

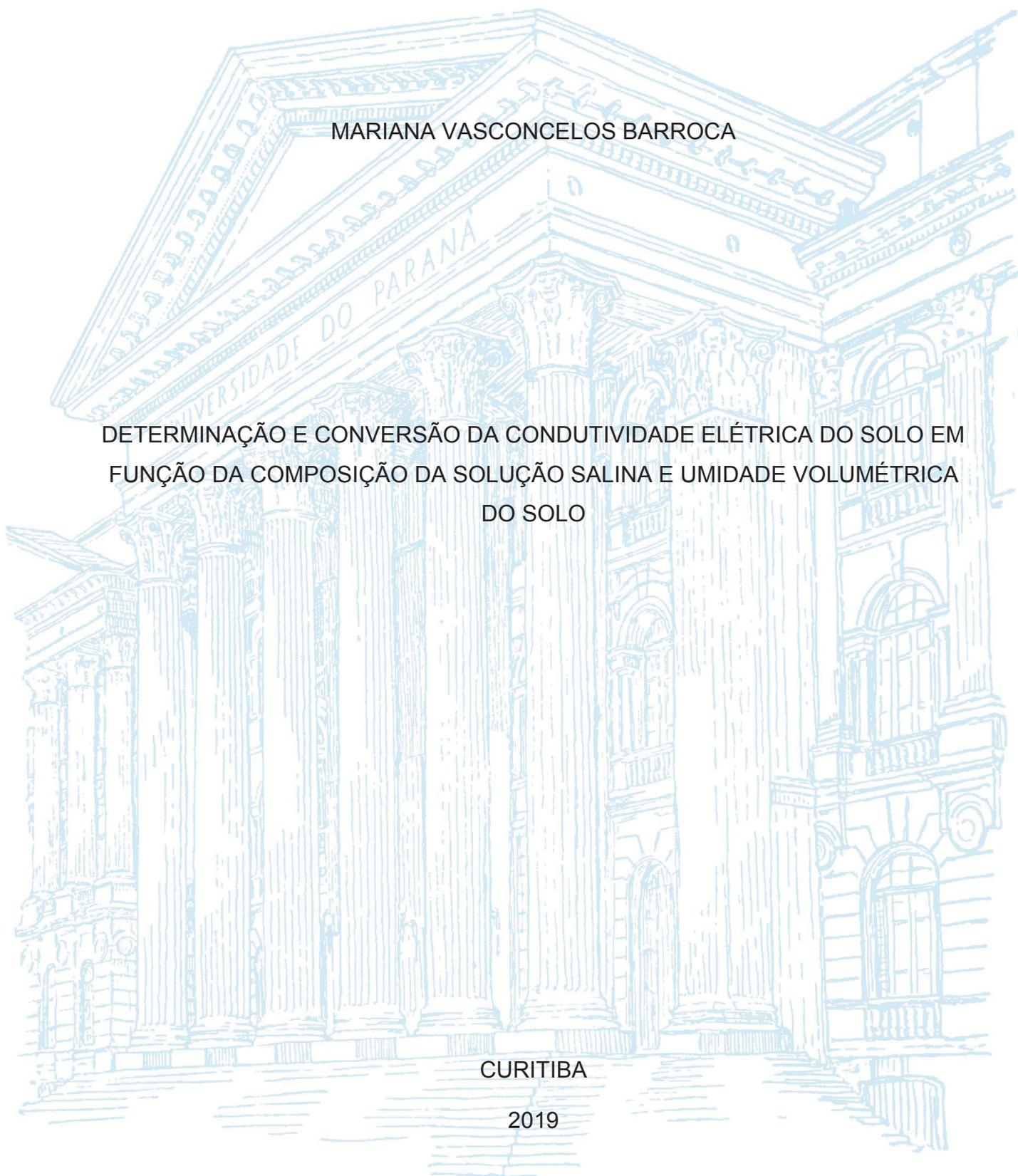
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIANA VASCONCELOS BARROCA

DETERMINAÇÃO E CONVERSÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO EM  
FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO DA SOLUÇÃO SALINA E UMIDADE VOLUMÉTRICA  
DO SOLO

CURITIBA

2019



MARIANA VASCONCELOS BARROCA

DETERMINAÇÃO E CONVERSÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO EM  
FUNÇÃO DA COMPOSIÇÃO DA SOLUÇÃO SALINA E UMIDADE VOLUMÉTRICA  
DO SOLO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

Coorientadora: Dra. Daniela Jerszurki

Coorientador: Prof. Dr. Naftali Lazarovitch

CURITIBA

2019

B277d

Barroca, Mariana Vasconcelos

Determinação e conversão da condutividade elétrica do solo em função da composição da solução salina e umidade volumétrica do solo / Mariana Vasconcelos Barroca. - Curitiba, 2019.

74 p.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Orientador: Jorge Luiz Moretti de Souza

Coorientadora: Daniela Jerszurki

Coorientador: Naftali Lazarovitch

1. Condutividade elétrica. 2. Solos - Salinidade. 3. Solução do solo. 4. Clima desértico. I. Souza, Jorge Luiz Moretti de. II. Jerszurki, Daniela. III. Lazarovitch, Naftali. IV. Título. V. Universidade Federal do Paraná.

CDU 631.437:537.31



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR SETOR DE CIÊNCIAS AGRARIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO CIÊNCIAS DO SOLO -  
40001016014P4

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em CIÊNCIAS DO SOLO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **MARIANA VASCONCELOS BARROCA** intitulada: **Determinação e conversão da condutividade elétrica do solo em função da composição da solução salina e umidade do solo**, após terem inquirido a autora e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

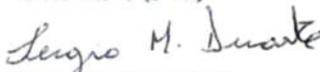
Curitiba, 25 de Janeiro de 2019.

  
JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

  
ANTONIO CARLOS VARGAS MOTTA

Avaliador Interno (UFPR)

  
Sergio M. Duarte

SERGIO NASCIMENTO DUARTE

Avaliador Externo (ESALO)



DANIELA JERSZURKI

Avaliador Externo (SCIROOT)

A Deus, que criou uma obra tão perfeita e  
complexa que intriga gerações de todas  
as nações à estudá-la.

## **AGRADECIMENTOS**

- A Deus, por me fortalecer em minhas fraquezas e me fazer galgar patamares nunca imaginados;
- Aos meus pais, Carlos Eduardo e Conceição, pelo apoio e confiança que em mim depositaram;
- Ao meu orientador Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza, por todo o apoio, orientações, confiança, disponibilidade e diligência na execução deste trabalho;
- À amiga e co-orientadora Dr. Daniela Jerszurki, que me auxiliou em toda condução do experimento assim como nas correções;
- Ao professor Dr. Naftali Lavarovitch e à instituição Ben Gurion University of the Negev, pela diligente orientação, suporte técnico, espaço e equipamentos cedidos para realização deste trabalho;
- Aos técnicos Liron Summerfield e Yuval Shani pela participação efetiva na condução deste experimento;
- À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo (PPGCS), em especial a secretaria Denise de Conti e ao professor Volnei Pauletti, pelo suporte técnico e apoio em toda tramitação do processo do estágio no exterior;
- Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro;
- A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

## RESUMO

A estimativa da condutividade elétrica ( $CE$ ) é essencial para o manejo e avaliação da salinidade do solo. Porém, em cada método de medição são obtidos valores diferentes de condutividade elétrica do solo, que dificultam a interpretação e comparação dos métodos, uma vez que vários fatores podem afetá-los. Teve-se por objetivo no presente trabalho avaliar o efeito da umidade volumétrica do solo, composição iônica e concentração salina da solução do solo nas leituras de condutividade elétrica realizadas com os métodos comumente utilizados, bem como avaliar equações de conversão da condutividade elétrica do solo. O presente trabalho encontra-se estruturado em dois Capítulos: *i*) Métodos de determinação da condutividade elétrica do solo em função da umidade volumétrica e íons da solução; e, *ii*) Calibração e validação de equações para conversão e estimativa da condutividade elétrica do solo. O trabalho foi conduzido no laboratório da *Ben Gurion University of the Negev*, em Sde Boqer (30,87° N, 34,79° L), e a campo, no centro de pesquisa e desenvolvimento do *Ramat Negev* (30,96° N, 34,69° L), ambos localizados na região sul de Israel. No experimento conduzido em laboratório foram utilizadas três técnicas de medição da  $CE$ : sensor capacitivo GS3 (SGS3), extração da solução do solo por cápsulas porosas (ESCP) e extração por relação solo-água na taxa 1:1 (ERSA-1:1); em solo arenoso submetido a crescentes umidades volumétricas do solo ( $\theta$ : 0,11; 0,16; 0,24 e 0,32 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>); crescentes  $CE$ 's da solução aplicada ( $CE_{so}$ : 0,31; 2,5; 4,35 e 8,7 dS m<sup>-1</sup>); e, diferentes composições salinas (KCl, CaCl<sub>2</sub>, NaCl e NPK 20:20:20). No experimento a campo, o solo, em estufa, foi cultivado com tomate cereja e fertirrigado com duas soluções (0,31 e 4,35 dS m<sup>-1</sup>). As baixas umidades do solo dificultaram as medidas de  $CE$ , sendo a condutividade elétrica aparente ( $CE_a$ ) medida pelo sensor, a mais dependente da umidade. A solução com fertilizante NPK subestimou a condutividade elétrica do solo com todos os métodos testados e o sal NaCl superestimou as condutividades elétricas aparente ( $CE_a$ ) e da solução dos poros do solo ( $CE_p$ ). Em todos os tratamentos, a maior dispersão das leituras de  $CE$  foi observada com o método ERSA-1:1. Os modelos de conversão estimam a  $CE_p$  com maior precisão nas condições de solo saturado ou próximo a saturação. Quando os modelos de conversão da  $CE$  foram testados, a calibração dos parâmetros com os modelos de Hilhorst e Straten proporcionaram as melhores estimativas de  $CE_p$  em laboratório, porém os parâmetros foram sensíveis às diferentes umidades do solo e íons em solução, por isso devem ser calibrados em condições semelhantes à de campo. O modelo de Hillhorst apresentou o menor erro na estimativa da  $CE_p$  a campo, porém apresentou limitação quando a  $CE_p$  foi superior a 10 dS m<sup>-1</sup>.

Palavras chave: Condutividade elétrica. Sensor capacitivo. Salinidade. Solução do solo. Clima árido. Conversão de salinidade.

## ABSTRACT

The assessment of the electrical conductivity ( $EC$ ) is essential for soil salinity management and monitoring. However, in each method is obtained different  $EC$  values and many environment variables can influence the  $EC$  differently in each method, which hampers its interpretation and the association between methodologies. Thus, the aim of this work is to evaluate the effects of soil volumetric water content, soil solution composition and concentration on the soil  $EC$  measured with the most used techniques, as well as evaluate the equations to convert the soil electrical conductivities under the conditions studied. The manuscript is structured in two Chapters: *i*) Methods for assess soil electrical conductivity as a function of water content and salt composition on soil solution; and *ii*) Calibration and estimation of soil electrical conductivity equations. The experiment was carried out in the laboratory at the *Ben Gurion University of the Negev*, Sde Boqer (30.87° N, 34.79° E), and on field at the *Ramat Negev Research and Development Center* (30.96° N, 34.69° E), both on Southern Israel, in arid climate. In the experiment conducted in the laboratory three methods were used to measure the soil  $EC$ : GS3 capacitance probe (SGS3), soil solution extraction by ceramic cups (ESCP) and extraction by soil to water ratio 1:1 (ERSA-1:1); on sandy soil under four increasing soil volumetric water content ( $\theta$ : 0.11, 0.16, 0.24 and 0.32 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>); four solutions with increasing electrical conductivity ( $EC_w$ : 0.31, 2.5, 4.35 and 8.7 dS m<sup>-1</sup>); and four saline solution with different ion composition (KCl, CaCl<sub>2</sub>, NaCl and NPK 20:20:20). On the experiment carried out on field, the soil was cultivated with cherry tomatoes under two greenhouses, and the treatment consisted in fertigation with two saline solutions (0.31 and 4.35 dS m<sup>-1</sup>). The low water content on soil hampered  $EC$  measurements, and the bulk electrical conductivity ( $EC_b$ ) measured by GS3 sensor, was the most influenced by volume water content. The solution with NPK fertilizer underestimates the soil electrical conductivity with all methods tested and the NaCl salt overestimates the  $EC_b$  and the soil pore water  $EC$  ( $EC_p$ ). The greater scatter on  $EC$  readings was observed with the ERSA-1:1 method. The conversion models estimate  $EC_p$  with higher accuracy in saturated or near saturation soil conditions. The calibration of the Hilhorst and Straten models provided the best estimates of  $EC_p$  in laboratory. The calibration parameters from the  $EC$  equations were sensitive to the different water content on soil and ions on solution, thus they must be calibrated under conditions very similar to the field. The Hillhorst model presented the smallest error in the estimation of  $EC_p$  on field, although the model underestimated  $EC_p$  when it is higher than 10 dS m<sup>-1</sup>.

Key-Words: Electrical conductivity. Capacitive sensor. Salinity. Soil pore water. Arid climate. Salinity estimation.

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$A\%$  – Teor de argila em porcentagem;

$CE_a$  – Condutividade elétrica aparente, ou da massa do solo;

$CE_p$  – Condutividade elétrica da solução dos poros do solo;

$CE_s$  – Condutividade elétrica da superfície sólida do solo;

$CE_{saturado}$  – Condutividade elétrica da extração por pasta saturada;

$CE_{so}$  – Condutividade elétrica da solução aplicada no solo;

$CE_{ws}$  – Condutividade elétrica da solução do solo contida nos microporos;

$CE_{wc}$  – Condutividade elétrica da solução dos macroporos;

$CE_{1:1}$  – Condutividade elétrica do extrato aquoso por relação solo-água na taxa 1:1;

ESCP – Extração da solução do solo por cápsulas porosas;

ERSA-1:1 – Extração da solução do solo por relação solo-água na relação 1:1;

$Ka$  – Constante dielétrica;

$MR$  – Razão da média;

$RMSE$  – Raiz quadrada do erro quadrático médio;

SGS3 – Sensor GS3;

$T$  – coeficiente de transmissão;

$T_{solo}$  – Temperatura do solo ( $C^\circ$ );

$\alpha$  - Volume de poros do solo;

$\mathcal{E}_{CE_a=0}$  – Porção da constante dielétrica do solo quando a  $CE_a$  é igual a zero;

$\mathcal{E}_p$  – Fator que corresponde à porção da constante dielétrica da solução dos poros;

$\theta$  – Umidade volumétrica do solo;

$\theta_s$  – Volume de partículas sólidas do solo;

$\theta_{sat.}$  – Umidade volumétrica do solo em condições de saturação;

$\theta_{ws}$  – umidade retida nas partículas do solo ou nos microporos.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>CAPÍTULO I – COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO EM FUNÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA E ÍONS DA SOLUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>RESUMO .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>2.4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
2.4.1	Local de realização do trabalho.....	21
2.4.2	Métodos de medida da salinidade do solo .....	21
2.4.3	Experimento em vasos .....	22
2.4.4	Experimento a campo.....	28
2.4.5	Análise estatística .....	29
<b>2.5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
2.5.1	Efeito da umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) sobre a condutividade elétrica do solo ( $CE_a$ , $CE_p$ e $CE_{1:1}$ ) .....	30
2.5.2	Efeito da composição salina da solução do solo sobre a condutividade elétrica do solo ( $CE_a$ , $CE_p$ e $CE_{1:1}$ ) .....	33
2.5.3	Análise da salinidade a campo .....	35
<b>2.6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>38</b>
<b>2.7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>39</b>
<b>3</b>	<b>CAPÍTULO II – CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE EQUAÇÕES PARA CONVERSÃO E ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO .....</b>	<b>42</b>
<b>3.1</b>	<b>RESUMO .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2</b>	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>43</b>
<b>3.3</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>44</b>
3.3.1	Aspectos básicos e equações de conversão da condutividade elétrica do solo ( $CE_a$ , $CE_p$ e $CE_{1:1}$ ) .....	45
<b>3.4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>50</b>
3.4.1	Local, solo e equipamentos.....	50
3.4.2	Experimento em vasos .....	51
3.4.3	Calibração da umidade com sensor submetido à crescentes condutividades elétrica da solução .....	53

3.4.4	Validação das equações de $CE$ a campo .....	54
3.4.5	Estimativa da $CE_p$ .....	54
3.4.6	Análise estatística .....	56
<b>3.5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>57</b>
3.5.1	Calibração da estimativa de umidade com sensor dielétrico .....	57
3.5.2	Ajuste dos modelos de $CE$ .....	58
3.5.3	Calibração dos parâmetros dos modelos de Hilhorst e Straten .....	61
3.5.4	Ajuste das equações no teste de alta salinidade .....	62
3.5.5	Validação a campo .....	63
<b>3.6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>66</b>
<b>3.7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>66</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO GERAL</b> .....	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS GERAIS</b> .....	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O processo de salinização dos solos vem se tornando um problema global resultando na diminuição ou impedimento da produção agrícola em algumas regiões (ALJOURMANI et al., 2015). A quantificação e o monitoramento da salinidade dos solos tem sido facilitada com a medição da condutividade elétrica, parâmetro de fácil medida (MARIAPPAN et al., 2014). Muitos métodos são utilizados para medir este parâmetro no solo, porém as *CE*'s resultantes em cada metodologia são de difícil interpretação e sua interconversão ainda não foi totalmente elucidada.

A salinidade se torna um problema quando a concentração de sais solúveis na zona radicular é elevada o suficiente para impedir o ótimo crescimento ou desenvolvimento das plantas (HANSON et al., 2006). Águas pluviais, intemperização, presença de fósseis marinhos e de outros corpos de água estão entre as principais fontes de sais acumulados no solo. Problemas com salinidade do solo são geralmente mais pronunciados em regiões áridas e semiáridas, onde a alta demanda evaporativa proporciona o acúmulo de sais na superfície e a baixa precipitação anual é insuficiente para lixiviar os íons do solo (BRESLER et al., 1982). A situação é ainda mais preocupante quando tais áreas são submetidas à prática de irrigação. Nestes casos, a umidade do solo proveniente da água de irrigação contribui para o processo de intemperização e a água subterrânea é evaporada deixando sais acumulados na superfície do solo (RHOADES et al., 1999). De modo geral, irrigações com água de baixa qualidade e uso excessivo de fertilizantes, combinado a aplicações frequentes de fertirrigação em cultivos protegidos, têm contribuído com o processo de salinização dos solos (SHRIVASTAVA; KUMAR, 2015).

Em condições ideais, a concentração dos íons presentes na solução do solo deveria ser medida individualmente a campo, mas ainda não é possível realizar essa medição de forma prática (RHOADES et al., 1999). Contudo, é possível determinar *in situ* a condutividade elétrica dos sais totais com o uso de equipamentos eletromagnéticos e extratores de solução do solo. Como a condutividade elétrica (*CE*) é uma medida simples, prática e está diretamente relacionada com a concentração total de íons na solução, seu valor tem sido largamente utilizado no monitoramento da salinidade do solo (RHOADES et al., 1999; MARIAPPAN et al., 2014). A *CE* pode ser medida em laboratório ou diretamente no campo. Em

laboratório, as amostras de solo saturado ou contendo diferentes relações solo-água resultam em valor de condutividade elétrica baixo, devido ao efeito de diluição do solo com água destilada. Nas medições realizadas diretamente no campo, são utilizados sensores eletromagnéticos que medem a salinidade de toda a massa do solo (partículas sólidas, líquido e gás), ou extratores de solução que medem os sais presentes apenas na solução do solo. A escolha do método depende da finalidade, frequência das medições, tamanho da área, precisão desejada, equipamentos e mão de obra disponíveis, e urgência para a obtenção dos resultados (RHOADES et al., 1999).

