464,91	32732,455	1,1317	0,3406
Solo	1	9525,76	9525,760	0,3293	0,5719
Salinidade	1	3840816,04	3840816,040	132,7877	0,0000
Lâmina	2	10475,44	5237,722	0,1811	0,8356
Solo*Salinidade	1	261836,89	261836,890	9,0524	0,0065
Solo*Lâmina	2	503218,05	251609,026	8,6988	0,0016
Salinidade*Lâmina	2	106970,95	53485,473	1,8491	0,1810
Solo*Salinidade*Lâmina	2	151105,82	75552,908	2,6121	0,0960
Resíduo	22	636338,59	28924,481		
Total	33	5585752,45	169265,226		

Tabela 8 - Quadro de análise de variância para os efeitos do solo, condutividade elétrica inicial e lâmina de lixiviação, sobre a concentração de sódio na camada 0-20 cm no perfil do solo

Na Tabela 8 são apresentados os efeitos individuais e de interação observados na camada de 0 a 20 centímetros de profundidade no perfil do solo. Neste caso, os resíduos podem ser considerados normais (p-valor = 0,3470771) e, de acordo com o teste F a 5% de probabilidade, houve efeito simples apenas do fator salinidade inicial na solução do solo; sendo observado efeito das interações solo\*salinidade e solo\*lâmina sobre a lixiviação do sódio no perfil do solo.

Desdobrando a interação solo\*salinidade, foi elaborado um novo quadro de análise de variância, analisando o efeito do solo dentro de cada nível do fator salinidade inicial (Tabela 9). Neste quadro é possível observar que a textura do solo exerceu influência significativa sobre a lixiviação do sódio apenas quando a condutividade elétrica anterior à aplicação das lâminas foi de 6 dS m<sup>-1</sup>. Neste caso, a redução do teor de sódio foi maior no solo argiloso, pois a média da concentração remanescente na sua solução foi 1267 mg L<sup>-1</sup>, enquanto que no solo arenoso a média foi de 1470 mg L<sup>-1</sup>.

Tabela 9 - Análise de variância para o desdobramento da interação solo\*salinidade, considerando o fator solo dentro de cada nível de salinidade

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Salinidade: solo C3	1	85739,4	85739,40	2,9643	0,0992
Salinidade: solo C6	2	185623,2	185623,24	6,4175	0,0189
Resíduo	22	636338,6	28924,48		

Quando o nível de salinidade inicial foi o C3 (3 dS m<sup>-1</sup>), as médias obtidas na solução do solo foram consideradas estatisticamente iguais (646 e 784 mg L<sup>-1</sup>, no solo arenoso e argiloso, respectivamente). Já no desdobramento da salinidade dentro de cada nível de solo (Tabela 10), as médias de concentração de sódio na solução do solo foram diferentes para ambos os níveis de salinidade, independentemente da textura do solo. De acordo com o teste de Tukey, as menores concentrações de sódio foram obtidas quando o nível de salinidade inicial foi o C3.

Tabela 10 - Análise de variância para o desdobramento da interação solo\*salinidade, considerando o fator salinidade dentro de cada nível de solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Solo: salinidade AG	1	1048496,8	1048496,81	36,2495	0
Solo: salinidade AR	2	3054156,1	3054156,12	105,5907	0
Resíduo	22	636338,6	28924,48		

Também foi observada interação significativa solo\*lâmina e, o desdobramento desta resultou no quadro de análise de variância apresentado na Tabela 11. Analisando os resultados pode-se afirmar que a lâmina L2 aplicada ao solo, comportou-se de maneira inesperada: mesmo sendo numericamente maior que a lâmina L1, a lâmina L2 foi a única que não apresentou efeito significativo sobre a redução da concentração de sódio na solução do solo.

As lâminas L1 e L3 promoveram respostas diferenciadas conforme a textura do solo, com efeitos mais pronunciados no solo de textura argilosa. A lâmina L1 produziu concentrações médias iguais a 926 e 1203 mg L<sup>-1</sup>, em solo argiloso e solo arenoso, respectivamente; a lâmina L3 reduziu um pouco mais a salinidade do solo, alcançando média de 879 mg L<sup>-1</sup>, no solo arenoso, e 1167 mg L<sup>-1</sup> no solo argiloso.