O grande desafio ao realizar medidas de salinidade do solo consiste em identificar o impacto das variáveis do ambiente sobre a condutividade elétrica do solo, principalmente umidade volumétrica do solo, temperatura e concentração de sais na solução. Como cada metodologia possui um mecanismo de medida diferente, a magnitude da influência das variáveis ambientais pode ser completamente diferente, dificultando ou impossibilitando a comparação entre os métodos. A *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) (RHOADES et al., 1992), utilizando dados de Maas e Hoffman (1977), estabeleceu limites críticos de salinidade do solo para as culturas. Porém, os limites são oferecidos em valores de  $CE_{saturado}$ , medido em laboratório com extrato de solo saturado em água destilada. Sabendo-se que métodos mais práticos são largamente utilizados para medir  $CE$  em campo (SAMSON et al., 2017), vários autores sugeriram equações de conversão da  $CE$  (RHOADES et al., 1976; MUALEM; FRIEDMAN, 1991; HILHORST, 2000; STRATEN et al., 2014; MATTHEES et al., 2017), que variam desde modelos de relação linear simples a modelos mais complexos. No entanto, pouco se sabe sobre o desempenho dos modelos sugeridos em condição de campo, existindo na literatura a falta de padronização dos termos das equações e ampla sugestão de valores para os parâmetros, que gera confusão ao leitor.

Diante da contextualização realizada anteriormente e tomando como método padrão a medida da  $CE$  da solução dos poros do solo, teve-se por objetivo avaliar o efeito da umidade volumétrica do solo, composição iônica e concentração da solução do solo nas leituras de condutividade elétrica realizadas com os métodos

comumente utilizados, e avaliar equações de conversão da condutividade elétrica da solução dos poros do solo nas condições estudadas.

O presente trabalho encontra-se subdividido em dois capítulos, sendo:

Capítulo I – Comparação de métodos de determinação da condutividade elétrica do solo em função da umidade volumétrica e íons da solução;

Capítulo II – Calibração e validação de equações para conversão e estimativa da condutividade elétrica do solo.

## 1.1 REFERÊNCIAS

ALJOURMANI, B.; SÀNCHEZ-ESPIGARES, J. A.; CAÑAMERAS, N.; JOSA, R. An advanced process for evaluating a linear dielectric constant–bulk electrical conductivity model using a capacitance sensor in field conditions. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 10, p. 1828-1839, 2015.

BRESLER, E.; MCNEAL, B. L.; CARTER, D.L. **Saline and Sodic Soils: Principles–Dynamics Modeling**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1982.

HANSON, B.; GRATTAN, S. R.; FULTON, A. **Agricultural salinity and drainage**. University of California Irrigation Program, University of California, Davis. 2006.

HILHORST, M. A. A pore water conductivity sensor. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 1922-1925, 2000.

MAAS, E.V. & HOFFMAN, G.J. Crop salt tolerance - current assessment. **J. Irrig. and Drainage Div.**, ASCE 103 (IR2), p. 115-134, 1977.

MARIAPPAN, V.E.N.; SELVARAJ, T.; VADIVEL, N. Soil Salinity Perspectives, Approaches and Strategies. **J. Adv. Res. Civil Env. Eng.**, v. 1, p. 33- 39, 2014

MATTHEES, HEATHER L. et al. Predicting soil electrical conductivity of the saturation extract from a 1: 1 soil to water ratio. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 18, p. 2148-2154, 2017.

MUALEM, Y.; FRIEDMAN, S. P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resources Research**, v. 27, n. 10, p. 2771-2777, 1991.

RHOADES, J. D.; CHANDUVI, F. **Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements**. Food & Agriculture Org., 1999.

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**, v. 48.

RHOADES, J. D.; RAATS, P. A. C.; PRATHER, R. J. Effects of Liquid-phase Electrical Conductivity, Water Content, and Surface Conductivity on Bulk Soil Electrical Conductivity 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, n. 5, p. 651-655, 1976.

SAMSON, M. E., CARON, J., PEPIN, S., PARYS, B., & FORTIN, J. Precision and accuracy of time-domain reflectometry and capacitive probes to determine soil electrical conductivity in cranberry production. **Canadian journal of soil science**, v. 97, n. 1, p. 31-37, 2017.

SHRIVASTAVA, P.; KUMAR, R. Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. **Saudi journal of biological sciences**, v. 22, n. 2, p. 123-131, 2015.

STRATEN, G. V.; VOS, A.; VLAMING, R.; OOSTERBAAN, R. Dielectric sensors in an automated facility for testing salt tolerance of irrigated field crops. **Paper**. 18th World Congress of CIGR, Beijing. September, 2014.

## 2 CAPÍTULO I – COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO EM FUNÇÃO DA UMIDADE VOLUMÉTRICA E ÍONS DA SOLUÇÃO

### 2.1 RESUMO

A estimativa da condutividade elétrica ( $CE$ ) é essencial para o manejo e avaliação da salinidade do solo. Porém, os valores medidos em cada método a ser utilizado são de difícil interpretação, uma vez que vários fatores podem afetar de forma distinta a estimativa da  $CE$ . Teve-se por objetivo no presente trabalho avaliar o efeito da umidade volumétrica, composição e concentração da solução do solo nas leituras de condutividade elétrica realizadas com os métodos comumente utilizados, assim como identificar a associação entre os mesmos. O trabalho foi conduzido em laboratório na *Ben Gurion University of the Negev*, em Sde Boqer ( $30,87^\circ$  N,  $34,79^\circ$  L), e a campo, no centro de pesquisa e desenvolvimento do *Ramat Negev*, localizado em Ashalim ( $30,96^\circ$  N,  $34,69^\circ$  L), ambos em Israel. Foram utilizadas três técnicas de medição da  $CE$  do solo: sensor capacitivo GS3, extração da solução do solo por cápsulas porosas e extração por relação solo-água na relação 1:1 (ERSA-1:1), obtendo-se a  $CE$  aparente ( $CE_a$ ), da solução dos poros ( $CE_p$ ) e do solo diluído na relação 1:1 ( $CE_{1:1}$ ), respectivamente. Aplicados em solo arenoso, os tratamentos corresponderam à: crescentes umidades volumétricas do solo ( $\theta$ : 0,11; 0,16; 0,24 e 0,32  $m^3 m^{-3}$ ); crescentes  $CE$ 's da solução aplicada ( $CE_{so}$ : 0,31; 2,5; 4,35 e 8,7 dS  $m^{-1}$ ); e diferentes composições da solução salina (KCl,  $CaCl_2$ , NaCl e NPK 20:20:20). As baixas umidades do solo dificultaram as medidas de  $CE$  e influenciaram os métodos de medição de forma distinta, sendo a  $CE$  aparente a mais dependente da umidade. A solução com fertilizante NPK subestimou a condutividade elétrica do solo com todos os métodos testados e o sal NaCl superestimou as condutividades elétricas aparente ( $CE_a$ ) e da solução dos poros ( $CE_p$ ), sendo o efeito dos íons em solução e umidade do solo influenciados pelo nível salino. O método ERSA-1:1 apresentou maior dispersão das leituras de  $CE$ . Os resultados sugerem para solo arenoso, que equações lineares de conversão podem ser utilizadas com relativa simplicidade e segurança para estimar a condutividade elétrica da solução dos poros do solo ( $CE_p$ ), utilizando medidas de condutividade elétrica aparente ( $CE_a$ ).

Palavras-chave: Condutividade elétrica. Sensor capacitivo. Salinidade. Solução do solo. Clima árido.

## 2.2 ABSTRACT

The assessment of electrical conductivity ( $EC$ ) is essential for soil salinity management and monitoring. However, it is difficult to interpret the values expressed in each assessment method since many variables might affect the  $EC$  differently in each method. Thus, the aim of this work is to evaluate the effects of soil volumetric water content, soil solution composition and concentration on the  $EC$  measured with the techniques most applied worldwide and evaluate the relation between them. The experiment was carried out in the laboratory at the Jacob Blaustein Institutes for Desert Research, in the Ben-Gurion University of the Negev, and on field at *Ramat Negev Research and Development Center*, both on South Israel, in arid climate. Three methods were used to measure the soil  $EC$ : GS3 capacitance probe (Decagon devices), soil solution extraction by ceramic cups and extraction by soil to water ratio 1:1, measuring the bulk  $EC$  ( $EC_b$ ), the  $EC$  from the soil pore water ( $EC_p$ ) and the soil diluted  $EC$  ( $EC_{1:1}$ ), respectively. The treatments consisted of: increasing soil volumetric water content ( $\theta$ : 0.11, 0.16, 0.24 and 0.32  $m^3 m^{-3}$ ); increasing electrical conductivity ( $EC_w$ : 0.31, 2.5, 4.35 and 8.7  $dS m^{-1}$ ); and different ion composition (KCl,  $CaCl_2$ , NaCl and NPK 20:20:20), applied on sandy soil. The low water content on soil hampered  $EC$  measurements and influenced each method differently, the bulk electrical conductivity ( $EC_b$ ) was the most dependent of soil water content on soil. The ions composition influenced the  $EC$  readings in all assessed methods. The extraction by soil to water ratio 1:1 resulted in highly scattered values in all treatments, being the effect of humidity and ions composition dependent on salinity level. The results suggest that linear equations may be applied with relative simplicity and security to estimate the soil pore water  $EC$  ( $EC_p$ ) from sensor bulk  $EC$  ( $EC_b$ ) in sandy soil.

Key-words: Electrical conductivity. Capacitance probe. Salinity. Soil solution. Arid climate.

## 2.3 INTRODUÇÃO

O conhecimento da condutividade elétrica ( $CE$ ) é essencial para avaliação e manejo da salinidade dos solos. Nesse sentido, vários métodos foram desenvolvidos e testados ao longo do tempo para quantificar a condutividade elétrica da solução e massa do solo. Entre as metodologias existentes, destacam-se: a medida da  $CE$  da pasta saturada do solo ( $CE_{saturado}$ ); extrato aquoso em diferentes relações solo-água ( $CE_{1:1}$ ,  $CE_{1:2,5}$ ,  $CE_{1:5}$ ); condutividade elétrica da massa do solo ( $CE_a$ ), também chamada de  $CE$  aparente; e,  $CE$  da solução dos poros do solo ( $CE_p$ ). Tais técnicas resultam em medidas de salinidade distintas (HANSON et al., 2006; RHOADES et al., 1999) e vêm sendo amplamente investigadas ao longo do tempo. Entretanto, a influência das propriedades e atributos do solo, como a umidade volumétrica, temperatura e textura sobre cada um dos métodos de medida e/ou estimativa da  $CE$  ainda não foi convenientemente estudada (RHOADES et al., 1999; LIM et al., 2017), gerando inconsistências e dúvidas na interpretação dos resultados.

A  $CE$  da pasta saturada foi uma das primeiras técnicas a serem aplicadas, e tem sido utilizada como referência no Brasil, servindo de calibração para outros métodos (SOUZA et al., 2013). O método se baseia na amostragem deformada do solo e saturação da amostra com água destilada. O ponto de saturação é alcançado quando a superfície da amostra se torna espelhada. Após saturado, o solo é colocado em mesa ou panela de tensão e o extrato de saturação é lentamente extraído por tensão, portanto o método é destrutivo e demorado. Outro aspecto importante é que o ponto de saturação é obtido subjetivamente ao olhar do técnico.

Muitos laboratórios adotam o extrato aquoso em diferentes relações solo-água devido à praticidade e rapidez do método. Diferente da  $CE_{saturado}$ , o extrato aquoso não simula a condição natural do solo (SONMEZ et al., 2008). Por isso, utiliza grande quantidade de água, o que facilita o processo de extração e medida. Além disso, o extrato aquoso pode ser feito com amostras deformadas de solo. Após seco em estufa, adiciona-se a relação desejada de água destilada (1:1; 1:2,5 e 1:5) e, após agitado por algumas horas, a solução do sobrenadante é medida com condutivímetro (RHOADES et al., 1999). Os valores de  $CE_{1:1}$  são menores que os medidos na pasta saturada, e quanto maior a relação solo-água menor será a  $CE$  devido ao efeito de diluição. Trabalhos têm comprovado que as duas técnicas

possuem estreita associação (SONMEZ et al., 2008; BISWAS et al., 2007) e são de fácil conversão.

Resultados de estudos visando compreender os processos de salinidade no solo indicam que a  $CE$  da solução dos poros do solo ( $CE_p$ ) é a que melhor representa o ambiente em que as raízes das plantas se encontram, pois é na fase líquida que as raízes interagem absorvendo e exsudando nutrientes (RHOADES et al., 1989; BISWAS et al., 2007). A  $CE_p$  só pode ser medida por equipamentos que sejam capazes de extrair a solução do solo, não existindo sensor capaz de medi-la *in situ*. Devido à precisão nas leituras de  $CE_p$ , baixo custo para aquisição e simplicidade de fabricação e utilização, a cápsula de cerâmica porosa é o dispositivo mais utilizado para realizar a extração da solução do solo (DIAS et al., 2005; OLIVEIRA et al., 2011; GROBLER et al., 2003). As cápsulas porosas também têm sido utilizadas para monitoramento da concentração de íons do solo e manejo de fertirrigação. Porém, sua utilização necessita de mão de obra e seu uso é limitado em baixa umidade, quando o potencial de água no solo é menor que a pressão de sucção aplicada para extrair a solução.

Os métodos já descritos não são apropriados para mapeamento ou monitoramento constante da salinidade no campo, pois são relativamente demorados e requerem grande número de amostras. Para isso, sensores foram desenvolvidos para estimar de forma rápida e prática a salinidade do solo. Existem dois tipos de sensores capazes de medir a condutividade elétrica: sensores de contato e sem contato (GRISSE et al., 2009). Os sensores sem contato com o solo trabalham com indução eletromagnética a partir da indução de um fluxo de corrente elétrica no solo recebido por um sensor ligado ao equipamento próximo a superfície do solo (ADAMCHUCK et al., 2004). Os sensores de contato, também conhecidos como sensores dielétricos, são os mais utilizados. O sistema consiste em aplicar corrente elétrica alternada em eletrodos enterrados no solo que, posteriormente, medem a resistência da corrente aplicada entre os eletrodos, obtendo-se a  $CE_a$ . Logo, a  $CE_a$  corresponde à condutividade da parte sólida, líquida e gasosa do solo em contato com os eletrodos, sendo derivada da multiplicação do inverso da resistência (condutância) pela constante da célula, que corresponde a razão da distância entre os dois eletrodos externos e a área que os mesmos ocupam (DECAGON DEVICES, 2016).

A medição da  $CE$  nos diferentes métodos pode ter influência de diversos fatores além da concentração de íons no solo. Sabe-se que a cada 1 °C de aumento na temperatura, a  $CE$  é elevada em 2%. Logo, para facilitar a interpretação dos valores de salinidade, os aparelhos são normalmente calibrados para medidas a 25 °C. A porcentagem de argila também pode afetar as medidas de  $CE$ , pois está associada com a capacidade de cátions retidos nos colóides do solo (RHOADES et al., 1999). Oliveira et al. (2011), trabalhando com cápsulas porosas, observaram superestimação da  $CE_p$  em solo arenoso e valores muito próximos ou menores aos da solução aplicada em solo argiloso. Sonmez et al. (2008) verificando que a textura do solo influenciou significativamente as medidas de  $CE_{saturado}$  com o método da pasta saturada e propuseram equações que consideram a granulometria do solo para conversão de  $CE_{1:1}$  para  $CE_{saturado}$ .

Outro aspecto pouco analisado refere-se à condutividade elétrica de cada íon presente na solução do solo. Alguns íons conduzem eletricidade em intensidade diferente de outros. Uma solução de 1000 mg L<sup>-1</sup> de sulfato de cálcio (CaSO<sub>4</sub>), por exemplo, conduz, em média, 1,2 dS m<sup>-1</sup>, enquanto a  $CE$  da solução de cloreto de sódio (NaCl) na mesma concentração é de 2 dS m<sup>-1</sup> (HANSON et al., 2006). Portanto, técnicas de medição da  $CE$  do solo podem gerar super ou subestimação da salinidade dependendo da composição iônica da solução do solo, que dificultará a comparação de valores de  $CE$  medidos em solos de regiões com diferentes composições químicas. Apesar de ser um fato conhecido, ainda não há na literatura estudos que demonstrem o efeito dos íons na interpretação das medidas de condutividade elétrica do solo.

A umidade volumétrica do solo também influencia as medidas de condutividade elétrica do solo, devido ao efeito direto sobre a  $CE_a$  medida com sensores. A condutividade elétrica aparente é uma função entre o teor de água no solo ( $\theta$ ) e a  $CE$  da solução contida nos poros do solo ( $CE_p$ ) (HILHORST, 2000). Vários trabalhos têm identificado a  $\theta$  como o fator mais importante no estudo da  $CE_a$  (BREVICK; FENTON, 2002; ZHANG; WIENHOLD, 2002; FRIEDMAN, 2005; BREVICK et al, 2006). Porém, poucos trabalhos comparam o efeito da umidade volumétrica do solo nas demais classes de  $CE$ 's. Zhang e Wienhold (2002) verificaram que o efeito da umidade foi muito maior nas leituras de  $CE_a$  *in situ* se

comparadas com as  $CE_{1:1}$  medidas em laboratório. No entanto, Lim et al. (2017) não observaram diferença nos valores de  $CE_a$  e  $CE_p$  quando a  $\theta$  variou entre 20% e 60%.

Além da divergência de resultados apresentados na literatura, a influência da umidade volumétrica e composição iônica da solução do solo sobre cada método de medida da salinidade ainda não foi completamente elucidada. Diante do contexto apresentado, teve-se por objetivo no presente trabalho avaliar o efeito da umidade volumétrica, composição e concentração da solução do solo nas leituras de condutividade elétrica realizadas com sensor capacitivo, extração da solução do solo por cápsula porosa e extração por relação solo-água na relação 1:1, assim como determinar a associação entre os métodos.

## **2.4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.4.1 Local de realização do trabalho**

As análises do presente trabalho foram realizadas no laboratório de Ecofisiologia e Solos do *Jacob Blaustein Institute, Ben Gurion University of the Negev*, em Sde Boqer (30,87° N, 34,79° L), e a campo, em casas de vegetação localizadas no *Ramat Negev Research and Development Center*, em Ashalim (30,96° N, 34,69° L); ambos localizados na região sul de Israel (FIGURA 2.1). Segundo a classificação de Köppen e Geiger (1936), a região apresenta clima tipo *BWh*, árido com precipitação anual média menor que 250 mm e temperatura média anual maior que 18 °C.

### **2.4.2 Métodos de medida da salinidade do solo**

O presente trabalho foi realizado considerando os seguintes métodos de medida da salinidade do solo:

- “SGS3”: Sensor dielétrico no domínio da frequência (sensor GS3, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA);
- “ESCP”: Extração da solução do solo por cápsulas porosas;
- “ERSA-1:1”: Extração por relação solo-água na relação 1:1, método adaptado de Rhoades et al. (1999).

Alguns trabalhos utilizam a condutividade elétrica obtida com o método da extração da pasta saturada ( $CE_{saturado}$ ) ou extração por relação solo-água 1:1 ( $CE_{1:1}$ ) como padrão. Porém, o padrão adotado no presente trabalho foi a salinidade do solo medida com o método da capsula porosa (ESCP;  $CE_p$ ), pois é o melhor índice para expressar o meio salino em que as raízes se encontram (RHOADES et al., 1999; BISWAS et al., 2007).

FIGURA 2.1 – LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS EXPERIMENTAIS: (A) CENTRO DE PESQUISA RAMAT NEGEV RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER; E, (B) BEN GURION UNIVERSITY OF THE NEGEV, REGIÃO SUL DE ISRAEL, DESERTO DO NEGEV.



FONTE: A autora (2019)

### 2.4.3 Experimento em vasos

O solo utilizado nas análises foi retirado de duas estufas com produção de tomate cereja (*Solanum lycopersicum*) fertirrigados, localizadas na comunidade de Ashalim, sul de Israel. Após coletado, o solo foi peneirado em malha de 2 mm e verificada a salinidade inicial com o procedimento de extração da solução da amostra por relação solo-água 1:1 ( $CE_{1:1}$ ), obtendo-se valor médio de condutividade elétrica igual a  $1,85 \text{ dS m}^{-1}$ . Para reduzir a salinidade inicial, e não afetar os

tratamentos com soluções salinas, foi realizada a lavagem do solo utilizando água duplamente dessalinizada ( $CE$  0,07 dS  $m^{-1}$ ) e peneira com malha de 106  $\mu m$  de diâmetro. O solo foi lavado até que a solução proveniente da peneira atingisse valor entre 0,1 e 0,4 dS  $m^{-1}$ , faixa mais baixa de valores alcançada após várias lavagens. Posteriormente, o solo foi espalhado em lona plástica para secagem ao ar dentro da estufa. O solo é arenoso, contendo em média 90% de areia (TABELA 2.1), foi colocado na estufa por cima de uma manta plástica para impedir capilaridade de sais provindos de águas subterrânea. Seus atributos físicos e químicos estão dispostos na TABELA 2.1. Foram realizadas as análises: granulométrica com o método da pipeta (TEIXEIRA et al., 2017); massa específica das partículas com auxílio de balão volumétrico de 50 ml e água duplamente destilada (TEIXEIRA et al., 2017); e, salinidade inicial do solo, com o método de extração da solução do solo por relação solo-água 1:1 ( $CE_{1:1}$ ), com 1,5 h de agitação e 2 h de descanso antes que a condutividade elétrica do sobrenadante fosse medida (adaptado de RHOADES et al., 1999). No mesmo extrato 1:1 foi realizada a medição do pH ( $pH_{1:1}$ ) com pHmetro de bancada (TEIXEIRA et al., 2017).

TABELA 2.1. TEXTURA, MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS ( $\rho_p$ ), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO ( $CE_{1:1}$ ), pH EM ÁGUA ( $pH_{1:1}$ ) E CTC (meq 100  $g^{-1}$ ) APÓS PENEIRADO E LAVADO.

-- Areia (g $Kg^{-1}$ ) --		Silte	Argila	$\rho_p$	$CE_{1:1}$	$pH_{1:1}$	CTC	N	C	H
Grossa	Fina	--- (g $Kg^{-1}$ ) ---		( $kg\ m^{-3}$ )	(dS $m^{-1}$ )	$H_2O$	(meq 100 $g^{-1}$ )	----- (g $Kg^{-1}$ ) -----		
480,0	425,0	60,0	35,0	2710	0,27	8,60	2,7	4,1	6,9	0,7

FONTE: A autora (2019)

### a) Primeira Etapa Experimental

Após secagem e homogeneização, o solo foi acondicionado em vasos com 20 cm de diâmetro e 25 cm de altura, e soluções salinas com crescente condutividade elétrica ( $CE_{so}$ : 0,31; 2,5; 4,35 e 8,7 dS  $m^{-1}$ ) foram aplicadas ao solo de forma homogênea. Além disso, cada tratamento salino foi analisado em crescentes umidades volumétricas do solo ( $\theta$ ) até a saturação ( $\theta$ : 0,11; 0,16; 0,24 e 0,32  $m^3\ m^{-3}$ ). As classes de salinidade e umidade volumétricas utilizadas foram selecionadas com o objetivo de simular e extrapolar as condições verificados em campo ( $CE_p < 6,0$  dS  $m^{-1}$ ). As soluções salinas utilizadas foram provenientes da mistura de fertilizantes com NaCl, e foram coletadas nos tanques de fertirrigação da

casa de vegetação, no mesmo local em que o solo foi coletado. Para obter as concentrações salinas de interesse, mantendo-se as propriedades químicas da solução coletada no campo, as amostras da solução foram colocadas em estufa a 65 °C para permitir a evaporação da água e elevação da concentração de sais até alcançar as condutividades elétricas desejadas.

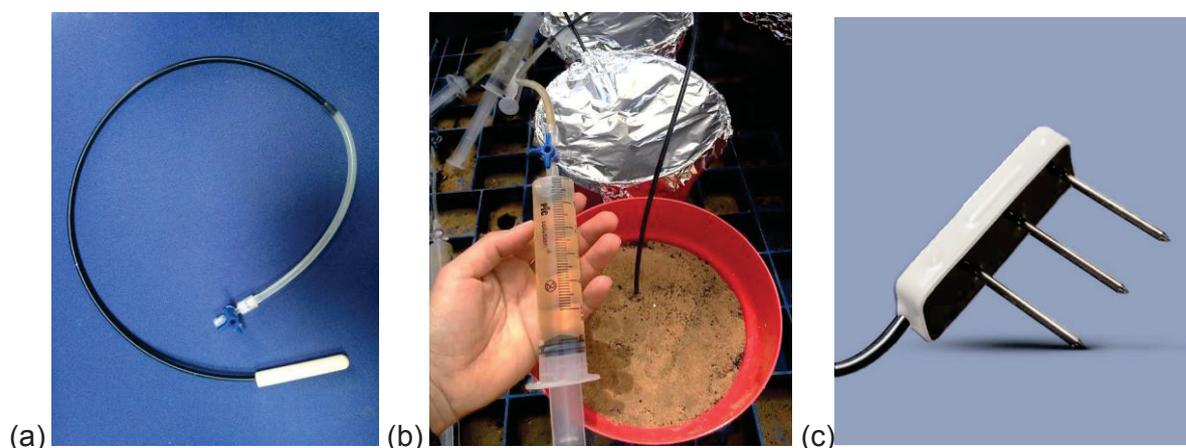
A solução salina foi adicionada ao solo seco com massa previamente calculada, e a mistura foi revolvida manualmente até se obter amostra homogênea. Após úmido, a massa de solo foi novamente medida e acondicionada em vasos com capacidade máxima de 2,5 litros. Teve-se o cuidado de manter sempre o mesmo volume de solo umedecido em todos os potes (1910 cm<sup>3</sup>), para obter massa específica do solo ( $\rho_s$ ) próxima a 1400 kg m<sup>-3</sup>. Foram necessários 0,229; 0,344; 0,477 e 0,638 dm<sup>3</sup> de solução salina por vaso para obter as umidades 0,11; 0,16; 0,24 e 0,32 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> de água, respectivamente. Amostras indeformadas de solo foram retiradas de todos os potes, para verificar se a umidade volumétrica ( $\theta$ ) e massa específica do solo mantiveram-se homogêneas. Em todos os vasos utilizados as umidades volumétricas do solo obtidas com o método gravimétrico corresponderam aos valores desejados e a massa específica alcançada ficou entre 1400 e 1500 kg m<sup>-3</sup>. Os vasos foram cobertos com papel alumínio para evitar a perda de água por evaporação. Os tratamentos foram dispostos em parcelas subdivididas com quatro repetições, resultando em 64 unidades experimentais (4 condutividades elétricas x 4 umidades volumétricas x 4 repetições).

Após estabilização do solo com a solução nos vasos, os três métodos de medição da salinidade do solo foram testados (ESCP, SGS3 e ERSA-1:1). Com o método da ESCP obteve-se a *CE* da solução contida nos poros do solo ( $CE_p$ ); com o SGS3 obteve-se a *CE* da massa do solo ou condutividade aparente ( $EC_a$ ); e com o ERSA-1:1 quantificou-se a *CE* da solução diluída ( $CE_{1:1}$ ). Por ser o método comumente utilizado para verificação da salinidade em solos arenosos, o ERSA-1:1 foi escolhido no lugar do método da Pasta Saturada, considerado padrão para outros tipos de solos (RHOADES et al., 1999; BISWAS et al., 2007).

As cápsulas porosas foram confeccionadas com cerâmicas cilíndricas, medindo 1,0 cm de diâmetro e 7,0 cm de comprimento, com diâmetro de poros igual a 2,5  $\mu$ m. Na cavidade de cada cápsula, localizada na parte superior, foi conectado um tubo plástico de 0,3 cm de diâmetro e 60,0 cm de comprimento, vedado com

auxílio de fita veda rosca e cola epóxi (FIGURA 2.2a). Uma válvula de três vias foi encaixada na ponta do tubo plástico. Após confeccionados, os extratores foram emergidos em solução de ácido nítrico 1:20 ( $\text{HNO}_3$ ) por 6 h. Em seguida, foram lavados em água destilada, aplicando-se pressão de sucção para permitir a passagem da água e limpeza dos poros da cerâmica. As cápsulas foram colocadas nos vasos a 9 cm de profundidade e 8 cm distante das laterais. Para extrair a solução do solo, foi realizada sucção com auxílio de seringa de 50 ml, acoplada à válvula de três vias (FIGURA 2.2b). As sucções foram realizadas entre 3 e 4 horas após o solo com as soluções terem sido acondicionados nos vasos, sendo as amostras coletadas após 24 h. Depois de coletadas, as amostras da solução do solo foram armazenadas em tubos plásticos de 50 ml e a  $CE_p$  medida com o condutivímetro de bancada con150 (Eutech Instruments).

FIGURA 2.2 – CÁPSULA POROSA: a) CERÂMICA 1 X 7 cm, TUBO 0,03 X 60 cm, VÁLVULA DE TRÊS VIAS; b) SOLUÇÃO DO SOLO EXTRAÍDA DA CÁPSULA POROSA; E, c) SENSOR DIELÉTRICO GS3.



FONTE: A autora (2019)

O Sensor GS3 testado (FIGURA 2.2c) é recomendado para uso em estufas e solos com condutividade elétrica aparente ( $CE_a$ ) variando entre 0 e 10  $\text{dS m}^{-1}$ , com precisão de 10% (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA). O SGS3 é capaz de medir simultaneamente a umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ), temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e condutividade elétrica aparente ( $EC_a$ ). O sensor possui três hastes de aço de 5,5 cm de comprimento (FIGURA 2.2c), e utiliza frequência de 70 MHz para medir a constante dielétrica ( $Ka$ ) do solo, que posteriormente é convertida em umidade volumétrica ( $\theta$ ) com a equação modificada de Topp et al. (1980):

$$\theta = 5,89 \cdot 10^{-6} \cdot Ka^3 - 7,62 \cdot 10^{-4} \cdot Ka^2 + 3,67 \cdot 10^{-2} \cdot Ka - 7,53 \cdot 10^{-2}$$

Sendo:  $\theta$  – umidade volumétrica de água do solo ( $m^3 m^{-3}$ );  $Ka$  – constante dielétrica (adimensional).

Foi utilizado apenas um sensor GS3 conectado ao *datalogger* EM 50. As medições de salinidade e umidade volumétrica foram realizadas em um vaso de cada vez, após 24 h de incubação do solo, contadas a partir da aplicação dos tratamentos. Os eletrodos foram limpos após cada medição. O sensor foi instalado na profundidade de 5 cm, ficando distantes 8 cm da parede dos vasos. Após instalação, o sensor permaneceu no vaso por tempo necessário até que os valores de  $CE_a$  permanecessem estáveis. Os dados foram obtidos com o programa ECH2O Utility (METER Group, Inc. USA).

Após medição da  $CE$  da solução do solo ( $EC_p$ ; cerâmica porosa) e aparente ( $EC_a$ ; sensor GS3), foi realizada a extração por relação solo-água na relação 1:1. Portanto, amostras do solo de cada vaso foram coletadas e secas em estufa a 105 °C, por 30 h. As soluções 1:1 foram obtidas pesando-se 25 g da amostra seca e 25 g de água destilada, misturando-os em agitador mecânico a 130 rpm, durante 1 h. Após 2 h de descanso a  $CE_{1:1}$  do sobrenadante foi medida com condutivímetro con150 (Eutech Instruments). A filtragem do sobrenadante foi dispensada, pois em testes prévios foi verificado que a filtragem não afetou a  $CE$  da solução, fato também relatado por Souza et al. (2013).

## **b) Segunda Etapa Experimental**

Na Segunda Etapa Experimental o efeito da composição química das soluções salinas foi avaliado em três níveis crescentes de condutividade elétrica. As soluções foram feitas em laboratório utilizando sais KCl,  $CaCl_2$ , NaCl e a mistura de fertilizantes comercializada como NPK 20:20:20. Os componentes químicos do fertilizante utilizado se encontram na TABELA 2.2. Os tratamentos foram preparados utilizando-se quatro litros de água duplamente destilada e adicionando-se o sal em concentrações suficientes para obter condutividades elétricas iguais a 0,36; 4,3 e 8,8  $dS m^{-1}$  (TABELA 2.3). Os tratamentos foram dispostos em parcelas subdivididas contendo quatro repetições, resultando em 48 unidades experimentais (4 sais x 3 condutividades elétricas x 4 repetições).

TABELA 2.2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FERTILIZANTE NPK 20:20:20 + MICRO NUTRIENTE (ME), PRODUZIDO PELO GRUPO ICL/HAIFA.

Nutriente	Composição química
Nitrogênio (N)	N-NH <sub>2</sub> (10,1%); N-NO <sub>3</sub> (5,9%); N-NH <sub>4</sub> (4%)
Fósforo (P)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (20%)
Potássio (K)	K <sub>2</sub> O (20%)
Micro nutriente (ME)	Cu-EDTA (0,002%); Fe-EDTA (0,03%); Mn-EDTA (0,01%); Zn-EDTA (0,009%); Mo (0,002%)

FONTE: A autora (2019)

TABELA 2.3. CONCENTRAÇÃO DE SAÍIS (CS; g L<sup>-1</sup>) E SUA RESPECTIVA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE; dS m<sup>-1</sup>).

----- KCl -----		----- CaCl <sub>2</sub> -----		----- NaCl -----		----- NPK 20:20:20 -----	
CS	CE	CS	CE	CS	CE	CS	CE
g L <sup>-1</sup>	dS m <sup>-1</sup>	g L <sup>-1</sup>	dS m <sup>-1</sup>	g L <sup>-1</sup>	dS m <sup>-1</sup>	g L <sup>-1</sup>	dS m <sup>-1</sup>
0,18	0,36	0,22	0,36	0,16	0,36	0,29	0,34
2,21	4,30	3,33	4,50	2,06	4,37	4,63	4,35
4,70	8,80	6,68	8,7	4,31	8,78	9,74	8,70

FONTE: A autora (2019)

A medição da salinidade do solo foi realizada com os mesmos métodos utilizados na Primeira Etapa Experimental, sendo: ESCP ( $CE_p$ ), SGS3 ( $CE_a$ ) e ERSA-1:1 ( $CE_{1:1}$ ). Todos os procedimentos necessários foram realizados com os mesmos equipamentos previamente estabelecidos na Primeira Etapa Experimental.

O experimento foi conduzido em vasos com capacidade máxima de 2,5 L e todos os tratamentos analisados na umidade de saturação do solo ( $\theta_s = 0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Os potes foram preenchidos com 2660 g de solo seco, e acondicionados ao volume de 1900 cm<sup>3</sup>, resultando em massa específica do solo ( $\rho_s$ ) de 1400 kg m<sup>-3</sup>. Em seguida, foram pesados 300 g de solução, que cuidadosamente foi disposta nos vasos, permitindo que o solo-solução se estabilizasse por período de 3 h. Após estabilização, as cápsulas porosas foram colocadas no solo úmido, na profundidade de 9 cm, distantes 6 cm da parede do vaso.

Para atingir a umidade de saturação ( $\theta_s$ ) foram aplicados mais 330 g de solução salina em cada vaso e deixados tampados com papel alumínio por 16 h,

durante o período noturno. No dia seguinte foram feitas as medições de condutividade elétrica aparente ( $CE_a$ ) e umidade volumétrica do solo com o sensor GS3, medição da  $CE_p$  e  $CE_{1:1}$ . Como os tratamentos foram analisados com umidade de saturação, a solução do solo foi facilmente extraída minutos após aplicação da pressão de sucção com a capsula porosa.

#### 2.4.4 Experimento a campo

O experimento a campo, utilizado para comparação com os resultados obtidos em vasos no laboratório, foi conduzido em duas casas de vegetação com produção de tomate cereja situada no centro de pesquisa do *Ramat Negev*, em Ashalim. O solo da área estudada é arenoso (90% de areia) e foi o mesmo utilizado nos experimentos conduzidos em laboratório. As estufas receberam dois tratamentos, sendo irrigação com solução não salina e salina de condutividades elétricas ( $CE_{so}$ ) iguais a 0,31 e 4,35 dS  $m^{-1}$ , respectivamente. As soluções via fertirrigação foram aplicadas três vezes ao dia com vazão de 2  $m^3$  pulso $^{-1}$ , de setembro a dezembro de 2017; e, duas vezes por dia a 2,5  $m^3$  pulso $^{-1}$ , de dezembro de 2017 a abril de 2018. Para controlar a salinidade do solo, dezoito sensores dielétricos e dez cápsulas porosas foram instalados em cada estufa. Os sensores foram inseridos no solo a 15 cm de profundidade e a 20 cm das pastilhas de gotejo, sendo seis sensores no tratamento não salino e doze no tratamento salino. Foram instaladas seis cápsulas porosas sob tratamento não salino e quatro sob salino, a 10 e 20 cm de profundidade (FIGURA 2.3).

A solução do solo foi extraída das cápsulas porosas a cada duas semanas, aplicando-se pressão de sucção pela manhã e retirando as amostras no período da tarde, ou no dia seguinte. Os dados dos sensores dielétricos foram obtidos automaticamente a cada 4 minutos com *datalogger*, e enviados via rede sem fio para verificação periódica. O experimento no campo foi conduzido por todo o ciclo vegetativo da cultura do tomate, de setembro de 2017 a abril de 2018, e a  $CE_{1:1}$  não foi analisada.

FIGURA 2.3 – ESTUFA DE VENTILAÇÃO NATURAL CULTIVADA COM TOMATE CEREJA: a) PLACAS VERMELHAS INDICAM TRATAMENTO SALINO ( $4,35 \text{ dS m}^{-1}$ ); b) PLACAS AZUIS INDICAM TRATAMENTO NÃO SALINO ( $0,31 \text{ dS m}^{-1}$ ); E, c) NO LADO DIREITO INFERIOR OBSERVAM-SE AS CÁPSULAS POROSAS INSTALADAS NA LINHA DE CULTIVO.



FONTE: A autora (2019)

#### 2.4.5 Análise estatística

A resposta dos métodos às variações de umidade volumétrica do solo e composição salina da solução foi avaliada em análises de regressão linear, com a obtenção dos seus respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ), e análises de comparações múltiplas com o auxílio da ferramenta Multcompare do *software* MATLAB R2015b (MathWorks, Natick, MA), considerando o teste de Tukey (5% de significância). Medidas de tendência e dispersão (coeficiente de variação, CV) também foram calculadas para verificar a resposta dos métodos utilizados aos íons da solução do solo. A associação entre os métodos nas crescentes umidades foi realizada por regressão linear entre a  $CE_p$ , adotada como padrão, e a  $CE_a$  e  $CE_{1:1}$ , com a obtenção de suas respectivas equações lineares. Para examinar a variação temporal dos valores de condutividade elétrica medidas a campo, foram obtidas médias dos valores de  $CE_a$  de todos os sensores instalados em cada tratamento e médias diárias durante todo o período.