Tabela 11 - Quadro de análise de variância para o desdobramento da interação solo\*lâmina, considerando solo dentro de cada nível de lâmina

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Lâmina : Solo L1	1	230131,60	230131,60	7,9563	0,01
Lâmina : Solo L2	1	34959,61	34959,61	1,2087	0,2835
Lâmina : Solo L3	1	247652,60	247652,60	8,562	0,0078
Resíduo	22	636338,59	28924,48		

Ao desdobrar-se do fator lâmina dentro de cada nível de solo (Tabela 12), observou-se efeito significativo destas apenas quando aplicada ao solo arenoso. Neste caso, as médias obtidas foram inversamente proporcionais às lâminas de lixiviação aplicadas (L3 = 879, L2 = 1091, e L1 = 1203 mg L<sup>-1</sup>). Em solo argiloso, as médias foram consideradas iguais, permanecendo próximas a 1000 mg L<sup>-1</sup>.

Tabela 12 - Quadro de análise de variância para o desdobramento da interação solo\*lâmina, analisando o efeito das lâminas dentro de cada nível de solo

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Lâmina : Solo AG	2	190060,3	95030,13	3,2855	0,0564
Lâmina : Solo AR	2	323633,2	161816,62	5,5945	0,0109
Resíduo	22	636338,6	28924,48		

Na Tabela 13, por meio da apresentação das médias de concentração de sódio acompanhadas dos resultados obtidos a partir do teste de Tukey, em 5% de probabilidade, é feito um resumo das considerações proferidas anteriormente. Nela é possível visualizar o experimento como um todo, facilitando as conclusões a respeito do efeito individual de cada lâmina.

Colo	Salinidade inicial	Lâmina de lixiviação (volume de poros)				
2010	(dS m <sup>-1</sup> )	L1	L2	L3	Média	
Aronooo	3,0	780 bA	786 bA	372 aA	646 bA	
Arenoso	6,0	1626 bC	1397 aC	1387 aD	1470 aC	
	Média	1203 bB	1091 abB	879 aB		
٨٣٥:١٥٥٥	3,0	806 aA	673 aA	873 bB	784 bA	
Argiloso	6,0	1045 aB	1294 bC	1461 cD	1267 bB	
	Média	926 aA	983 aB	1167 aC		

Tabela 13 - Médias de concentração de sódio (mg L<sup>-1</sup>) obtidas na solução extraída da camada de 0 a 20 cm no perfil do solo, após a aplicação das lâminas de lixiviação

Médias seguidas de mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (α< 5%)

#### 2.3.5 Avaliação do desempenho das equações empíricas

A eficiência das equações para o cálculo da lâmina de lixiviação foi avaliada comparando as estimativas obtidas por meio destas com os resultados observados no experimento com as colunas de solo instaladas na casa de vegetação. Na Figura 10 são apresentados os valores médios de condutividade elétrica, obtidos ao final da do experimento, com a aplicação das lâminas de lixiviação nas colunas preenchidas com o solo arenoso, bem como os valores calculados por meio das equações. As letras posicionadas sobre as colunas, no gráfico, comparam os valores de condutividade estimados às respectivas médias observadas no experimento.



Figura 10 - Condutividade elétrica (dS m<sup>-1</sup>) na solução do solo, obtidos a partir do uso das equações empíricas e da aplicação das lâminas de lixiviação no solo arenoso

De acordo com os resultados na Figura 10, a equação que obteve melhor desempenho foi a proposta por Cordeiro (2001), seguida pelas equações de Jury et al. (1979) e Volobuyev; sendo que os resultados obtidos por meio desta última não apresentaram uma relação de linearidade com a condutividade elétrica inicialmente presente na solução do solo e com a lâmina de lixiviação simulada. O pior desempenho ficou por conta da equação de Hoffman (1980).

De maneira geral, apesar dos baixos níveis de salinidade obtidos com as simulações por parte de algumas equações, pode-se dizer que os resultados foram bastante otimistas, se comparados aos obtidos experimentalmente. Enquanto no experimento as menores concentrações de sódio observadas ficaram em torno de 1200 mg L<sup>-1</sup>, a equação de Hoffman, por exemplo, obteve concentrações até 85% menores, para a aplicação da mesma lâmina testada no experimento (Tabela 14). Consequentemente, os valores de condutividade também foram menores. Na prática, isso significa que o uso dessa equação levaria à obtenção de lâminas aquém daquelas realmente necessárias para lixiviação o sódio.