## 2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 2.5.1 Efeito da umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) sobre a condutividade elétrica do solo ( $CE_a$ , $CE_p$ e $CE_{1:1}$ )

As leituras de condutividade elétrica obtidas com as crescentes umidades volumétricas do solo encontram-se apresentadas na FIGURA 2.4. Verificou-se estreita associação linear ( $R^2_{\text{médio}} = 0,915$ ; FIGURA 2.4a) entre a umidade volumétrica do solo e a condutividade elétrica aparente ( $CE_a$ ). Em todos os níveis salinos estudados observou-se que a  $CE_a$  se eleva com o aumento da umidade. A associação entre umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) e  $CE_a$  é confirmada por vários autores (HILHORST, 2000; MALICK et al., 1999; ZHANG; WIENHOLD, 2002; BREVIK et al., 2006). O sensor dielétrico, quando inserido no solo está em contato com todas as fases ali presentes (líquida, gasosa e sólida). Porém, a solução do solo é a única fase condutiva, visto que as partículas sólidas e o gás são materiais pouco condutivos ( $CE_a = 0$ ) (FRIEDMAN, 2005). Por essa razão, quanto maior o conteúdo de água no solo, maior contato dos eletrodos do sensor com a parte líquida e, conseqüentemente, maior condutividade elétrica.

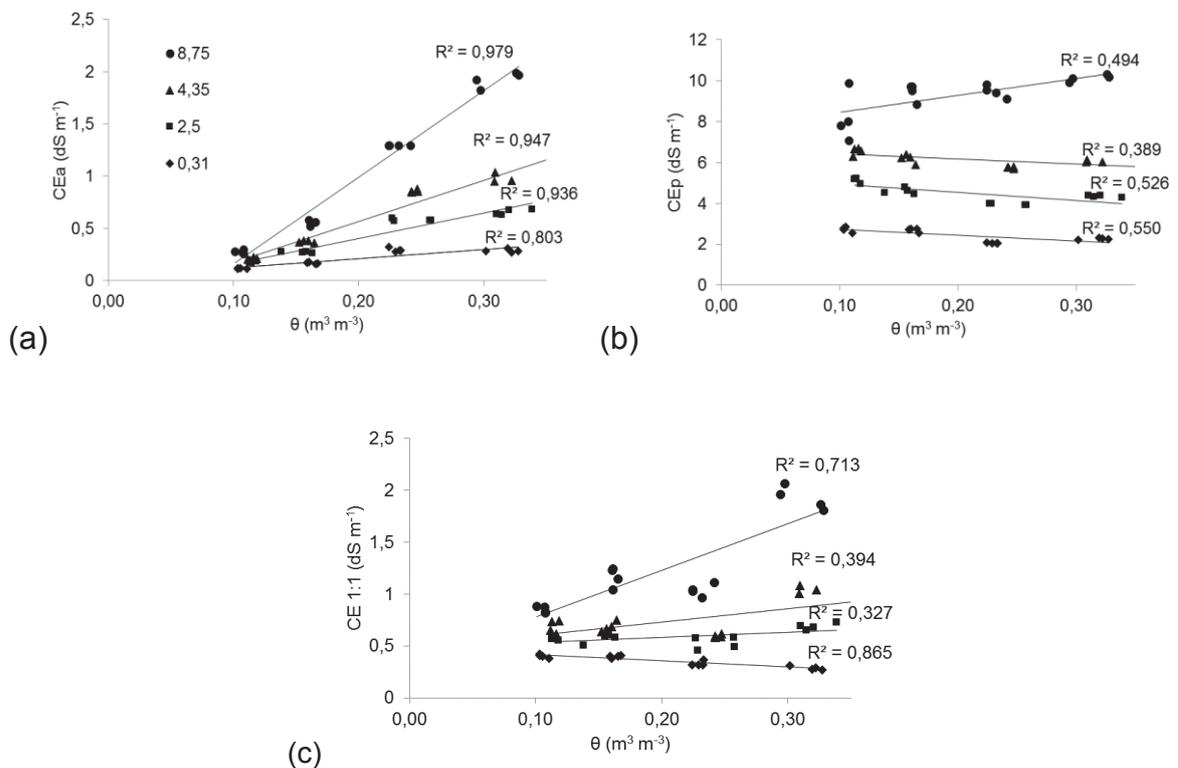
Quando a umidade foi alterada de  $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  até umidade de saturação, a  $CE_a$  aumentou de 2,5 a 7 vezes nas soluções de menor e maior  $CE_{so}$ , respectivamente (FIGURA 2.4a). O resultado indica que o efeito causado pelo conteúdo de água no solo depende da salinidade que o solo se encontra. Quanto mais salino maior a influência da umidade nas leituras de salinidade do sensor.

Apesar da  $CE_a$  ser fortemente influenciada pela umidade volumétrica, o contrário ocorreu com a condutividade elétrica da solução do solo ( $CE_p$ ) medida na solução extraída pela cápsula porosa. Verificou-se maior dispersão entre  $\theta$  vs  $CE_p$  ( $R^2 < 0,550$ ; FIGURA 2.4b). Com exceção da maior salinidade, a  $CE_p$  teve leve queda com o aumento da umidade volumétrica no solo ( $\theta$ ). Acredita-se que a diferença da resposta entre os métodos ESCP e SGS3 deveu-se ao sistema em que a condutividade elétrica é medida. O condutímetro utilizado na solução dos poros extraída pela cápsula porosa utiliza o mesmo princípio do sensor GS3. Entretanto, a  $CE_p$  é medida em sistema monofásico (aquoso), não sofrendo interferência da parte sólida ou gasosa do solo, tendo os eletrodos diretamente em contato com o líquido.

Assim, seja com umidade volumétrica do solo baixa ( $\theta = 0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) ou saturada ( $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) a  $CE_p$  tende a ser a mesma.

A solução dos poros do solo extraída com a capsula porosa resultou em valor médio de  $2,0 \text{ dS m}^{-1}$  quando aplicada a solução de  $CE$  igual a  $0,31 \text{ dS m}^{-1}$  (FIGURA 2.4b), indicando que mesmo após lavagem do solo, o sistema permaneceu saturado de bases.

FIGURA 2.4 – ANÁLISES DE REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO ENTRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA E UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO ( $\theta$ ), EM SOLUÇÕES COM CRESCENTE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (0,31; 2,5; 4,35 E 8,75  $\text{dS m}^{-1}$ ): a)  $\theta$  vs  $CE$  APARENTE ( $CE_a$ ); b)  $\theta$  vs  $CE$  DA SOLUÇÃO DOS POROS ( $CE_p$ ); E, c)  $\theta$  vs  $CE$  DA SOLUÇÃO SOLO-ÁGUA 1:1 ( $CE_{1:1}$ ).



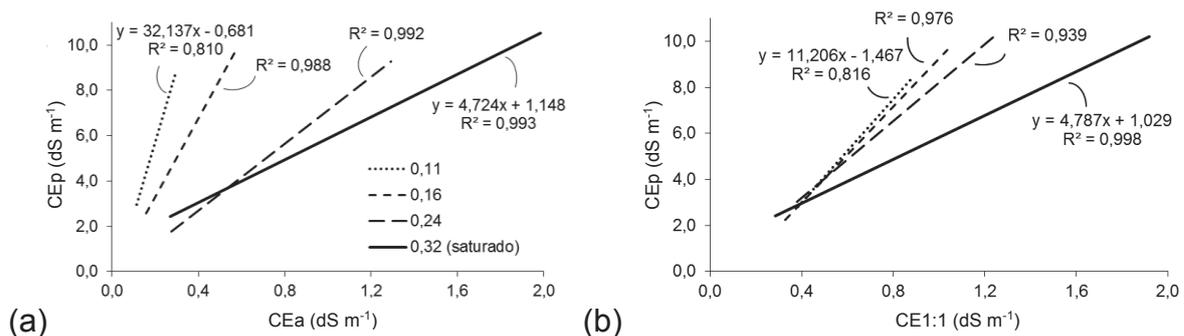
FONTE: A autora (2019)

O efeito da umidade volumétrica do solo nas leituras de condutividade elétrica com o método ERSA-1:1 ( $CE_{1:1}$ ) não foi evidente (FIGURA 2.4c). Utilizando as soluções de 2,5 e 4,35  $\text{dS m}^{-1}$  de sais, a  $\theta$  não influenciou as leituras de  $CE_{1:1}$  ( $R^2 < 0,395$ ). Entretanto, com a solução de 8,75  $\text{dS m}^{-1}$  os valores de  $CE_{1:1}$  aumentaram com o acréscimo da  $\theta$ , e o oposto foi observado para a solução de

menor salinidade ( $0,31 \text{ dS m}^{-1}$ ), obtendo-se coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a  $0,713$  e  $0,865$ , respectivamente, indicando estreita associação entre as variáveis.

Como a salinidade da solução dos poros ( $CE_p$ ) é o melhor índice para expressar o meio salino em que as raízes se encontram (BISWAS et al., 2007), realizou-se comparações entre as medidas de salinidade obtidas com os métodos SGS3 e ERSA-1:1 (FIGURA 2.5). Observou-se que a condutividade elétrica aparente ( $CE_a$ ) e da extração 1:1 ( $CE_{1:1}$ ) apresentaram associação com a condutividade elétrica da solução dos poros ( $R^2 > 0,810$ ), sendo a relação dependente da umidade em que o solo se encontra. Straten et al. (2014) avaliando o desempenho do SGS3 para monitoramento da salinidade a campo também observaram a mesma tendência entre condutividades elétricas do sensor e da solução dos poros, em crescentes umidades. Quanto menor a umidade volumétrica do solo, maior o coeficiente angular da equação de regressão linear. Assim, quanto mais baixo for  $\theta$ , a  $CE_p$  será superestimada pelas leituras de  $CE_a$  do sensor e  $CE_{1:1}$  medidas em laboratório.

FIGURA 2.5 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO ( $R^2$ ) ENTRE CONDUTIVIDADES ELÉTRICAS ( $CE$ ) EM QUATRO UMIDADES VOLUMÉTRICAS DO SOLO ( $\theta$ :  $0,11$ ;  $0,16$ ;  $0,24$  E  $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), SENDO: a)  $CE$  APARENTE ( $CE_a$ ) vs  $CE$  DOS POROS DO SOLO ( $CE_p$ ); b)  $CE$  POR EXTRAÇÃO 1:1 ( $CE_{1:1}$ ) vs  $CE_p$ . ANÁLISES COM VALORES ABSOLUTOS, CONTENDO TODAS AS REPETIÇÕES.



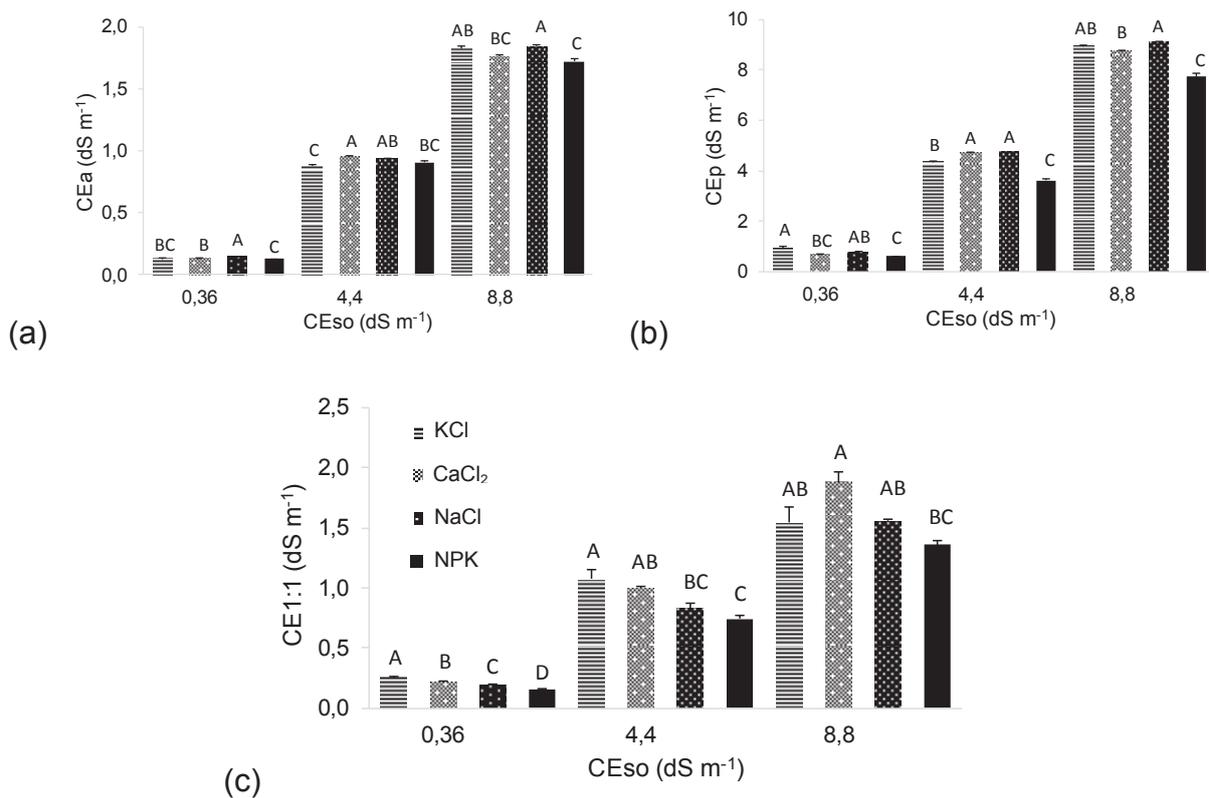
FONTE: A autora (2019)

Os resultados obtidos confirmam que o conteúdo de água no solo influenciou os métodos de medição de salinidade testados, de forma diferente, sendo  $\theta$  um fator que dificulta a conversão das condutividades elétricas.

### 2.5.2 Efeito da composição salina da solução do solo sobre a condutividade elétrica do solo ( $CE_a$ , $CE_p$ e $CE_{1:1}$ )

A relação entre a  $CE$  das soluções contendo diferentes sais (KCl,  $CaCl_2$ , NaCl e NPK 20:20:20) e a  $CE$  medida com os métodos ESCP, SGS3 e ERSA-1:1 encontram-se apresentadas na FIGURA 2.6. Os íons influenciaram as medidas de  $CE$  em todos os métodos utilizados. Quando o fertilizante NPK foi utilizado, todos os métodos subestimaram a condutividade elétrica do solo (FIGURA 2.6). Acredita-se que a menor condutividade elétrica, obtida no presente trabalho com fertilizante NPK, resultou da adsorção ou precipitação de íons da solução, podendo o P ter sido imobilizado.

FIGURA 2.6 – COMPARAÇÕES MÚLTIPLAS ENTRE OS ÍONS KCl,  $CaCl_2$ , NaCl e NPK 20:20:20 COM O TESTE DE TUKEY A 5% DE PROBABILIDADE, E ERRO PADRÃO: a)  $CE$  APARENTE ( $CE_a$ ) vs  $CE$  DA SOLUÇÃO APLICADA NO SOLO ( $CE_{so}$ ); b)  $CE$  DA SOLUÇÃO DOS POROS ( $CE_p$ ) vs  $CE_{so}$ ; E, c)  $CE$  DA EXTRAÇÃO SOLO-ÁGUA 1:1 ( $CE_{1:1}$ ) vs  $CE_{so}$ .



FONTE: A autora (2019)

O uso de NaCl resultou nos maiores valores de  $CE$  medida com o sensor e cápsula porosa ( $CE_a$  e  $CE_p$ ; FIGURA 2.6a,b). O NaCl também foi o sal com maior resposta da condutividade elétrica às concentrações da solução (TABELA 2.3). A solução de NaCl necessitou de 4,31 g L<sup>-1</sup> do sal para alcançar a  $CE_{so}$  de

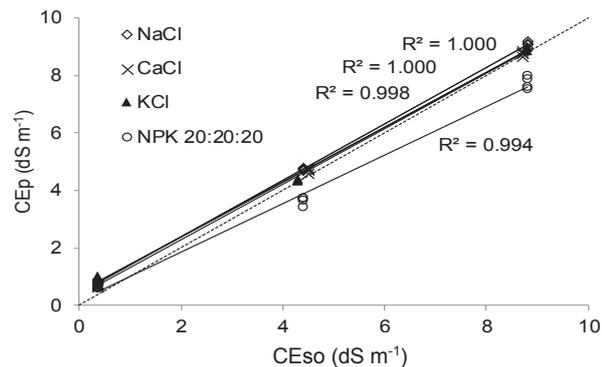
8,8 dS m<sup>-1</sup>, enquanto o fertilizante NPK necessitou aproximadamente do dobro da concentração (9,74 g L<sup>-1</sup>) para atingir a mesma condutividade elétrica (TABELA 2.3). Nas medidas de  $CE_{1:1}$  os maiores valores foram obtidos com a solução de KCl, principalmente em baixa salinidade (FIGURA 2.6c). Zhang et al. (2009) verificaram que os cátions que mais influenciaram a condutividade elétrica da solução extraída do solo foram os íons Na<sup>+</sup> e K<sup>+</sup>, provavelmente por ficarem fracamente retidos no solo. De acordo com a série liotrópica, estes cátions estão entre os últimos na ordem preferencial de retenção no solo. Os resultados demonstraram que a  $CE$  da massa e do extrato do solo, bem como da solução dos poros são influenciadas pela umidade e composição da solução de forma distinta, podendo sofrer influência dos níveis salinos. Logo, a  $CE$  do solo é uma propriedade complexa e dinâmica que reflete o efeito de várias propriedades do solo (CARMO et al., 2016).

Diferente da ESCP e SGS3 o método ERSA-1:1 resultou em dados mais dispersos, com coeficientes de variação superior aos outros métodos em todas soluções salinas, com CV(%): 16,91% para KCl; 9,82% para CaCl<sub>2</sub>; 2,26% para NaCl; e, 4,85% para NPK. A maior dispersão dos dados proporcionada com o método indireto (ERSA-1:1) também foi observada na FIGURA 2.4c, sob crescente umidade volumétrica no solo. Hanson et al. (2006) e Rhoades et al. (1999) consideraram que o método com diluição da solução do solo está sujeito a maiores desvios devido a dissolução de minerais, hidrólise de íons e mudança dos cátions trocáveis entre coloides e solução do solo.

Os valores obtidos com as cápsulas de cerâmica porosa ( $CE_p$ ) ficaram bem próximos a linha 1:1 (FIGURA 2.7). A proximidade dos valores da linha 1:1 significa que as  $CE$ 's medidas com as cápsulas porosas ficaram bem próximas das soluções utilizadas, demonstrando o desempenho do método para medir a salinidade da solução dos poros do solo. Contudo, é importante observar que os resultados foram obtidos com o solo lavado. No campo, os valores de  $CE_p$  provavelmente não serão iguais aos da solução aplicada via irrigação, pois pode haver combinação dos íons da solução irrigada com os íons trocáveis adsorvidos na parte sólida do solo, elevando a  $CE_p$ . Em outros casos, principalmente em solos de textura fina, que apresentam alta retenção de íons, a condutividade elétrica da solução do solo pode ser menor que a da solução aplicada, pois parte dos íons ficarão retidos na parte sólida do solo (QUEIROZ et al., 2005). Os resultados obtidos foram contrários aos

observados por Oliveira et al. (2011), que trabalhando com cápsulas porosas em diferentes solos, observaram superestimação da  $CE_p$  em solo arenoso. A diferença deveu-se a salinidade inicial do solo, pois os solos analisados por Oliveira et al. (2011) não foram lavados, ocorrendo provavelmente a combinação dos íons da solução aplicada com os íons trocáveis presentes na CTC do solo.

FIGURA 2.7 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ( $R^2$ ) ENTRE CONDUTIVIDADES ELÉTRICA APARENTE ( $CE_a$ ) E DA SOLUÇÃO APLICADA NO SOLO ( $CE_{so}$ ).

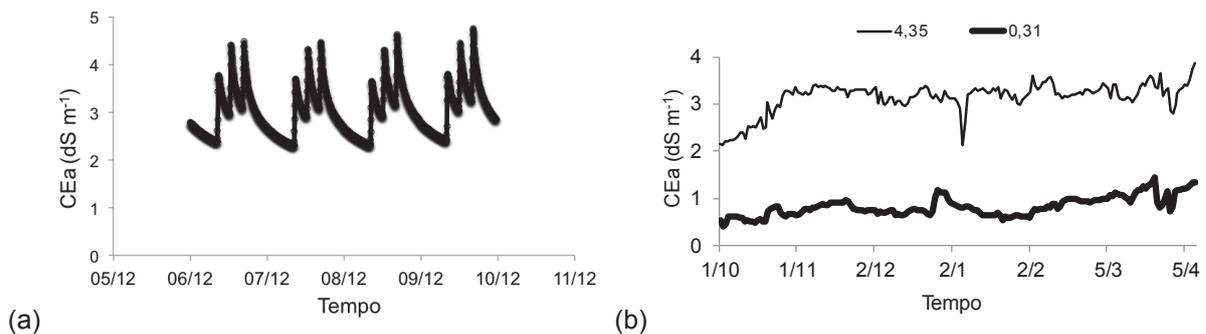


FONTE: A autora (2019)

### 2.5.3 Análise da salinidade a campo

A medida da condutividade elétrica aparente com o SGS3 permitiu verificar como a variação temporal dos valores de  $CE_a$  foram influenciados pela umidade volumétrica do solo (FIGURA 2.8a). Os três picos de salinidade medidos diariamente corresponderam aos momentos em que as irrigações foram efetuadas. Por isso, análises de  $CE_a$  em apenas um momento do dia não é o bastante para refletir a dinâmica de salinidade do solo.

FIGURA 2.8 – VARIÇÃO TEMPORAL DA SALINIDADE: a) MEDIDA EM INTERVALOS DE 4 MINUTOS, ENTRE 6 E 10 DE DEZEMBRO DE 2017; E, b) MÉDIAS DIÁRIAS DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE ( $CE_a$ ), NOS TRATAMENTOS SALINO ( $4,35 \text{ dS m}^{-1}$ ) E NÃO SALINO ( $0,31 \text{ dS m}^{-1}$ ).



FONTE: A autora (2019)

A tendência observada ao longo dos sete meses de cultivo (FIGURA 2.8b) foi de acréscimo da  $CE_a$  com o tempo, mesmo no tratamento não salino. Em média, a  $CE_a$  aumentou de 2,15 para 3,88 dS m<sup>-1</sup> e de 0,55 para 1,34 dS m<sup>-1</sup>, nos tratamentos salino e não salino, respectivamente. A elevação da salinidade do solo em cultivos fertirrigados é comumente relatada devido à dificuldade de manejo eficiente das aplicações via irrigação, principalmente em regiões áridas ou em sistemas de produção fechado, sem a ocorrência de chuvas que possibilitem a lavagem do solo (FREIRE et al., 2010; SILVA et al., 2015). Observou-se também duas quedas bruscas da  $CE_a$  no tratamento salino, no mês de janeiro e início de abril (FIGURA 2.8b). Tais quedas decorreram da falha de irrigação nos dois momentos.

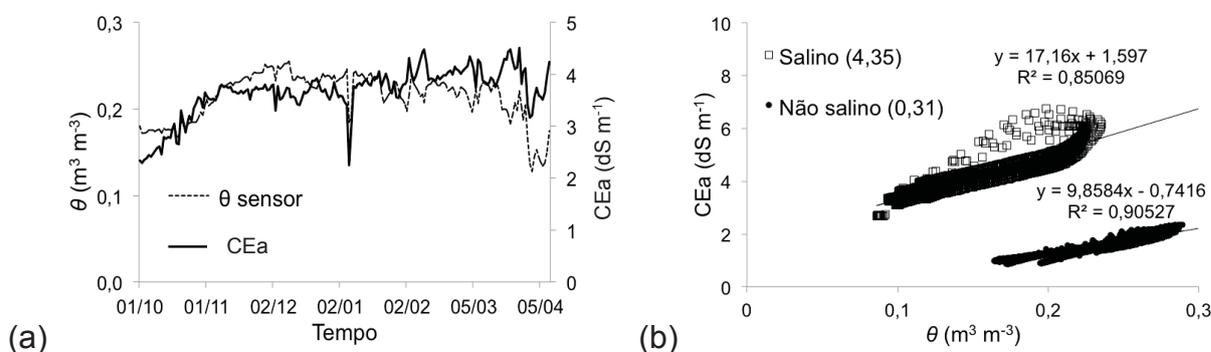
A variação temporal da salinidade durante o período experimental seguiu a mesma tendência da umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) medida com o SGS3 (FIGURA 2.9a). O movimento instável observado no campo ocorreu devido aos fatores ambientais que mudam diariamente e afetam as variáveis  $CE_a$  e  $\theta$ . Irrigação irregular, temperatura, evapotranspiração, absorção radicular e extração de nutrientes pelas plantas alteram diariamente o volume de água do solo e a composição da solução (FRIEDMAN, 2005; BISWAS et al., 2007). Carmo et al. (2016) afirmam que ocorre mudanças na composição química da solução do solo com o tempo, mesmo na ausência de plantas, refletindo em bruscas modificações na  $CE$ . Acredita-se que o acréscimo da  $CE_a$  no período analisado resultou do acúmulo de sais no solo, podendo ser devido a superestimação nas aplicações de fertilizantes via irrigação, e/ou pela não ocorrência de chuvas que possibilitam a lavagem do solo e transporte dos íons para camadas mais profundas.

Similar ao observado no laboratório, a associação dos valores da  $CE_a$  com a umidade volumétrica do solo ( $R^2 > 0,85$ ) medidos no campo foi dependente da salinidade da solução aplicada (FIGURA 2.9b). A maior influência da umidade foi observada no tratamento salino, com coeficiente angular da equação de regressão linear igual a 17,16 (FIGURA 2.9b).

Os resultados de condutividade elétrica da solução dos poros ( $CE_p$ ) para diferentes profundidades foram analisados em conjunto, pois a condutividade elétrica das soluções foram semelhantes. Poucas amostras puderam ser coletadas devido à problemas técnicos com as cápsulas porosas, como entrada de ar, perda de vácuo e cápsulas apresentando mal contato com o solo. Só foi possível extrair a

solução dos poros quando a pressão de sucção foi aplicada antes das irrigações. Com a umidade do solo reduzida, principalmente nos finais da tarde e durante a noite, a pressão aplicada não foi suficiente para extrair porções significativas da solução do solo, devido à elevada tensão da água no solo.

FIGURA 2.9 – a) VARIAÇÃO TEMPORAL DAS MÉDIAS DIÁRIAS DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE ( $CE_a$ ) E UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO ( $\theta$ ), MEDIDA COM O SGS3 DURANTE TODO O PERÍODO EXPERIMENTAL; E, b) ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ( $R^2$ ) ENTRE CONDUTIVIDADE ELÉTRICA APARENTE ( $CE_a$ ) E UMIDADE VOLUMÉTRICA DO SOLO ( $\theta$ ), MEDIDA COM O SGS3 EM SOLUÇÕES SALINA (4,35  $dS\ m^{-1}$ ) E NÃO SALINA (0,31  $dS\ m^{-1}$ ). OS DADOS CORRESPONDEM À MÉDIA DE TRÊS SENSORES NO PERÍODO ENTRE 3 E 10 DE ABRIL DE 2018, TOTALIZANDO 2900 PONTOS EM CADA TRATAMENTO.



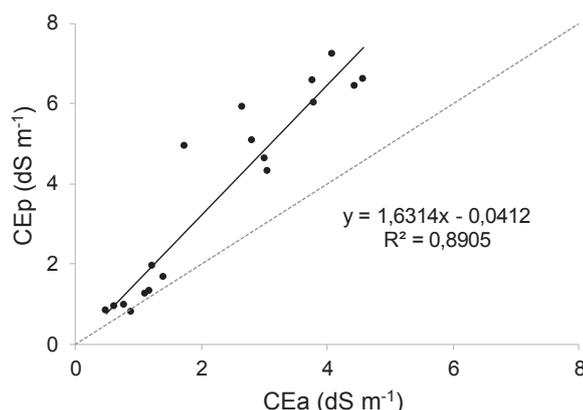
FONTE: A autora (2019)

A cápsula porosa é uma alternativa interessante para mensurar a salinidade da solução do solo no campo, diretamente e sem problemas de diluição. Porém, além das dificuldades técnicas, não é possível monitorar a variação da salinidade durante o dia. Dependendo da umidade do solo, o processo de extração pode demorar muitas horas, sendo que quanto menor umidade maior o tempo necessário. Logo, a leitura da condutividade elétrica da solução dos poros ( $CE_p$ ) com as cápsulas porosas, corresponde a um intervalo de tempo, e não momentos específicos como ocorre com os sensores. Este é um aspecto metodológico importante que impossibilita o uso de cápsulas porosas para estudar a variação da  $CE_p$  em períodos horários.

A associação entre  $CE_a$  vs  $CE_p$  (FIGURA 2.10) medidas no campo, resultou de médias de grande número de leituras do SGS3, correspondentes ao mesmo período em que as cápsulas porosas estavam submetidas à vácuo para extração da solução do solo. Portanto, os pontos da  $CE_a$  (FIGURA 2.10) correspondem à média

de valores em períodos de constante variação da condutividade elétrica, como visto na FIGURA 2.8. A  $CE_p$  variou de 0,63 a 1,92  $dS\ m^{-1}$  no tratamento não salino (0,31  $dS\ m^{-1}$ ) e de 4,3 a 7,2  $dS\ m^{-1}$  no tratamento salino (4,35  $dS\ m^{-1}$ ).

FIGURA 2.10 – REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ( $R^2$ ) ENTRE VALORES MÉDIOS DE  $CE$  APARENTE ( $CE_a$ ) E  $CE$  DOS POROS DO SOLO ( $CE_p$ ), MEDIDOS ENTRE DEZEMBRO DE 2017 A ABRIL DE 2018.



FONTE: A autora (2019)

Mesmo apresentando maiores variações no campo que em laboratório, e necessitar do agrupamento de grande número de leituras, a associação das medidas do SGS3 vs ESCP foram bem representadas em análise de regressão linear ( $R^2 = 0,8905$ ). O resultado indicou para o solo arenoso que medidas de  $CE_a$  e equações lineares de conversão podem ser utilizadas para estimar a condutividade elétrica dos poros do solo ( $CE_p$ ) com relativa simplicidade e segurança.

## 2.6 CONCLUSÕES

- Baixas umidades do solo dificultaram as medidas de  $CE$  e influenciaram os métodos de medição de forma distinta, sendo a  $CE_a$  mais dependente da umidade;
- O método ERSA-1:1 apresentou maior dispersão das leituras de  $CE$ ;
- A solução com fertilizante NPK subestimou a condutividade elétrica do solo com todos os métodos testados e o sal NaCl superestimou as condutividades elétricas aparente ( $CE_a$ ) e da solução dos poros ( $CE_p$ );
- O efeito dos íons em solução e umidade do solo dependem da salinidade do solo;

– Medidas de condutividade elétrica aparente ( $CE_a$ ; Método SGS3) e regressões lineares de conversão em vasos ou no campo podem ser utilizadas com relativa simplicidade e segurança para estimar a condutividade elétrica dos poros do solo ( $CE_p$ ; Método ESCP).

## 2.7 REFERÊNCIAS

ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and electronics in agriculture**, v. 44, n. 1, p. 71-91, 2004.

BISWAS, T. K.; DALTON, M.; BUSS, P.; SCHRALE, G. Evaluation of salinity-capacitance probe and suction cup device for real time soil salinity monitoring in South Australian irrigated horticulture. In: Trans 2<sup>nd</sup> International Symposium on Soil Water Measurement Using Capacitance and Impedance and Time Domain Transmission. November, 2007.

BREVIK, E. C.; FENTON, T. E. Influence of soil water content, clay, temperature, and carbonate minerals on electrical conductivity readings taken with an EM-38. **Soil Horizons**, v. 43, n. 1, p. 9-13, 2002.

BREVIK, E. C.; FENTON, T. E.; LAZARI, A. Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. **Precision Agriculture**, v. 7, n. 6, p. 393-404, 2006.

CARMO, D. L. D.; SILVA, C. A.; LIMA, J. M. D.; PINHEIRO, G. L. Electrical Conductivity and Chemical Composition of Soil Solution: Comparison of Solution Samplers in Tropical Soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.

DECAGON DEVICES. Operator's manual: GS3, Water content, EC and Temperature sensors. Washington, USA, 2016.

DIAS, N.S.; DUARTE, S.N.; GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F.; SOARES, T.M. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade do solo sob ambiente protegido, utilizando-se de extratores de solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.496-504, 2005.

FREIRE, A. L. O.; SARAIVA, V. P.; MIRANDA, J. R. P.; BRUNO, G. B. Crescimento, acúmulo de íons e produção de tomateiro irrigado com água salina. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 1, 2010.

FRIEDMAN, S. P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. **Computers and electronics in agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 45-70, 2005.

GRISSE, R. D.; ALLEY, M. M.; HOLSHOUSER, D. L.; THOMASON, W. E. Precision Farming Tools. Soil Electrical Conductivity. **Virginia Polytechnic Institute and State University**, 2009.

GROBLER, L.; CLAASSENS, A. S.; ANNANDALE, J. G. Ceramic suction samplers: A reliable method for extracting soil solutions for analysis. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 20, n. 3, p. 161-164, 2003.

HANSON, B.; GRATTAN, S. R.; FULTON, A. **Agricultural salinity and drainage**. University of California Irrigation Program, University of California, Davis. 2006.

HILHORST, M. A. A pore water conductivity sensor. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 1922-1925, 2000.

KÖPPPEN, W.G.; GEIGER, R.M. Handbuch der Klimatologie. Berlin, Verlag von G. Boentraeger, 1936.

LIM, S. J.; SHIN, M. N.; SON, J. K.; SONG, J. D.; CHO, K. H.; LEE, S. H.; CHO, J. Y. Evaluation of soil pore-water salinity using a Decagon GS3 sensor in saline-alkali reclaimed tidal lands. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 132, p. 49-55, 2017.

MALICKI, M. A.; WALCZAK, R. T. Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. **European Journal of Soil Science**, v. 50, n. 3, p. 505-514, 1999.

OLIVEIRA, F. D. A. D.; MEDEIROS, J. F. D.; DUARTE, S. N.; SILVA JÚNIOR, M. J. D.; & CAMPELO, C. M. Calibração de extratores providos de cápsula porosa para monitoramento da salinidade e da concentração de íons. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 3, p. 520-528, 2011.

QUEIROZ, S.O.P.; TESTEZLAF, R.; MATSURA, E.F. Avaliação de equipamentos para determinação da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, Botucatu, v.10, n.3, p.279-287, 2005.

RHOADES, J. D.; CHANDUVI, F. **Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements**. Food & Agriculture Org., 1999.

RHOADES, J. D.; MANTEGHI, N. A.; SHOUSE, P.J.; ALVES, W.J. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 53:433-439. 1989.

SILVA, A. O.; SILVA, Ê. F.; KLAR, A. E. Manejo da fertirrigação e salinidade do solo no crescimento da cultura da beterraba. **Engenharia Agrícola**, p. 230-241, 2015.

SONMEZ, S.; BUYUKTAS, D.; OKTUREN, F.; CITAK, S. Assessment of different soil to water ratios (1: 1, 1: 2.5, 1: 5) in soil salinity studies. **Geoderma**, v. 144, n. 1-2, p. 361-369, 2008.

SOUZA, E. R. MELO, H.F.; ALMEIDA, B. G.; MELO, D.V.M. Comparação de métodos de extração da solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 17, n. 5, 2013.

STRATEN, G. V.; VOS, A.; VLAMING, R.; OOSTERBAAN, R. Dielectric sensors in an automated facility for testing salt tolerance of irrigated field crops. **Paper**. 18th World Congress of CIGR, Beijing. September, 2014.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G.. Manual de Métodos de Análise de Solo. **Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 2017.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, 16(3), 574–582. 1980.

ZHANG, F.; TIYIP, T.; DING, J. L.; HE, Q. S. The effects of the chemical components of soil salinity on electrical conductivity in the region of the delta oasis of Weigan and Kuqa Rivers, China. **Agricultural Sciences in China**, v. 8, n. 8, p. 985-993, 2009.

ZHANG, R.; WIENHOLD, B. J. The effect of soil moisture on mineral nitrogen, soil electrical conductivity, and pH. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 63, n. 2-3, p. 251-254, 2002.

### 3 CAPÍTULO II - CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE EQUAÇÕES PARA CONVERSÃO E ESTIMATIVA DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO

#### 3.1 RESUMO

A condutividade elétrica da solução dos poros ( $CE_p$ ) é medida por equipamentos relativamente demorados e requerem grande número de amostragem. Assim, faz-se necessário a utilização de modelos que convertam a  $CE$  facilmente medida por sensores, em valores de  $CE_p$ . Teve-se por objetivo no presente trabalho avaliar as principais equações de conversão da condutividade elétrica do solo existentes na literatura, analisar suas variáveis e validar as calibrações realizadas em laboratório com os dados de campo. O trabalho foi conduzido em vasos no laboratório da *Ben Gurion University of the Negev*, em Sde Boqer (30,87° N, 34,79° L), e a campo, no centro de pesquisa e desenvolvimento do *Ramat Negev*, (30,96° N, 34,69° L), ambos na região sul de Israel. No experimento conduzido em vasos foram utilizadas três técnicas de medição da  $CE$ : sensor capacitivo GS3, extração da solução do solo por cápsulas porosas; e, extração por relação solo-água na relação 1:1. O solo arenoso da área experimental foi submetido à crescentes umidades volumétricas do solo ( $\theta$ : 0,11; 0,16; 0,24 e 0,32  $m^3 m^{-3}$ )  $CE$  da solução aplicada ( $CE_{so}$ : 0,31; 2,5; 4,35 e 8,7  $dS m^{-1}$ ) e a quatro composições da solução salina (KCl,  $CaCl_2$ , NaCl e NPK 20:20:20). Na parte de campo, o solo em estufa com cultivo de tomate, foi fertirrigado com duas soluções (0,31 e 4,35  $dS m^{-1}$ ). A conversão da  $CE$  do solo foi realizada com os modelos de Rhoades, Mualem e Friedman, Hilhorst e Straten. Os modelos de conversão estimaram a  $CE_p$  com maior precisão nas condições de solo saturado ou próximo a saturação. A calibração dos parâmetros nos modelos de Hilhorst e Straten proporcionaram melhores estimativas da condutividade elétrica da solução dos poros em laboratório, porém os parâmetros foram sensíveis às diferentes umidades do solo e íons em solução, por isso devem ser calibrados em condições semelhantes à de campo. O modelo de Hillhorst apresentou o menor erro na estimativa da  $CE_p$  a campo, porém apresentou limitação quando a  $CE_p$  foi superior a 10  $dS m^{-1}$ .

Palavras-chave: Solução do solo. Condutividade elétrica. Conversão de salinidade. Sensor capacitivo. Calibração.