CEes	Lâmina		Equação					
(inicial)	(vol. poros)	Volobuyev	Jury (1979)	Hoffman (1980)	Cordeiro (2001)	(em colunas)		
	L1	1328 (09+)	1829 (25+)	532 (64 -)	1629 (11+)	1464		
3	L2	919 (28+)	915 (28 -)	266 (79 -)	1381 (08+)	1276		
	L3	635 (47 -)	610 (49 -)	177 (85 -)	1172 (01 -)	1188		
	L1	2656 (05 -)	3658 (31+)	1063 (62 -)	2683 (04 -)	2798		
6	L2	1837 (33 -)	1829 (33 -)	532 (81 -)	1875 (32 -)	2746		
	L3	1271 (29 -)	1219 (31 -)	354 (80 -)	1310 (26 -)	1779		

Tabela 14 - Concentração de sódio (mg L<sup>-1</sup>) na solução do solo, estimada a partir do uso de equações empíricas para simular as respostas da aplicação de lâminas de lixiviação no solo arenoso

Os valores entre parênteses referem-se à diferença percentual entre a concentração de sódio estimada e a concentração observada no experimento em colunas de percolação instaladas na casa de vegetação

Ainda na Tabela 14, nota-se que as estimativas realizadas por meio da equação de Cordeiro (2001) aproximam-se bastante dos valores observados experimentalmente. As diferenças não ultrapassavam em muito os 10 pontos percentuais, com uma tendência à diminuição das diferenças à medida que a lâmina aumenta. Este comportamento é observado tanto para a condutividade inicial de 3 dS m<sup>-1</sup>, quanto para os casos em que se partiu de uma condutividade elétrica maior.

Os resultados obtidos para o solo argiloso são apresentados na Figura 11 e Tabela 15. Nestas condições, novamente, a equação de Jury et al. (1979) apresentou um ótimo resultado, com a aplicação da lâmina equivalente a 1 volume de poros do solo. Na Figura 11, observa-se que o valor simulado para a condutividade elétrica, partindo de uma salinidade de 3 dS m<sup>-1</sup> e aplicando uma lâmina igual a 1 volume de poros, foi 2,93 dS m<sup>-1</sup>; enquanto que o valor observado com a aplicação desta mesma lâmina no solo das colunas foi 2,95 dS m<sup>-1</sup>. No entanto, a partir da lâmina L2, a equação perdeu um pouco sua eficiência e os valores simulados se distanciaram daqueles observados experimentalmente.



Figura 11 - Condutividade elétrica (dS m<sup>-1</sup>) na solução do solo, obtidos a partir do uso das equações empíricas e da aplicação das lâminas de lixiviação no solo argiloso

Considerando as concentrações de sódio apresentadas na Tabela 15, as equações se mostram mais dependentes das condições químicas iniciais no solo argiloso. De acordo com os resultados, a equação de Cordeiro (2001) obteve melhor desempenho nas simulações quando a condutividade elétrica inicial da solução do solo foi de 3 dS m<sup>-1</sup>. Quando as condições iniciais foram mais críticas (CEes = 6 dS m<sup>-1</sup>), a equação de Volobuyev se mostrou mais apropriada, e nas simulações com as lâminas L2 e L3 a equação de Jury et al. (1979) aparece com resultados também promissores. Nestes casos, a opção pela equação de Volobuyev ou a de Jury et al. (1979), parecem escolhas acertadas.

CEes	Lâmina		Equação					
(inicial)	(vol. poros)	Volobuyev	Jury (1979)	Hoffman (1980)	Cordeiro (2001)	(em colunas)		
	L1	1301 (31 -)	1878 (01 -)	419 (78 -)	1558 (18 -)	1242		
3	L2	882 (34 -)	939 (30 -)	210 (84 -)	1264 (05 -)	1310		
	L3	598 (54 -)	626 (52 -)	140 (89 -)	1026 (22 -)	1273		
	L1	2603 (42+)	3755 (105+)	838 (54 -)	2437 (33+)	1760		
6	L2	1764 (27 -)	1878 (22 -)	419 (83 -)	1547 (36 -)	2327		
	L3	1196 (36 -)	1252 (33 -)	279 (85 -)	982 (48 -)	1798		

Tabela 15 - Concentração de sódio (mg L<sup>-1</sup>) na solução do solo, estimada a partir do uso de equações empíricas para simular as respostas da aplicação de lâminas de lixiviação em solo argiloso

Os valores entre parênteses referem-se à diferença percentual entre a concentração de sódio estimada e a concentração observada no experimento em colunas de percolação instaladas na casa de vegetação

Na verdade, considerando os dados de condutividade elétrica e concentração de sódio apresentados neste trabalho, a exceção da equação do Hoffman (1980), qualquer outra entre as discutidas aqui pode ser utilizada para cálculo da lâmina de lixiviação, pois apresentam resultados satisfatórios. Vale ressaltar que os resultados obtidos neste trabalho diferem de alguns apresentados na bibliografia, que são bastante variáveis, o que pode está relacionado com a diversidade de solos e condições em que foram realizados os estudos.

#### 2.3.6 Mobilidade e distribuição do íon sódio no perfil do solo

A mobilidade do íon sódio no solo foi avaliada por meio dos parâmetros de transporte ajustados a partir de dados experimentais, oriundos dos ensaios de deslocamento miscível realizados no laboratório. Os parâmetros relativos aos solos utilizados no preenchimento das colunas foram obtidos a partir das curvas de retenção de água no solo, segundo o modelo de Genuchten (1980), e são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros da curva de retenção de água no solo, segundo o modelo Genuchten (1980)

Solo	θs	θr	α	m	n
	(cm <sup>3</sup>	cm <sup>-3</sup> )	(cm <sup>-1</sup> )	-	-
Arenoso	0,4233	0,0749	0,0348	0,4548	1,8342
Argiloso	0,5602	0,2135	0,0612	0,3649	1,5746

As curvas de distribuição de efluente foram confeccionadas a partir das concentrações de sódio determinadas no lixiviado recolhido durante os ensaios com as colunas de solo, no laboratório. Analisando os resultados, apresentados na Figura 12, observa-se que o valor correspondente à concentração relativa 0,5 foi superior a 1 em ambos os solos, com a curva referente ao solo argiloso deslocada um pouco mais para a direita. De acordo com Biggar e Nielsen (1962), o número de volume de poros correspondente à concentração de relativa de 0,5 é uma primeira indicação, no sentido de existência ou não, de interações soluto-solo. Portanto, os resultados obtidos permitem afirmar que houve maior interação do sódio com o solo argiloso.



Figura 12 - Curvas de efluente elaboradas a partir das concentrações de sódio obtidas no laboratório, com a aplicação de 450 ppm de cloreto de sódio no solo arenoso (a) e no solo argiloso (b)

A magnitude das interações entre o sódio e a fase sólida do solo, durante a percolação da solução, foi quantificada e o resultado apresentado na Tabela 17. Dentre os parâmetros na Tabela, ajustados por meio do software STANMOD, o fator de retardamento (R) representa a defasagem entre a velocidade de avanço do soluto e a velocidade de avanço da frente de molhamento da solução percolante (VALOCCHI, 1984), expressando indiretamente a capacidade do solo em reter íons.

Tabela 17 - Parâmetros de transporte de sódio, obtidos para o solo arenoso e para o solo argiloso: fator de retardamento (R), coeficiente de dispersão (D), número de Peclet (P), velocidade da água nos poros (v), coeficiente de dispersividade em função do número de Peclet (λ)

Parâmetros de transporte de sódio							
Solo	R	D	Р	V	λ(P)		
5010		(cm <sup>2</sup> min <sup>-1</sup> )		(cm min⁻¹)			
Arenoso	1,886	7,336	6,11	12,52	0,586		
Argiloso	3,411	4,081	1,52	6,28	0,649		

Na Tabela 17, observa-se que o retardamento foi, de fato, mais expressivo no solo argiloso; corroborando os resultados obtidos por Méllo et al. (2006), ao aplicar água residuária do processamento de mandioca em colunas de solo. De acordo com a autora, a diferença entre os valores encontrados para o íon sódio nos dois solos evidencia a influência do conteúdo de argila presente sobre a interação deste íon com a matriz do solo.

Os parâmetros de transporte, obtidos para os dois solos, também serviram como variáveis de entrada para a simulação da distribuição do sódio no solo, realizada por meio da aplicação do modelo computacional MIDI. O modelo simulou a aplicação de uma solução de cloreto de sódio (1960 mg L<sup>-1</sup>), a uma taxa de 8 L<sup>-1</sup>, em uma coluna de solo medindo 60 cm de diâmetro e altura, por um período de 6 horas. Como resultados foram obtidos os valores de umidade do solo e concentração de sódio a cada 10 cm de profundidade no perfil do solo. Os resultados gerados a partir do modelo foram comparados com resultados obtidos experimentalmente sob as mesmas condições simuladas (Figuras 13 e 14).

Analisando os resultados de umidade apresentados na Figura 13a, observase que a simulação a partir do modelo subestimou o conteúdo de água no solo arenoso. Nas camadas mais superficiais os valores de umidade simulados, para este solo, apresentaram similaridade com os valores obtidos experimentalmente. Entretanto, ao passo que se aprofundava no perfil do solo as medidas se distanciavam das simulações. Já em condições de solo argiloso, pode-se afirmar que o desempenho do modelo foi bastante satisfatório. Na Figura 13b, é possível notar que os valores simulados para a umidade foram semelhantes aos valores determinados no experimento, desde a superfície do solo até os 50 cm de profundidade.