### 3.2 ABSTRACT

The soil pore water electrical conductivity ( $EC_p$ ) is measured by time consuming equipments and requires a large number of samples. Thus, it is necessary to use models to convert the  $EC$  easily measured by sensors, in  $EC_p$  values. The aim of this study was to evaluate the main soil electrical conductivity models presented on the literature, analyze its variables and validate the calibrations performed in the laboratory with field data. The experiment was carried out in pots in the laboratory at the *Ben Gurion University of the Negev*, Sde Boqer (30,87° N, 34,79° E), and on field at the *Ramat Negev Research and Development Center* (30,96° N, 34,69° E), both on Southern Israel. In the experiment carried out in pots three methods were used to measure the soil  $EC$ : GS3 capacitance probe, soil solution extraction by ceramic cups and extraction by soil to water ratio 1:1. On the sandy soil utilized was applied four increasing soil volumetric water contents ( $\theta$ : 0.11, 0.16, 0.24 and 0.32  $m^3 m^{-3}$ ); four solutions with increasing electrical conductivities ( $EC_w$ : 0.31, 2.5, 4.35 and 8.7  $dS m^{-1}$ ); and four saline solutions with different ion composition (KCl,  $CaCl_2$ , NaCl and NPK 20:20:20). On field, the soil was cultivated with cherry tomatoes in greenhouses and fertigated with two solutions (0.31 and 4.35  $dS m^{-1}$ ). The models utilized to convert soil electrical conductivities were Rhoades, Mualem and Friedman, Hilhorst and Straten. The conversion models estimated  $EC_p$  with greater accuracy in saturated or near saturation soil conditions. The calibration of Hilhorst and Straten models, provided the best estimates of the pore water electrical conductivity in laboratory, although the Hilhorst equation underestimates  $EC_p$  when it is higher than 10  $dS m^{-1}$ . The calibration parameters from the  $EC$  equations were sensitive to the different water content on soil and ions on solution thus they must be calibrated under field conditions. The Hillhorst model presented the smallest error in the estimation of  $EC_p$  on field.

Key-Words: Soil pore water. Electrical conductivity. Salinity estimation. Capacitive sensor. Calibration.

### 3.3 INTRODUÇÃO

Estudos visando compreender os processos de salinidade no solo indicam que a  $CE$  da solução dos poros ( $CE_p$ ) é a que melhor representa o ambiente em que as raízes das plantas se encontram, pois é na fase líquida que as raízes interagem, absorvendo e exsudando nutrientes (RHOADES et al., 1989; BISWAS et al., 2007). Porém, a  $CE_p$  só pode ser medida por equipamentos capazes de extrair a solução do solo, não existindo sensor capaz de medi-la *in situ*, o que dificulta o mapeamento e monitoramento constante da salinidade no campo. Os equipamentos de extração são relativamente demorados, requerem grande número de amostras e são de difícil extração em solos com baixa umidade volumétrica. Assim, faz-se necessário a utilização de modelos que convertam a  $CE$  aparente ( $CE_a$ ), facilmente medida por sensores, em valores de  $CE_p$ .

A  $CE_a$  é medida com sensores dielétricos, desenvolvidos para leituras precisas e práticas. A salinidade é medida aplicando-se corrente elétrica alternada entre eletrodos em contato com o solo. A resistência da corrente aplicada entre os eletrodos é medida e, posteriormente, convertida em  $CE_a$  (GRISSE et al., 2009). As leituras de  $CE_a$  podem ser automatizadas quando os sensores são conectados em *dataloggers*, possibilitando medições com intervalo de tempo desejado e que são facilmente enviadas via rede sem fio para o técnico, produtor ou pesquisador.

Sabe-se que a  $CE_a$  possui relação direta com  $CE$  da solução contida nos poros do solo ( $CE_p$ ) (RHOADES et al., 1989; MALICKI et al., 1994; FRIEDMAN, 2005), por isso vários modelos foram desenvolvidos para estimativa da  $CE_p$  com valores de  $CE_a$  (RHOADES et al., 1976; RHOADES et al., 1989; MUALEM; FRIEDMAN, 1991; HILHORST, 2000; STRATEN et al., 2014). No entanto, observa-se a falta de padronização dos termos das equações e ampla sugestão de valores para os parâmetros dos modelos, gerando confusão ao leitor. Além disso, a maioria das equações de conversão são aplicadas em condições de laboratório, em amostras homogêneas (ALJOURANI et al., 2015), podendo não apresentar resultados consistentes em condições de campo.

### 3.3.1 Aspectos básicos e equações de conversão da condutividade elétrica do solo ( $CE_a$ , $CE_p$ e $CE_{1:1}$ )

A  $CE_a$  é simplificada por alguns autores como resultado da soma da  $CE$  da fase líquida do solo, correspondendo a condutividade da solução contida nos poros ( $CE_p$ ), e da fase sólida ( $CE_s$ ) que está associada aos íons trocáveis na interface coloides-solução (RHOADES et al., 1976; MUALEM; FRIEDMAN, 1991):

$$CE_a = CE_p + CE_s \quad (1)$$

Sabe-se que a condutividade elétrica da parte líquida do solo é influenciada pela umidade volumétrica ( $\theta$ ;  $m^3 m^{-3}$ ) e pelo complexo arranjo geométrico dos poros do solo, por onde a solução é transportada (SHAINBERG et al., 1980; RHOADES et al., 1989; FRIEDMAN, 2005). A partir dessas premissas várias equações empíricas foram desenvolvidas ao longo das últimas décadas. Rhoades et al. (1976) reescreveu a Equação 1 para descrever a relação entre  $CE_a$ ,  $CE_p$  e  $\theta$  em solos não saturados:

$$CE_a = CE_p \cdot \theta \cdot T + CE_s \quad (2)$$

Sendo:  $CE_a$  – condutividade elétrica aparente ( $dS m^{-1}$ );  $CE_p$  – condutividade elétrica da solução contida nos poros do solo ( $dS m^{-1}$ );  $\theta$  – umidade volumétrica do solo ( $m^3 m^{-3}$ );  $T$  – coeficiente de transmissão (adimensional);  $CE_s$  – condutividade elétrica da superfície sólida do solo ( $dS m^{-1}$ ).

A Equação 2 assume a condutividade elétrica da superfície do solo ( $CE_s$ ) como independente da umidade e da salinidade da solução, em que o coeficiente de transmissão ( $T < 1$ ; adimensional) é proposto para corrigir a tortuosidade do espaço poroso do solo e qualquer decréscimo da mobilidade dos íons nas interfaces líquido-sólido e líquido-gás (RHOADES et al., 1976). Após calibrações, utilizando quatro solos de textura distintas, Rhoades et al. (1976) sugeriram valores de  $CE_s$  para cada solo e concluíram que  $T$  é uma função linear da  $\theta$  (Equação 3), em que os parâmetros “ $a_0$ ” (linear) e “ $a_1$ ” (angular) variam conforme o tipo de solo:

$$T = a_0 + a_1 \cdot \theta \quad (3)$$

Sendo:  $T$  – coeficiente de transmissão (adimensional);  $\theta$  – umidade volumétrica do solo ( $m^3 m^{-3}$ );  $a_0$  – coeficiente linear da reta (adimensional);  $a_1$  – coeficiente angular da reta (adimensional).

Após estudos de salinidade do solo, foi verificado que a relação entre  $CE_a$  e  $CE_p$  se torna curvilínea quando a  $CE_p$  é menor que  $4 \text{ dS m}^{-1}$  (FRIEDMAN, 2005). Portanto a Equação 2 é indicada para condições de  $CE_p > 4 \text{ dS m}^{-1}$ . Calibrações aplicando a Equação 2 em vários tipos de solos demonstraram que o coeficiente  $T$  e a  $CE_s$  são estreitamente associados com a água retida no solo na capacidade de campo e com a porcentagem de argila, respectivamente (RHOADES, 1981). Com as constatações, Rhoades et al. (1989) propôs outra equação mais elaborada que abrange maior número de fatores relacionados a  $CE$ , a fim de minimizar a necessidade de calibração no campo e ampliar a utilidade da equação:

$$CE_a = \left[ \frac{(\theta_s + \theta_{ws})^2 \cdot CE_{ws} \cdot CE_s}{(\theta_s \cdot CE_{ws}) + (\theta_{ws} \cdot CE_s)} \right] + [(\theta - \theta_{ws}) \cdot CE_{wc}] \quad (4)$$

ou

$$CE_a = \left[ \frac{(\theta_s + \theta_{ws})^2}{\theta_s} \cdot CE_s \right] + [(\theta - \theta_{ws}) \cdot CE_{wc}] \quad (5)$$

Sendo:  $CE_a$  – condutividade elétrica aparente ( $\text{dS m}^{-1}$ );  $\theta_s$  – volume de partículas sólidas do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), sendo igual ao inverso do volume de poros “ $\theta_s = 1 - \alpha$ ”;  $\theta_{ws}$  – umidade retida nas partículas do solo ou nos microporos ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $\theta$  – umidade volumétrica do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $CE_s$  – condutividade elétrica da superfície sólida do solo ( $\text{dS m}^{-1}$ );  $CE_{ws}$  – condutividade elétrica da solução do solo contida nos microporos, normalmente retida às partículas sólidas ( $\text{dS m}^{-1}$ );  $CE_{wc}$  – condutividade elétrica da solução de fluxo constante localizada nos macroporos ( $\text{dS m}^{-1}$ ).

Conforme Rhoades et al. (1990),  $CE_{ws}$  e  $CE_{wc}$  podem ser consideradas semelhantes, sendo que “ $CE_{ws} + CE_{wc} = CE_p$ ”. A Equação 5 é um modelo simplificado limitado à ambientes em que  $CE_{ws}$  é alta em relação a  $CE_s$ , que normalmente ocorre em solos com  $CE$  do extrato saturado ( $\geq 1,5 \text{ dS m}^{-1}$ ) (RHOADES, 1990). Os parâmetros  $\theta_{ws}$  e  $CE_s$  são de difícil medida e podem ser estimados com as equações calibradas por Rhoades et al. (1989), em função da umidade volumétrica do solo e porcentagem de argila:

$$\theta_{ws} = 0,639 \cdot \theta + 0,011 \quad (6)$$

$$CE_s = (0,023 \cdot A_{\%}) - 0,021 \quad (7)$$

Sendo:  $\theta_{ws}$  – umidade retida nas partículas do solo ou nos microporos ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $\theta$  – umidade volumétrica do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $CE_s$  – condutividade elétrica da superfície sólida do solo ( $\text{dS m}^{-1}$ );  $A_{\%}$  – teor de argila em porcentagem (%).

A maior flexibilidade do modelo de Rhoades et al. (1989) (Equações 4 e 5), descreve melhor a relação entre  $CE_a$ ,  $CE_p$  e  $\theta$ , em especial sob condições de baixa salinidade e umidade do solo, se comparado ao modelo de 1976 (Equação 2). Porém, o grande número de parâmetros de difícil obtenção limita sua utilização para prever a  $CE_p$  (FRIEDMAN, 2005).

Mualem e Friedman (1991) também elaboraram um modelo de conversão da  $CE$  com o objetivo de diminuir a quantidade de parâmetros normalmente exigidos nas equações de conversão, sendo capaz de estimar quantitativamente a  $CE_p$  nas condições de solo saturado e não saturado. O modelo parte do princípio que a  $CE_p$  é função da  $\theta$  e do fator geométrico dos poros do solo ( $F_G$ ). Como o fator  $F_G$  é de difícil obtenção, Mualem e Friedman (1991) assumiram que o fluxo de íons nos poros é semelhante ao fluxo de água do solo. Assim, propuseram um modelo baseado na equação de condutividade hidráulica do solo, sendo a Equação 8 para solos saturados e Equação 9 para solos não saturados. Porém, as Equações 8 e 9 não contemplam a  $CE_a$  medida por sensor *in situ*, e sim a  $CE_{saturado}$  medida em laboratório:

$$CE_p(\theta_{sat.}) = CE_{saturado} \cdot \theta_{sat.}^{1,5} \quad (8)$$

$$CE_p = CE_{saturado} \cdot \frac{\theta^{2,5}}{\theta_{sat.}} \quad (9)$$

Sendo:  $CE_p(\theta_{sat.})$  – condutividade elétrica da solução contida nos poros, na umidade de saturação ( $dS\ m^{-1}$ );  $CE_{saturado}$  – condutividade elétrica do extrato saturado, medida em laboratório ( $dS\ m^{-1}$ );  $CE_p$  – condutividade elétrica da solução contida nos poros ( $dS\ m^{-1}$ );  $\theta_{sat.}$  – umidade volumétrica do solo na saturação ( $m^3\ m^{-3}$ );  $\theta$  – umidade volumétrica do solo ( $m^3\ m^{-3}$ );

Em trabalho recente, Samson et al. (2017) utilizaram o sensor GS3 (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA) para estimar a  $CE_p$  de solo arenoso cultivado com cranberry, e obtiveram resultados mais precisos com o modelo de Hilhorst (2000), quando comparado com as Equações 2 e 4. O modelo de Hilhorst (2000) baseia-se na estreita correlação linear encontrada por Malicki et al. (1994) entre valores de  $CE_a$  versus constante dielétrica do solo ( $Ka$ ), parâmetro medido com sensores capacitivos e posteriormente convertido em  $\theta$ . A equação elaborada por Hilhorst é recomendada no manual do SGS3 (Decagon Devices, 2016):

$$CE_p = \frac{\varepsilon_p \cdot CE_a}{Ka - \varepsilon_{CEa=0}} \quad (10)$$

$$\varepsilon_p = 80,3 - [0,37 \cdot (T_{solo} - 20)] \quad (11)$$

Sendo:  $CE_p$  – condutividade elétrica da solução contida nos poros do solo ( $\text{dS m}^{-1}$ );  $CE_a$  – condutividade elétrica aparente ( $\text{dS m}^{-1}$ );  $\varepsilon_p$  – fator que corresponde à porção da constante dielétrica da solução dos poros do solo (adimensional);  $\varepsilon_{CEa=0}$  – porção da constante dielétrica do solo quando a  $CE_a$  é igual a zero (adimensional);  $Ka$  – constante dielétrica (adimensional);  $T_{solo}$  – temperatura do solo ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Os valores de  $CE_a$ ,  $Ka$  e  $T_{solo}$  são obtidos diretamente com o sensor, e o fator  $\varepsilon_p$  pode ser calculado com a Equação 11. Como o fator  $\varepsilon_{CEa=0}$  não é quantificável, Hilhorst (2000) recomenda o valor médio  $\varepsilon_{CEa=0} = 4,1$  para todos os tipos de solo. Em contrapartida o manual do SGS3 obteve resultados mais precisos e sugere  $\varepsilon_{CEa=0} = 6,0$ .

Alguns estudos foram conduzidos para entender melhor a relação “ $CE_a$  versus  $Ka$ ” utilizada no modelo de Hilhorst (2000) e avaliar a adequação dos valores de  $\varepsilon_{CEa=0}$  sugeridos. Rodriguez (2009) testaram a Equação 10 com o sensor 5TE (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA) e observaram que o valor sugerido  $\varepsilon_{CEa=0} = 4,1$  não descreveu bem a relação entre  $CE_a$  e  $CE_p$ . Persson (2002) realizou associação linear entre valores de  $Ka$  e  $CE_a$  em solos de texturas diferentes, para estimar o parâmetro  $\varepsilon_{CEa=0}$ . Rearranjando e fazendo a inversão da Equação 10, o autor calculou teoricamente o coeficiente angular e linear da reta:

$$Ka = \left( \frac{\varepsilon_p}{CE_p} \right) \cdot CE_a + \varepsilon_{CEa=0}$$

Persson (2002) verificou a necessidade de diferentes valores de  $\varepsilon_{CEa=0}$  para cada tipo de solo, variando entre 3,67 e 6,38. Em sequência, Aljoumani et al. (2015) também verificaram que a utilização de um valor fixo de  $\varepsilon_{CEa=0}$  não é capaz de estimar a  $CE_p$  com precisão, principalmente em condições de campo.

Straten et al. (2014) testou vários modelos de estimativa da  $CE_p$  utilizando valores de  $CE_a$  obtidos com o SGS3 em solo arenoso. Os autores observaram a existência de relação direta e simples entre as duas condutividades quando o solo é mantido próximo a saturação. Assim, propuseram os modelos: Equação 12 contendo apenas o parâmetro  $\rho$ , que pode ser calibrado para cada situação; ou, Equação 13,

baseada no modelo de Vogeler et al. (1996), que considera a umidade volumétrica do solo e parâmetro  $p_1$ :

$$CE_p = \frac{CE_a}{p} \quad (12)$$

$$CE_p = \frac{CE_a}{p_1 \cdot \theta} \quad (13)$$

Sendo:  $CE_p$  – condutividade elétrica da solução contida nos poros do solo ( $\text{dS m}^{-1}$ );  $CE_a$  – condutividade elétrica aparente ( $\text{dS m}^{-1}$ );  $p$  e  $p_1$  – parâmetro de calibração (adimensional);  $\theta$  – umidade volumétrica do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ).

A Equação 12 proposta por Straten et al. (2014) é recomendada em situações em que o solo é mantido próximo a saturação. Mesmo trabalhando com crescentes umidades, Lim et al. (2017) testaram a Equação 12 e obtiveram valores precisos de  $CE_p$  após calibração do parâmetro  $p$ . Entretanto, a precisão do modelo foi reduzida nos tratamentos com alta salinidade ( $CE_{so} > 16 \text{ dS m}^{-1}$ ).

A necessidade de calibração dos parâmetros nos modelos de Rhoades et al. (1976), Hilhorst (2000) e Straten et al. (2014) (Equações 2, 10, 12 e 13) dificultam sua aplicação prática. Apesar de alguns autores sugerirem valores médios para os parâmetros, não é claro em quais situação eles podem ser aplicados. Parte dos modelos de conversão da  $CE$  do solo são complexos e exigem grande quantidade de variáveis de difícil obtenção. Já os modelos mais simples, podem resultar em baixa precisão por não contabilizar fatores que influenciam a salinidade do solo. Poucos trabalhos descrevem a precisão de tais modelos em condição de campo (ALJOURMANI et al., 2015), em que a heterogeneidade do solo e planta podem interferir nas medidas. Portanto, a melhoria das equações que relacionam com precisão a  $CE$  da solução dos poros ( $CE_p$ ) com as demais  $CE$ , de mais fácil obtenção, continua sendo um tema interessante e promissor para a realização de novas pesquisas.

Teve-se por objetivo no presente trabalho estimar a condutividade elétrica da solução dos poros do solo com as principais equações de conversão da condutividade elétrica do solo existentes na literatura, analisar suas variáveis e validar as calibrações realizadas em laboratório com os dados de campo.

### 3.4 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.4.1 Local, solo e equipamentos

As análises do presente trabalho foram realizadas no laboratório de Ecofisiologia e Solos do *Jacob Blaustein Institute* da *Ben Gurion University of the Negev*, em Sde Boqer (30,87° N, 34,79° L), e a campo, em casas de vegetação com produção de tomate cereja (*Solanum lycopersicum*) localizadas no *Ramat Negev Research and Development Center*, em Ashalim (30,96° N, 34,69° L); ambos localizados na região sul de Israel.

O solo utilizado nas análises foi coletado nas casas de vegetação do experimento a campo no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento do *Ramat Negev*, lavado, peneirado e seco ao ar. Os atributos físicos e químicos do solo estão dispostos na TABELA 3.1. As análises do solo foram realizadas com metodologias recomendadas por Texeira et al. (2017) e Rhoades et al. (1999).

TABELA 3.1. TEXTURA, MASSA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS ( $\rho_p$ ), CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO ( $CE_{1:1}$ ), pH EM ÁGUA (pH<sub>1:1</sub>) E CTC (meq 100 g<sup>-1</sup>) APÓS PENEIRADO E LAVADO.

-- Areia (g Kg <sup>-1</sup> ) --		Silte	Argila	$\rho_p$	$CE_{1:1}$	pH <sub>1:1</sub>	CTC	N	C	H
Grossa	Fina	--- (g Kg <sup>-1</sup> ) ---		(kg m <sup>-3</sup> )	(dS m <sup>-1</sup> )	H <sub>2</sub> O	(meq 100 g <sup>-1</sup> )	----- (g Kg <sup>-1</sup> ) -----		
480,0	425,0	60,0	35,0	2710	0,27	8,60	2,7	4,1	6,9	0,7

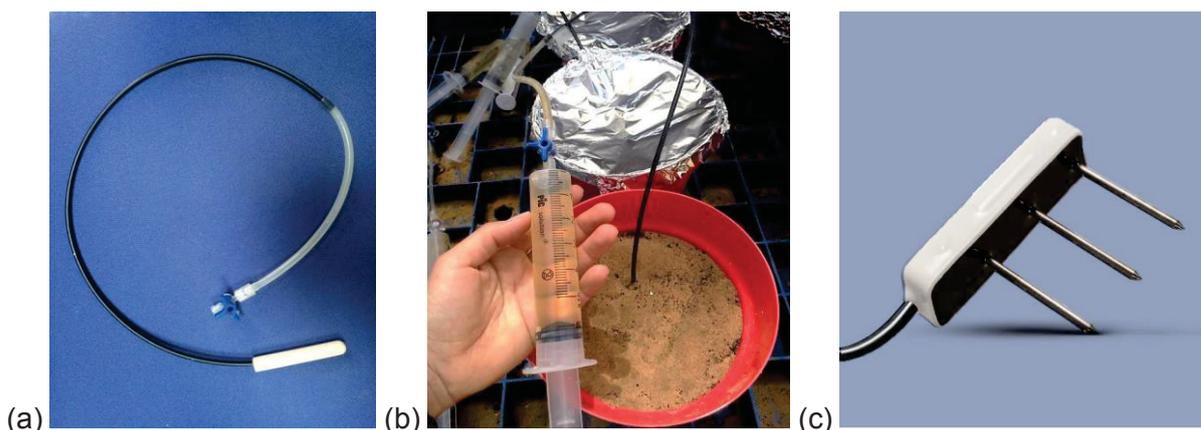
FONTE: A autora (2019)

Foram realizados os seguintes métodos de medida da salinidade do solo: Extração por relação solo-água na relação 1:1 (ERSA-1:1); Extração da solução do solo por cápsulas porosas (ESCP); e, Sensor dielétrico no domínio da frequência (SGS3) (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA). Com o ESCP obteve-se a  $CE$  da solução contida nos poros do solo ( $CE_p$ ) e com o SGS3 obteve-se a  $CE$  da massa do solo ou condutividade aparente ( $EC_a$ ), que corresponde a parte sólida, líquida e gasosa do solo. Com o ERSA-1:1 foi obtido a  $CE$  do solo diluído na relação 1:1 ( $CE_{1:1}$ ), e posteriormente transformada em  $CE_{saturado}$ .

As cápsulas porosas foram confeccionadas no departamento de Agricultura e Biotecnologia em regiões áridas da *Ben Gurion University of the Negev*, Israel. Foram utilizadas cápsulas de cerâmica cilíndricas, medindo 1,0 cm de diâmetro e 7,0 cm de comprimento. Na cavidade de cada cápsula, localizada na parte superior, foi conectado um tubo plástico de 0,3 cm de diâmetro e 60,0 cm de comprimento,

vedado com auxílio de fita veda rosca e cola epóxi (FIGURA 3.1a). Uma válvula de três vias foi encaixada na ponta do tubo plástico. Para extrair a solução do solo, foi realizada sucção com auxílio de seringa de 50 ml, acoplada à válvula de três vias (FIGURA 3.1b).

FIGURA 3.1 – CÁPSULA POROSA: a) CERÂMICA 1 X 7 CM, TUBO 0,03 X 60 CM, VÁLVULA DE TRÊS VIAS; b) SOLUÇÃO DO SOLO EXTRAÍDA PELA CÁPSULA POROSA; E, c) SENSOR DIELÉTRICO GS3.



FONTE: A autora (2019)

O Sensor GS3 (FIGURA 3.1c) é recomendado para uso em estufas e solos com condutividade elétrica aparente ( $CE_a$ ) variando entre 0 e 10  $dS\ m^{-1}$ , apresentando precisão de 10% (DECAGON DEVICES, 2016). O SGS3 é capaz de medir simultaneamente a umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ), temperatura ( $^{\circ}C$ ) e condutividade elétrica aparente ( $CE_a$ ). O sensor possui três hastes de aço de 5,5 cm de comprimento (FIGURA 3.1c). A  $CE_a$  em contato com as hastes do SGS3 é obtida multiplicando-se o inverso da resistência elétrica medida no sensor (condutância) e a constante da célula, que corresponde a razão da distância entre os dois eletrodos externos e a área que os mesmos ocupam (DECAGON DEVICES, 2016).

### 3.4.2 Experimento em vasos

Após secagem e homogeneização, o solo foi acondicionado em vasos, e os tratamentos aplicados em duas etapas. Os valores de cada tratamento foram selecionados com o objetivo de simular e extrapolar as condições verificadas em campo.

Na Primeira Etapa, soluções salinas com crescente condutividade elétrica ( $CE_{so}$ : 0,31; 2,5; 4,35 e 8,7  $dS\ m^{-1}$ ) foram aplicadas ao solo em crescentes umidades volumétricas ( $\theta$ ) até a saturação. As soluções utilizadas foram

provenientes da mistura de fertilizantes com NaCl, coletadas nos tanques de fertirrigação da casa de vegetação em Ashalim, mesmo local em que o solo foi coletado. A solução salina foi adicionada ao solo seco e a mistura foi revolvida manualmente até se obter amostra homogênea. Após úmido, a massa de solo foi novamente medida e acondicionada em vasos com o cuidado de manter a massa específica do solo ( $\rho_s$ ) próxima a  $1400 \text{ kg m}^{-3}$  em todos os vasos. Portanto, foram utilizados 0,229; 0,344; 0,477 e  $0,638 \text{ dm}^3$  de solução por vaso para obter as umidades 0,11; 0,16; 0,24 e  $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente. Os tratamentos foram dispostos em parcelas subdivididas com quatro repetições, resultando em 64 unidades experimentais (4 CE x 4  $\theta$  x 4 repetições).

Na Segunda Etapa, as soluções aplicadas no solo foram compostas por quatro sais em três níveis crescentes de condutividade elétrica. As soluções foram feitas em laboratório utilizando sais KCl,  $\text{CaCl}_2$ , NaCl e a mistura de fertilizantes comercializada como NPK 20:20:20 (TABELA 3.2; TABELA 2.2 do Capítulo I contém os componentes químicos do fertilizante utilizado). Os tratamentos foram preparados utilizando-se quatro litros de água duplamente destilada, em que o sal foi adicionado em concentrações suficientes para obter condutividades elétricas iguais a 0,36; 4,3 e  $8,8 \text{ dS m}^{-1}$  (TABELA 3.2). Os tratamentos foram dispostos em parcelas subdivididas contendo quatro repetições, resultando em 48 unidades experimentais (4 sais x 3 condutividades elétricas x 4 repetições).

Em ambas Etapas, amostras indeformadas de solo foram retiradas de todos os potes para verificar a umidade volumétrica ( $\theta$ ) e massa específica. Os vasos foram cobertos com papel alumínio para evitar a perda de água por evaporação, e as medidas de salinidade realizadas no dia seguinte. Primeiramente, foi retirada a solução coletada nas seringas acopladas às cápsulas porosas, e armazenadas em tubos plásticos de 50 ml. Os tubos foram levados para o laboratório e a  $CE_p$  analisada com o condutivímetro de bancada con150, da Eutech Instruments.

TABELA 3.2. CONCENTRAÇÃO DE SAÍIS (CS;  $\text{g L}^{-1}$ ) E SUA RESPECTIVA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA (CE;  $\text{dS m}^{-1}$ ).

----- KCl -----		----- $\text{CaCl}_2$ -----		----- NaCl -----		----- NPK 20:20:20 -----	
CS	CE	CS	CE	CS	CE	CS	CE
$\text{g L}^{-1}$	$\text{dS m}^{-1}$	$\text{g L}^{-1}$	$\text{dS m}^{-1}$	$\text{g L}^{-1}$	$\text{dS m}^{-1}$	$\text{g L}^{-1}$	$\text{dS m}^{-1}$
0,18	0,36	0,22	0,36	0,16	0,36	0,29	0,34
2,21	4,30	3,33	4,50	2,06	4,37	4,63	4,35
4,70	8,80	6,68	8,7	4,31	8,78	9,74	8,70

FONTE: A autora (2019)

Em seguida foram feitas as leituras de  $CE_a$  com o SGS3 conectado ao *datalogger* EM 50, em um vaso de cada vez, contendo apenas um sensor. Os eletrodos foram limpos após cada medição. Após instalação do sensor no solo, ficando distantes 8 cm da parede dos potes, o mesmo permaneceu no vaso tempo necessário até que os valores de  $CE_a$  permanecessem estáveis. As leituras foram obtidas com o programa ECH2O (Decagon Devices, Inc., Pullman, WA).

Após realizar a ESCP e as leituras com o SGS3, foi realizada a extração por relação solo-água na relação 1:1. Amostras do solo de cada vaso foram coletadas e secas em estufa a 105 °C, até alcançar peso constante (30 h em média). As soluções 1:1 foram obtidas pesando-se 25 g da amostra seca e 25 g de água destilada, misturando-os em agitador mecânico a 130 rpm, durante 1 h. Após 2 h de descanso a  $CE_{1:1}$  do sobrenadante foi medida com condutivímetro con150, da Eutech Instruments. A filtragem do sobrenadante foi dispensada, pois em testes prévios foi verificado que a filtragem não afetou a  $CE$  da solução, fato também relatado por Souza et al. (2013).

Para avaliar os desempenhos dos modelos de conversão da  $CE$  e medidas do SGS3 em condições de salinidade acima das observadas no campo, foram conduzidos testes com o uso de solução de NaCl nas condutividades elétricas de 16,4 e 23,6 dS m<sup>-1</sup>, e umidade volumétrica do solo de 0,32 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>.

### **3.4.3 Calibração da umidade com sensor submetido à crescentes condutividades elétricas da solução**

O SGS3 utiliza frequência de 70 MHz para medir a constante dielétrica ( $Ka$ ) do solo, que posteriormente é convertida em umidade volumétrica ( $\theta$ ) com a equação modificada de Topp et al. (1980):

$$\theta = 5,89 \cdot 10^{-6} \cdot Ka^3 - 7,62 \cdot 10^{-4} \cdot Ka^2 + 3,67 \cdot 10^{-2} \cdot Ka - 7,53 \cdot 10^{-2}$$

Sendo:  $\theta$  – umidade volumétrica de água do solo (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>);  $Ka$  – constante dielétrica (adimensional).

O solo seco foi acondicionado em potes, umedecido com soluções crescentes de  $CE$  (0,31; 2,5; 4,35 e 8,75 dS m<sup>-1</sup>), e o sensor instalado 12 h após aplicação dos tratamentos. Os valores de  $\theta$  quantificados com o método SGS3 foram comparados

com as umidades obtidas com o método Gravimétrico (TEIXEIRA et al., 2017), considerado padrão na literatura.

#### 3.4.4 Validação das equações de $CE$ a campo

O experimento a campo foi realizado para a validação dos resultados obtidos em vasos no laboratório. O experimento a campo foi conduzido em duas casas de vegetação com produção de tomate cereja situada no centro de pesquisa do *Ramat Negev*, em Ashalim. As estufas receberam dois tratamentos, sendo irrigação com solução não salina e salina, com condutividade elétrica ( $CE_{so}$ ) igual a 0,31 e 4,35 dS  $m^{-1}$ , respectivamente. As soluções via fertirrigação foram aplicadas três vezes ao dia com vazão de 2  $m^3$  pulso $^{-1}$ , no início do cultivo; e, duas vezes por dia a 2,5  $m^3$  pulso $^{-1}$ , de dezembro de 2017 a abril e 2018. Para controlar a salinidade do solo 18 sensores dielétricos e 10 cápsulas porosas foram instalados em cada estufa. Os sensores foram inseridos no solo a 15 cm de profundidade e a 20 cm das pastilhas de gotejo, sendo seis sensores no tratamento não salino e 12 no tratamento salino. Seis cápsulas porosas foram instaladas no tratamento não salino e quatro no salino, a 10 e 20 cm de profundidade.

A solução do solo foi extraída das cápsulas porosas a cada duas semanas, aplicando-se pressão de sucção pela manhã e retirando as amostras no período da tarde, ou no dia seguinte. Os dados dos sensores dielétricos foram obtidos automaticamente a cada 4 min., com *datalogger*, e enviados via rede sem fio para verificação periódica. O experimento no campo foi conduzido por todo o ciclo vegetativo da cultura do tomate, de setembro de 2017 a abril de 2018, e a  $CE_{1:1}$  não foi analisada.

#### 3.4.5 Estimativa da $CE_p$

Os modelos de conversão da  $CE$  testados foram: Rhoades et al. (1976); Rhoades et al. (1989); Mualem e Friedman (1991); Hilhorst (2000); e, Straten et al. (2014). Os modelos foram calibrados nas condições de umidade entre 0,11 e 0,32  $m^3 m^{-3}$ , em diferentes soluções iônicas e  $CE_{so} \leq 8,8$  dS  $m^{-1}$ , do experimento conduzido no laboratório. Posteriormente, realizou-se a validação dos modelos testados com os dados coletados a campo.

Admitiu-se como referência os valores de  $CE$  da solução do solo ( $CE_p$ ) medidos na solução extraída com a cápsula porosa, e não a  $CE$  da solução aplicada ( $CE_{so}$ ). No solo, há troca de íons entre as partículas e a solução, podendo parte dos íons contidos na solução aplicada ficarem adsorvidos às partículas e vice versa. Por isso, a  $CE$  medida com a ESCP é capaz de expressar a interação que existe entre a solução do solo e a parte sólida. Os valores de  $\theta$  utilizados nos modelos foram obtidos com o sensor GS3 e a equação calibrada (TABELA 3.3). Foram selecionados 5 modelos para serem testados:

**a)** Rhoades et al. (1976) (Equação 2): No cálculo do coeficiente de transmissão ( $T$ ; Equação 3) foram testados todos os coeficientes  $a_0$  e  $a_1$  sugeridos pelo autor. Ao final, foi escolhido o que melhor estimou os valores de  $CE_p$ ;

**b)** Rhoades et al. (1989): Dentre as duas equações desenvolvidas por Rhoades et al. (1989), optou-se pela forma simplificada (Equação 5). Todos os parâmetros do modelo foram calculados com as Equações 6 e 7;

**c)** Mualem e Friedman (1991): A Equação 8 foi utilizada nos tratamentos com  $\theta = 0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (saturado) e Equação 9 utilizada nos demais tratamentos. Os valores de  $CE_{saturado}$  foram obtidos com as medidas de  $CE_{1:1}$ . Baseando-se nos resultados de Matthees et al. (2017) foi utilizado o fator de conversão de 2,5 ( $CE_{saturado} = CE_{1:1} \cdot 2,5$ ).

**d)** Hilhorst (2000) (Equação 10): O fator  $\mathcal{E}_{CEa=0}$  é o único parâmetro da equação de Hilhorst não quantificável. Nas análises foram testados os seguintes valores médios:  $\mathcal{E}_{CEa=0} = 4,1$  recomendado por Hilhorst (2000) para todos os tipos de solo;  $\mathcal{E}_{CEa=0} = 6,0$  sugerido pelo manual do SGS3 (DECAGON DEVICES, 2016); e,  $\mathcal{E}_{CEa=0}$  calibrado com a ferramenta “solver” de uma Planilha Eletrônica, calculando o valor de  $\mathcal{E}_{CEa=0}$  que resultou da menor soma dos quadrados dos desvios entre os valores de  $CE_p$  medidos e estimados.

**e)** Straten et al. (2014): A Equação 12 foi utilizada nos tratamentos com  $\theta = 0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e a Equação 13 utilizada nos demais tratamentos. Foram utilizados os parâmetros  $p = 0,185$  e  $p_1 = 0,313$  sugeridos pelo autor, e  $p$  e  $p_1$  calibrados com a ferramenta “solver” de uma planilha eletrônica, resultantes da menor soma dos quadrados dos desvios entre os valores de  $CE_p$  medidos e estimados.

### 3.4.6 Análise estatística

Para calibração da umidade estimada com o sensor, as curvas de calibração foram obtidas em análises de regressão linear, associando valores de umidades estimadas com o sensor ( $\theta_{\text{sensor}}$ ) e umidades medidas com o método gravimétrico ( $\theta_{\text{gravimétrico}}$ ). Os erros obtidos com as equações calibradas foram diferenciados com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores de  $CE_p$  estimados em cada modelo foram comparados com os valores de  $CE_p$  medidos em análises de regressão linear e respectivos coeficientes de determinação ( $R^2$ ). Utilizou-se também a raiz quadrada do erro quadrático médio ( $RMSE$ ) como indicador de precisão, e a razão da média ( $MR$ ) como indicador de sub ou superestimação da  $CE_p$  em cada modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (CE_{p \text{ estimada}} - CE_{p \text{ medida}})^2}$$

$$MR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{CE_{p \text{ estimada}}}{CE_{p \text{ medida}}}$$

Sendo:  $RMSE$  – raiz quadrada do erro quadrático médio ( $\text{dS m}^{-1}$ );  $MR$  – razão da média (adimensional);  $CE_{p \text{ estimada}}$  – condutividade elétrica da solução dos poros estimada ( $\text{dS m}^{-1}$ );  $CE_{p \text{ medida}}$  – condutividade elétrica da solução dos poros medida com o método ESCP ( $\text{dS m}^{-1}$ );  $n$  – número de observações (adimensional).

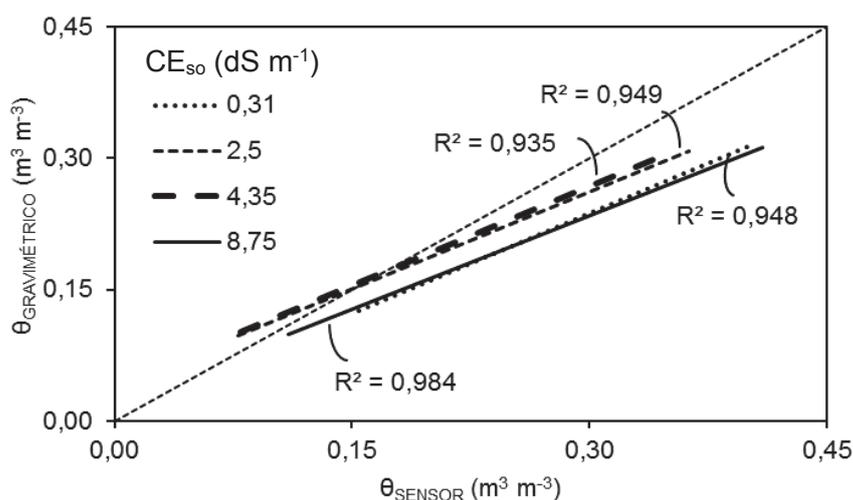
Após avaliação dos modelos com os dados do laboratório, o critério estabelecido para escolha dos modelos de melhor ajuste a serem utilizados na validação foram os que apresentaram menor  $RMSE$ , maior  $R^2$  e  $MR$  mais próximo de um ( $MR \approx 1$ ).