Cabe salientar que, durante o experimento na casa de vegetação, foi observado o acúmulo de água na base de algumas das colunas. Este excesso, às

vezes, elevava a umidade do solo ao valor de saturação. Assim, a menor correlação entre os valores de umidade obtidos experimentalmente e os valores simulados pelo MIDI, para as camadas mais profundas do solo, pode ser atribuída a esta constatação. E, de uma maneira geral, pode-se afirmar que as simulações dos valores de umidade por meio da utilização do MIDI foram coerentes quando comparados a valores determinados em condições reais; apresentando ainda como vantagem a economia de tempo.



Figura 13 - Representação dos perfis de umidade, obtidos em condições experimentais e por meio de simulações com o modelo MIDI, para o solo arenoso (a) e para o solo argiloso (b)

As concentrações do íon sódio (mg L<sup>-1</sup>) também foram simuladas e obtidas experimentalmente, em diferentes profundidades, para os dois solos. Na Figura 14a, é apresentado o perfil de distribuição do sódio no solo arenoso. No solo arenoso,

semelhante ao ocorrido para as simulações de umidade, observa-se que as concentrações de sódio também ficaram abaixo daquelas observadas experimentalmente. No entanto, a forma do gráfico foi semelhante, refletindo a existência de correlação entre os valores medidos e simulados pelo MIDI.



Figura 14 - Representação dos perfis de concentração de sódio, obtidos em condições experimentais e por meio de simulações com o modelo MIDI, para o solo arenoso (a) e o solo argiloso (b)

Para o solo argiloso, o modelo também subestimou as concentrações de sódio obtidas no experimento (Figura 14b). Na comparação entre os dois solos, as concentrações simuladas foram maiores no solo arenoso; o que faz sentido, se considerado que o sódio é um cátion, e por isso fica retido com mais facilidade no solo com predominância de cargas negativas. No entanto, os resultados experimentais mostraram exatamente o contrário, e esta diferença pode está

associada à umidade e à porosidade de cada solo. A menor umidade observada no solo arenoso, associada à maior quantidade de macroporos, e considerando que o volume de solução aplicado nos dois solos foi o mesmo, significa que também houve maior drenagem no solo arenoso. Assim sendo, parte do sódio aplicado ao solo arenoso pode ter sido lixiviado para fora da coluna.

A explicação para as maiores concentrações de sódio, simuladas pelo MIDI, para o solo argiloso, pode está na teoria por trás do funcionamento do modelo. Mas, especificamente, nos parâmetros de transporte que são variáveis de entrada. Vale lembrar que o fator de retardamento utilizado para as simulações foi cerca de duas vezes maior para o solo argiloso. Isto implica que o modelo considerou que fração do sódio na solução aplicada que ficou retida ao solo, também foi maior no solo argiloso. Neste caso, os resultados da simulação estão em consonância com os parâmetros de transporte.

Com base nos resultados obtidos com o MIDI e nos parâmetros de transporte encontrados para o sódio nos dois solos, pode-se afirmar que o sódio apresentou maior mobilidade no solo arenoso, quando comparado ao argiloso. A isso, pode ser atribuída a pouca eficiência da lâmina de lixiviação L2 aplicada ao solo argiloso, no experimento com as colunas de solo na casa de vegetação. A menor velocidade da água nos poros (6,28 cm min<sup>-1</sup>), associada à maior interação do sódio com a matriz do solo (R = 3,411) favoreceu a sua adsorção pelo solo, resultando em menores concentrações deste íon na solução obtida pelos extratores.

### 3 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos neste estudo, pode-se concluir que:

- a) Os níveis de salinidade dos solos reduziram de maneira de maneira inversamente proporcional com a aplicação das lâminas de lixiviação, havendo efeitos de interação entre as lâminas, o tipo de solo e a salinidade inicialmente presente;
- b) A concentração de sódio e, consequentemente, a condutividade elétrica na solução do solo diminuíram significativamente com a aplicação da lâmina de lixiviação equivalente a três vezes o volume de poros do solo; sendo os melhores resultados observados no solo arenoso;
- c) De maneira geral, as equações testadas foram mais eficientes no solo arenoso e, dentre elas, a proposta de Cordeiro (2001) apresentou respostas mais coerentes com os resultados obtidos experimentalmente;
- d) O uso de equações para determinação da lâmina de lixiviação mostrou-se eficiente; mas, a recomendação do uso de cada uma delas deve considerar as particularidades de cada situação.
- e) O cálculo da lâmina de lixiviação deverá considerar além da composição iônica e concentração inicial dos sais na solução do solo, as propriedades do solo a ser recuperado;
- f) Em função da maior predominância de cargas negativas no solo argiloso, foi observada menor mobilidade do sódio neste tipo de solo, quando comparada ao solo com maior proporção da fração areia;
- g) O uso de modelos para simulação do movimento e distribuição de íons deve ser incentivado tanto para atividade de pesquisa, quanto para fins de resolução de problemas técnicos; sobre o argumento de fornecerem resultados rápidos, possibilitando o teste de cenários com um custo baixo;
- h) O modelo MIDI mostrou-se mais eficiente para simulação da distribuição da umidade no solo argiloso; enquanto que para a simulação da distribuição do íon sódio, os melhores resultados foram obtidos para o solo arenoso.

## REFERÊNCIAS

ALENCAR, R.D.; PORTO FILHO, F.Q.; MEDEIROS, J.F. de; HOLANDA, J.S.; PORTO, V.C.; FERREIRA NETO, N.M. Crescimento de cultivares de melão amarelo irrigadas com água salina. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.221-226, 2003.

ALLISON, L.E. Salinity in relation to irrigation. **Advances in Agronomy**, Newark, v.16, p.139-180, 1964.

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; SILVA. C.R.; ROSSINI, D. Calibração de um sensor capacitivo de umidade em Latossolo Amarelo na microrregião do litoral Piauiense. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.2, n.4, p.303-307, 2007.

AQUINO, A.J.S. **Avaliação do crescimento e de mecanismos de tolerância à salinidade em plantas de sorgo forrageiro irrigadas com águas salinas**. 2005. 89p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

AZEVEDO, A.S.; KANWAR, R.S.; SINGH, P.; PEREIRA, L.S. Movement of  $NO_3^-$  and atrazine through soil columns as affected by lime application. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.39, n.3, p.937-945, 1996.

BAUMHARDT, R.L.; LASCANO, R.J.; EVETT, S.R. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensory capacitance probes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, p.1940-1946, 2000.

BARROS, M. de F.C.; FONTES, M.P.F.; ALVAREZ, V.H.; RUIZ, H.A. Recuperação de solos afetados por sais pela aplicação de gesso de jazida e calcário no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.1, p.59-64, 2004.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8. ed. (atualizada e ampliada). Viçosa: Editora UFV, 2009. 625p.

BIGGAR, J.W.; NIELSEN, D.R. Miscible displacement: II. Behavior of tracers. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.26, n.2, p.125-128, 1962.

BLANCO, F.F. **Tolerância do pepino enxertado à salinidade em ambiente protegido e controle da salinização do solo**. 1999. 104p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultora "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

BORGES JÚNIOR, J.C.F.; ANDRADE, C.L.T. Transporte de solutos no solo. In: ALBUQUERQUE, P.E.P.; DURÃES, F.O.M. (Ed.). **Uso e manejo de irrigação**. Embrapa Informação tecnológica. Brasília, DF, 2008. cap.3, p.151-168.

BORGES JÚNIOR, J.C.F.; FERREIRA, P.A. Equações e programa computacional para cálculo do transporte de solutos no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, p.604-611, 2006.

BOTREL, T.A. **Simulação da distribuição espacial da água em solo irrigado com gotejador**. 1988. 61p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

CONTRERAS, A.M.; ELIZONDO, M.S. **Relaciones agua-suelo-planta-atmosfera**. 2. ed. México: Universidad Autonoma de Chapingo, Departamento de Enseñanza Investigación y Servicio en Irrigación. 1980. 22p.

CORDEIRO, G.G. **Salinidade em agricultura irrigada** (conceitos básicos e práticos). Petrolina, PE: Embrapa Semiárido, 2001. 38p.

CRUCIANI, D.E. A drenagem na agricultura. São Paulo: Nobel, 1986. 337p.

CRUZ, T.M.L.; TEIXEIRA, A.S.; CANAFÍSTULA, F.J.F.; SANTOS, C.C.; OLIVEIRA, A.D.S.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.1, p.33-45, 2010.

DAKER, A. **A água na agricultura**: irrigação e drenagem. 6. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1984. v.3, 543p.

DONEEN, L.D. Water quality for irrigated agriculture. In: POLJAKOFF - MAYBER, A.; GALE, J. (Ed.). **Plants in saline environments**. Berlin: Springer-Verlag, 1975. p.56-64.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. Las necesidades de aguas de los cultivos. Roma: FAO, 1977. 143p. (Estúdios FAO: Riego, Drenaje, 24).

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. (revista e atualizada). Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.

FAO. **Water in agriculture:** opportunity untapped. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2006.

FARES, A.; BUSS, P.; DALTON, M.; EL-KADI, A.I.; PARSONS, L.R. Dual field calibration of capacitance and neutron soil water sensors in a shrinking-swelling clay soil. **Vadose Zone Journal**, Madison, v.4, p.1390-1399, 2004.

FRANKFURT, R. **Simulação de transporte de massa de um soluto em meio poroso com auxílio do CFD (Computer Fluid Dynamics)**. 2008. 169p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

GENUCHTEN, M.T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.3, p.892-898, 1980.

GENUCHTEN, M.T. van.; WIERENGA, P.J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. In: BLACK, C.A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1986. pt.1: Physical and mineralogical methods: p.1025-1054. (American Society of Agronomy, 9).

GHEYI, H.R. Problema de salinidade na agricultura irrigada. In: OLIVEIRA, T.S.; ASSIS, R.N.; ROMERO, R.E.; SILVA, J.R.C. (Ed.). **Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido**. Fortaleza: DCS/UFC, 2000, p.329-346.

GROVES S.J.L.; ROSE S.C.L. Calibration equations for Diviner 2000 capacitance measurements of volumetric soil water content of six soils. **Soil Use and Management**, Oxford, v.20, n.1, p.96-97, 2004.

HEBRON, D. **Os problemas de salinização na irrigação**. Recife: SUDENE (Divisão de Documentação), 1967. 17p.

HOFFMAN, G.J. Alleviating salinity stress. In: ARKIN, G.F.; TAYLOR, H.M. (Ed.). **Modifying the Root Environment to Reduce Crop Stress**. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers. 1981. chap.9, p.305-343.

HOFFMAN, G.J.; RHOADES, J.D.; LETEY, J.; SHENG, F. Salinity management. In: HOFFMAN, G.J.; HOWELL, T.A.; SOLOMON, K.H. (Ed.) **Management of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, Pamela De-Vore-Hansen. 1982. chap.18, p.667-715.

HOLANDA, J.S.; AMORIM, J.R.A. Qualidade da água para irrigação, In: GHEYI, H.R.; QUEIROZ, J.E.; MEDEIROS, J.F. (Ed.). Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada. Campina Grande: UFPB, 1997. p.137-169.

JENSEN, M.E.; RANGELEY, W.R.; DIELEMAN, P.J. Irrigation trends in world agriculture. In:\_\_\_\_\_ Irrigation of agricultural Crops. Madison, Wisconsin: American Society, of Agronomy, 1990. p.31-67.

JURY, W.A.; JARRELL, W.M.; DEVITT, D. Reclamation of saline-sodic soils by leaching. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.43, p.1100-1106, 1979.

LELIS NETO, J.A. **Monitoramento de componentes químicos da vinhaça aplicados em diferentes tipos de solo**. 2008. 89p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

LIMA, V.L.A. Efeitos da qualidade da água de irrigação e da fração de lixiviação sobre a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*) em condições de lisímetro de drenagem. 1998. 87p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

MAAS, E.V. Crop salt tolerance. In: TANJI, K.K. (ed.) **Agricultural salinity assessment and management manual.** New York: ASCE, 1990. chap.13, p. 262-304.

MEDEIROS, J.F. de. **Manejo da água de irrigação salina em estufa cultivada com pimentão**. 1998. 152p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

MEDEIROS, J.F. de. **Qualidade da água de irrigação e evolução da salinidade nas propriedades assistidas pelo "GAT" nos Estados do RN, PB e CE**. 1992. 173p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Paraiba, Campina Grande,1992.

MEDEIROS, P.R.F. de. Manejo da fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade para a cultura do pepino enxertado. 2007. 83p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

MEDEIROS, P.R.F. de; DUARTE, S.N.; DIAS, C.T.S. Tolerância da cultura do pepino a salinidade em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.4, p.406-410, 2009.

MÉLO, R.F.; FERREIRA, P.A.; MATOS, A.T.; RUIZ, H.A.; OLIVEIRA, L.B. Deslocamento miscível de cátions básicos provenientes da água residuária de mandioca em colunas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.2, p.456-465, 2006.

MIRANDA, J.H. de. **Modelo para simulação da dinâmica de nitrato em colunas verticais de solo não saturado**. 2001. 95p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

MORGAN, K.T.; PARSONS, L.R.; WHEATON, T.A.; PITTS, D.J.; OBREZA, T.A. Field calibration of a capacitance water content probe in fine sand soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p.987-989, 1999.

PADILLA, W.A. Lo que usted saber del suelo su análisis e interpretación para fertirrigación. Quito: Universidad Agraria del Ecuador, 1998. 121p.

PALACIOS, O.V.; ACEVES, E.N. **Instructivo para el muestreo registro de dados e interpretacion de la calidad del agua para riego agrícola**. Chapingo: Colegio de postgraduados, Escuela Nacional de agricultura, 1970. 49p. (Rama de Riego y Drenaje, 15).

PALIWAL, K.V.; GHANDHI, A.P. Effect of salinity, SAR, Ca, Mg, ration in irrigation waterm and soil texture on the predictability of exchangeable sodium percentage. **Soil Science**, Baltimore, v.122, n.2, p.85-90, 1976.

PALTINEANU, I.C.; STARR, J.L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration. **Soil Science Society of America Journa**l, Madison, v.61, p.1576-1585, 1997.

PARKER, J.C.; GENUCHTEN, M.T. van. **Determining transport parameters from laboratory and field tracer experiments.** Virginia: Virginia Agricultural Experiment Station, 1984. 89p.

PETERSEN, F.H. Water testing and interpretation. In: REED, D.W. (Ed.) **Water media, and nutrition for greenhouse crops.** Batavia: Ball, 1996. chap.2, p.31-49.

PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos.** Madrid: Editorial Agrícola Espanõla, 1978. 521p.

PIZARRO, F. **Drenaje agricola y recuperación de suelos salinos**. 2. ed. Madrid: Agricola Espanõla, 1985. 521p.

REICHARDT, K.A. Água em sistemas agrícolas. Editora Manole, 1990, 188p.

RHOADES, J.D. Eletrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.49, p.20151, 1994.

RHOADES, J.D.; LOVEDAY, J. Salinity in irrigated agriculture. In: STEWART, D.R.; NIELSEN, D.R. (Ed.). Irrigation of agricultural crops. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1990. p.1089-1142. (Agronomy, 30).

RHOADES, J.D.; OSTER, J.D. Solute content. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd. ed. Madison: ASA/SSSA, 1986. pt.1, p. 995-1006. (Monograph, 9).

RHOADES, J.D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A.M. **The use of saline waters for crop production**. Rome: FAO, 1992. 133p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 48).

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Department of Agriculture, 1954. 160p. (Agriculture Handbook, 60).

RICHARDS, L.A. **Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sodicos**. 5. ed. Mexico/Buenos Aires: Limusa, 1970. 172p. (Manual de Agricultura, 60).

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. Solo, planta e atmosfera - conceitos, processos e aplicações. Barueri: Editora Manole, 2004. 478p.

SHALHEVET, J.; KAMBUROV, J. Irrigation and salinity: A world-wide survey. New Delhi: Caxton Press, 1976. 106p.

SENTEK SENSOR TECHNOLOGIES. **Diviner 2000 User Guide**, Version 1.4, Sentek Pty Ltd, 2007. 86p.

SILVA, E.F.F. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo. 2002. 136 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002. SILVA JÚNIOR, L.G.A.; GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F. de. Composição química de águas do cristalino do Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** Campina Grande, v.3, n.1, p.11-17, 1999.

SILVA, M.O.; FREIRE, M.B.G.S.; MENDES, A.M.S.; FREIRE, F.J.; SOUSA, C.E.S.; GÓES, G.B. Crescimento de meloeiro e acúmulo de nutrientes na planta sob irrigação com águas salinas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, 2008, v.12, n.6, p. 593-605, 2008.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; GENUCHTEN, M.T. van. **The HIDRUS 1-D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media**. Riverside: U.S. Salinity Laboratory: Agricultural Research Service: U.S. Department of Agriculture, 1998.

TESTER, M.; DAVENPORT, R. Na<sup>+</sup> tolerance and Na<sup>+</sup> transport in higher plants. **Annals of Botany**, Oxford, v.91, p.503-527, 2003.

WAGENET, R.J.; CAMPBELL, W.F.; BAMATRAFF, A.M.; TURNER, D.L. Salinity, irrigation frequency, and fertilization effect on barley growth. **Agronomy Journal**, Madison, v.72, p.969-974, 1980.

WILCOX, L.V.; BLAIR, G.Y.; BOWER, C.A. Effect of bicarbonate on suitability of water for irrigation. **Soil Science**, Philadelphia, v.77, p.259-266, 1954.

VAN HOORN, J.W.; VAN ALPHEN, J.G. Salinity control. In: RITZEMA, H.P (Ed.). **Drainage principles and applications**. 2. ed. Wageningen, ILRI, 1994. chap. 15, p.533-600. (ILRI Publication, 16).

VAN HOORN, J.W. Salt movement, leaching efficiency, and leaching requirement. **Agricultural Water Management**, Wageningen, v.4, n.4, p.409-428, 1981.