### 3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.5.1 Calibração da estimativa de umidade com sensor dielétrico

Em todos os tratamentos salinos testados observou-se estreita associação ( $R^2 > 0,93$ ) entre os valores de umidade volumétrica obtidas com o SGS3 vs determinada com o método Gravimétrico, indicando que o SGS3 é uma ótima alternativa para estimativa da umidade volumétrica do solo (FIGURA 3.2). No entanto, as umidades obtidas com a equação do SGS3 subestimaram a  $\theta$  em todas as salinidades (FIGURA 3.2).

FIGURA 3.2 – ANÁLISES DE REGRESSÃO LINEAR E RESPECTIVO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ( $R^2$ ) ENTRE A UMIDADE VOLUMÉTRICA DE ÁGUA NO SOLO ( $\theta$ ) OBTIDA COM O SGS3 ( $\theta_{\text{SENSOR}}$ ) VS MÉTODO GRAVIMÉTRICO ( $\theta_{\text{GRAVIMÉTRICO}}$ ), NAS SALINIDADES 0,31; 2,5; 4,35 E 8,75 dS  $\text{m}^{-1}$ .



FONTE: A autora (2019)

As retas obtidas nas associações entre  $\theta_{\text{sensor}}$  vs  $\theta_{\text{gravimétrico}}$  (FIGURA 3.2) indicaram variação dos valores de umidade devido à condutividade elétrica da solução ( $CE_{\text{so}}$ ). Para contornar o problema, realizou-se curvas de calibração para cada solução e obteve-se os respectivos erros (TABELA 3.3). As calibrações realizadas resultaram em menor erro em relação à calibração sugerida no manual do SGS3. Como não houve diferença estatística entre as calibrações ( $P > 0,05$ ), foi utilizada no presente trabalho a equação de menor erro ( $RMSE = 0,028 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), obtida com a solução  $0,31 \text{ dS m}^{-1}$ , cujo os coeficientes da regressão linear são  $a_0 = 0,015$  e  $a_1 = 0,021$  (TABELA 3.3).

TABELA 3.3 – EQUAÇÕES DE CALIBRAÇÃO E ESTATÍSTICAS DE CADA SOLUÇÃO SALINA, COMPARADAS COM A EQUAÇÃO FORNECIDA NO MANUAL DO SGS3 (CALIBRAÇÕES REALIZADAS COM OS VALORES DA CONSTANTE DIELÉTRICA  $K_a$  GERADA PELO SENSOR).

Calibrações	Equação de calibração	$R^2$ <sup>(1)</sup>	$RMSE$ <sup>(2)</sup>	$n$ <sup>(3)</sup>
Manual	$\theta = 5,89 \cdot 10^{-6} \cdot Ka^3 - 7,62 \cdot 10^{-4} \cdot Ka^2 + 3,67 \cdot 10^{-2} \cdot Ka - 7,53 \cdot 10^{-2}$	0,9211	0,050 a *	63
0,31dS m <sup>-1</sup>	$\theta = 0,0150 Ka + 0,0210$	0,9518	0,028 b	47
2,50 dS m <sup>-1</sup>	$\theta = 0,0168 Ka + 0,0268$	0,9669	0,029 b	47
4,35 dS m <sup>-1</sup>	$\theta = 0,0175 Ka + 0,0253$	0,9527	0,035 b	47
8,75 dS m <sup>-1</sup>	$\theta = 0,0144 Ka + 0,0263$	0,9865	0,031 b	47

<sup>(1)</sup> Coeficiente de determinação ( $R^2$ ); <sup>(2)</sup> Raiz quadrada do erro quadrático médio ( $RMSE$ ); <sup>(3)</sup> Número de amostras avaliadas; \*Diferente estatisticamente pelo teste de  $t$  a 5% de probabilidade. FONTE: A Autora (2019)

### 3.5.2 Ajuste dos modelos de CE

O ajuste dos modelos testados com os parâmetros sugeridos na literatura resultou em erros médios acima de 3,0 dS m<sup>-1</sup> (TABELA 3.4). Após a calibração dos parâmetros, as Equações 10 (HILHORST, 2000;  $RMSE = 0,86$ ), 12 e 13 (STRATEN et al., 2014;  $RMSE = 1,18$ ) proporcionaram as melhores estimativas da  $CE_p$  nas condições estudadas (solo arenoso;  $CE_p \leq 8,8$  dS m<sup>-1</sup>;  $0,11 \leq \theta \leq 0,32$  m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>; e, diferentes soluções iônicas).

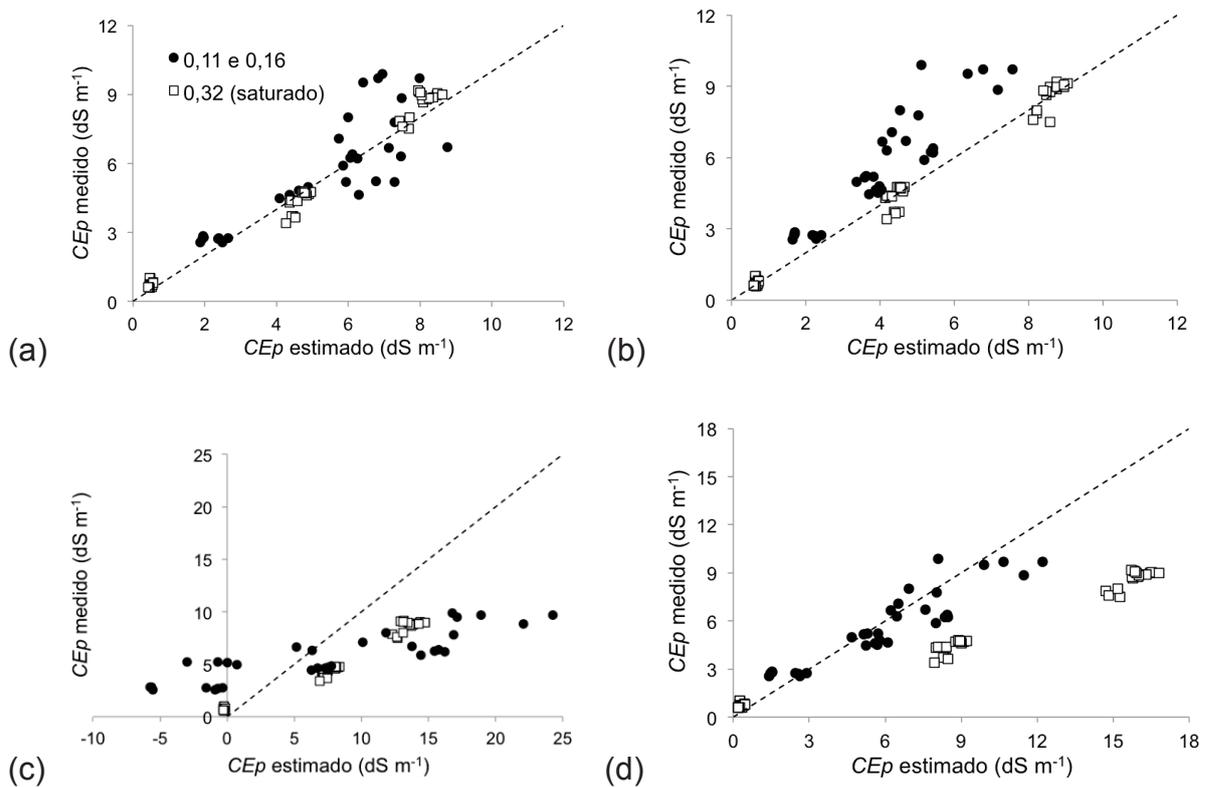
TABELA 3.4. RAIZ QUADRADA DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO ( $RMSE$ ), RAZÃO DA MÉDIA ( $MR$ ) E COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ( $R^2$ ) OBTIDOS COM OS MODELOS TESTADOS AO CONVERTER A  $CE_a$  EM  $CE_p$ , NOS TRATAMENTOS CONSIDERANDO DIFERENTES COMPOSIÇÕES SALINAS, CRESCENTE SALINIDADE E UMIDADE.

Modelos	Parâmetros	$RMSE$ (dS m <sup>-1</sup> )	$MR$ ---- adimensional --	$R^2$
----- Análises com parâmetros sugeridos na bibliografia -----				
Rhoades et al. (1976)	$a = 1,382; b = -0,093; CE_s = 0,18^{(a)}$	5,39	1,128	0,770
Rhoades et al. (1989)		4,09	1,358	0,845
Mualen e Friedman (1991)		5,31	0,123	0,259
Hilhorst et al. (2000)	$\mathcal{E}_{CEa=0} = 4,1^{(b)}$	4,51	1,238	0,384
	$\mathcal{E}_{CEa=0} = 6,0^{(c)}$	51,65	1,673	0,050
Straten et al. (2014)	$p_1 = 0,313; p = 0,185^{(d)}$	3,20	1,351	0,766
----- Análises com parâmetro calibrados -----				
Hilhorst et al. (2000)	$\mathcal{E}_{CEa=0} = 2,65$	0,858	0,924	0,915
Straten et al. (2014)	$p_1 = 0,518; p = 0,208$	1,175	0,951	0,857

<sup>(a)</sup> Rhoades et al. (1976); <sup>(b)</sup> Hilhorst (2000); <sup>(c)</sup> Decagon Devices (2016); <sup>(d)</sup> Straten et al. (2014); Número de medidas igual a 112. FONTE: A Autora (2019).

Os parâmetros  $a_0 = 1,382$ ,  $a_1 = -0,093$  e  $CE_s = 0,18$  sugeridos por Rhoades et al. (1976) foram os que proporcionaram melhores estimativas da  $CE_p$  com a utilização da Equação 2 ( $RMSE = 5,39$  dS  $m^{-1}$ ; TABELA 3.4). Todos pontos de  $CE_p < 2$  medidos com a capsula porosa resultaram em valores de salinidade negativos, indicando que o modelo não respondeu bem em condições de baixa salinidade do solo (FIGURA 3.3c), fato também observado por Rhoades et al. (1989) e Friedman (2005) para valores de  $CE_p < 4$  dS  $m^{-1}$ .

FIGURA 3.3 – ANÁLISES DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA SOLUÇÃO DOS POROS ( $CE_p$ ) MEDIDA COM A CÁPSULA POROSA E  $CE_p$  ESTIMADA COM OS MODELOS TESTADOS, NAS UMIDADES 0,11-0,16 e 0,32  $m^3 m^{-3}$  (SOLO SATURADO): a) HILHORST (2000), PARAMETRO CALIBRADO ( $\mathcal{E}_{CE_s=0} = 2,65$ ); b) STRATEN et al. (2014), PARÂMETROS CALIBRADOS ( $p_1 = 0,518$ ;  $p = 0,208$ ); c) RHOADES et al. (1976); E, d) RHOADES et al. (1989).



FONTE: A autora (2019)

O modelo de Rhoades et al. (1989; Equação 5) se mostrou melhor e mais coerente em relação à Rhoades et al. (1976), apresentando menor erro ( $RMSE = 4,09$ ) e não obtendo valores negativos na estimativa de  $CE_p$  quando submetidos a baixas salinidades (TABELA 3.4; FIGURA 3.3d). O modelo é mais complexo e trabalhoso, mas possibilita o cálculo de todos os fatores utilizando três

parâmetros de fácil obtenção (% de argila  $A\%$ ; umidade volumétrica  $\theta$ ; e, volume de poros total do solo  $\alpha$ ), eliminando a necessidade de calibração. Observou-se nas análises que pequenas alterações da  $A\%$  refletiram em grandes alterações na estimativa da  $CE_p$ , indicando sensibilidade do modelo ao parâmetro e a necessidade de atenção na obtenção nos percentuais de argila ( $A\%$ ) em solo arenoso.

A equação de Mualem e Friedman (1991) subestimou a  $CE_p$  ( $MR = 0,12$ ) e a análise de regressão resultou em alta dispersão ( $R^2 = 0,26$ ) entre valores da  $CE$  medidos e estimados. Diferente dos demais modelos testados, as Equações 8 e 9 utilizam valores de  $CE_{\text{saturado}}$ . Hanson et al. (2006), Rhoades et al. (1999) e Hardie e Doyle (2012) consideram que o método com diluição da solução do solo, como realizado na extração da pasta saturada e do extrato 1:1, resulta em maiores desvios devido a dissolução de minerais, hidrólise de íons e mudança dos cátions trocáveis entre as partículas e a solução do solo. Além disso, a  $CE_{\text{saturado}}$  foi estimada com os valores de  $CE_{1:1}$  medidos, o que pode ter contribuído para a ocorrência dos desvios. Por esses motivos, acredita-se que as equações para solo saturado e não saturado do modelo de Mualem e Friedman (1991) não estimaram  $CE_p$  com precisão.

Dentre os parâmetros sugeridos para o modelo de Hilhorst, sendo  $\mathcal{E}_{CEa=0} = 6,0$  (DECAGON DEVICES, 2016) e  $\mathcal{E}_{CEa=0} = 4,1$  (HILHORST, 2000), a relação entre  $CE_a$  e  $CE_p$  nas condições estudadas foi melhor explicada por  $\mathcal{E}_{CEa=0} = 4,1$  (TABELA 3.4). O  $\mathcal{E}_{CEa=0} = 6,0$  sugerido no manual do sensor GS3 converteu a  $CE_a$  com certa precisão nas condições de solo saturado. Porém, grandes erros foram obtidos no tratamento com menor umidade ( $\theta = 0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), principalmente quando combinado à alta salinidade ( $CE_{so} = 8,8 \text{ dS m}^{-1}$ ), resultando em erro médio igual a  $51,65 \text{ dS m}^{-1}$ .

Mesmo considerando a relação entre  $CE_a$  e  $CE_p$  como direta e simples, o modelo e parâmetros sugeridos por Straten et al. (2014) proporcionaram os menores erros (TABELA 3.4). Os parâmetros sugeridos por Straten et al. (2014) foram calibrados em solo arenoso, mesma condição do solo utilizado no presente trabalho, o que deve ter contribuído para os resultados. Considerando que o modelo não utiliza variáveis ligadas à estrutura ou textura do solo para estimar a  $CE$  da solução dos poros, os parâmetros  $p$  e  $p1$  (Equação 12 e 13) recomendados na literatura (STRATEN et al., 2014) talvez não se ajustem a outros tipos de solo.

A calibração dos parâmetros nas equações de Hilhorst et al. (2000) e Straten et al. (2014) reduziram os erros ( $RMSE < 1,2 \text{ dS m}^{-1}$ ), possibilitando a obtenção de valores próximos aos medidos ( $MR = 0,924$  e  $0,951$ , respectivamente; TABELA 3.4). O erro obtido com os parâmetros calibrados não foi menor devido à falta de ajuste das  $CE$  medidas nos tratamentos com baixa umidade (FIGURA 3.3a,b). Quando isolado os tratamentos com umidade próxima à saturação, verificou-se erro resultante da conversão de  $0,496 \text{ dS m}^{-1}$  com a equação de Hilhorst et al. (2000) e  $0,335 \text{ dS m}^{-1}$  com a equação de Straten et al. (2014).

Com exceção do modelo de Rhoades et al. (1989), os demais modelos testados estimaram a  $CE_p$  com maior precisão nas condições de solo saturado ou próximo a saturação (FIGURA 3.3). Mesmo nos modelos mais detalhados, a estimativa da salinidade da solução do solo, assim como sua medição, é dificultada em condições de solo seco. Um teste realizado com as cápsulas porosas, anterior ao experimento, demonstrou não ser possível extrair a solução do solo quando a  $\theta$  estiver abaixo de  $9 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Além disso, em solos com baixa umidade, os eletrodos do sensor permanecem em maior contato com a parte sólida e gasosa do solo do que com a solução. Como os íons constituintes dos coloides e rochas do solo, assim como o gás, são elementos não condutivos (FRIEDMAN, 2005), quanto menor volume de solução nos poros, mais difícil se torna a medida de  $CE$  pelo sensor. No Capítulo I é possível observar que as medidas de  $CE_a$  atingiram valor máximo de  $0,3 \text{ dS m}^{-1}$  no tratamento com menor  $\theta$ , ao passo que o acréscimo da umidade gerou aumento consistente nas leituras de salinidade (FIGURA 2.4b). Logo, os resultados obtidos seguiram a mesma tendência dos encontrados em estudos de Rhoades et al. (1976, 1990) e Friedman (2005), que recomendam que as medições de  $CE_a$  sejam feitas quando os valores de  $\theta$  forem os mais altos possíveis.

### 3.5.3 Calibração dos parâmetros dos modelos de Hilhorst e Straten

Calibrando os valores de  $\mathcal{E}_{CEa=0}$ ,  $p$  e  $p1$  das Equações 10, 12 e 13 em cada tratamento, observou-se que os parâmetros em ambos modelos variaram entre umidades e íons da solução analisados (TABELA 3.5). Novamente, os maiores erros ( $RMSE$ ) foram obtidos nas calibrações realizadas com os tratamentos com menor umidade. Persson (2002) verificou em seu trabalho a necessidade de diferentes

valores de  $\mathcal{E}_{CEa=0}$ , para cada tipo de solo, variando entre 3,67 e 6,38. Aljoumani et al. (2015) também verificaram que a utilização de um valor fixo de  $\mathcal{E}_{CEa=0}$  não é capaz de estimar a  $CE_p$  com precisão. Portanto, a calibração dos parâmetros nos modelos de  $CE$  do solo é necessária para estimativas precisas de  $CE_p$ .

TABELA 3.5. RAIZ QUADRADA DO ERRO QUADRÁTICO MÉDIO ( $RMSE$ ), RAZÃO DA MÉDIA ( $MR$ ) E COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO ( $R^2$ ), OBTIDOS APÓS CALIBRAÇÃO DO PARÂMETRO  $\mathcal{E}_{CEa=0}$  DA EQUAÇÃO DE HILHORST (2000), NOS TRATAMENTOS INDIVIDUALMENTE.

Tratamentos	----- HILHORST (2000) -----				----- STRATEN et al. (2014) -----			
	$\mathcal{E}_{CEa=0}$ (ad.)	$RMSE$ (dS m <sup>-1</sup> )	$MR$ (ad.)	$R^2$ (ad.)	$p_1$ e $p$ (ad.)	$RMSE$ (dS m <sup>-1</sup> )	$MR$ (ad.)	$R^2$ (ad.)
----- Umidade (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) -----								
0,11	2,45	1,362	0,918	0,638	0,332 (a)	0,754	1,018	0,869
0,16	3,30	0,954	1,029	0,865	0,411 (a)	0,586	1,036	0,953
0,24	2,73	0,386	1,020	0,982	0,610 (a)	0,353	1,020	0,986
0,32	4,16	0,582	0,917	0,970	0,593 (a)	0,473	0,914	0,988
----- Íons em solução (umidade=0,32 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) -----								
KCl	3,32	0,322	0,863	0,993	0,203 (b)	0,186	0,906	0,999
CaCl <sub>2</sub>	3,39	0,305	0,935	0,991	0,202 (b)	0,089	0,999	0,999
NaCl	4,16	0,412	0,950	0,986	0,202 (b)	0,109	0,982	0,999
NPK	2,05	0,469	0,946	0,975	0,228 (b)	0,298	1,001	0,990

(a)  $p_1$ , Equação 13; (b)  $p$ , Equação 12 para solos saturados. FONTE: A Autora (2019).

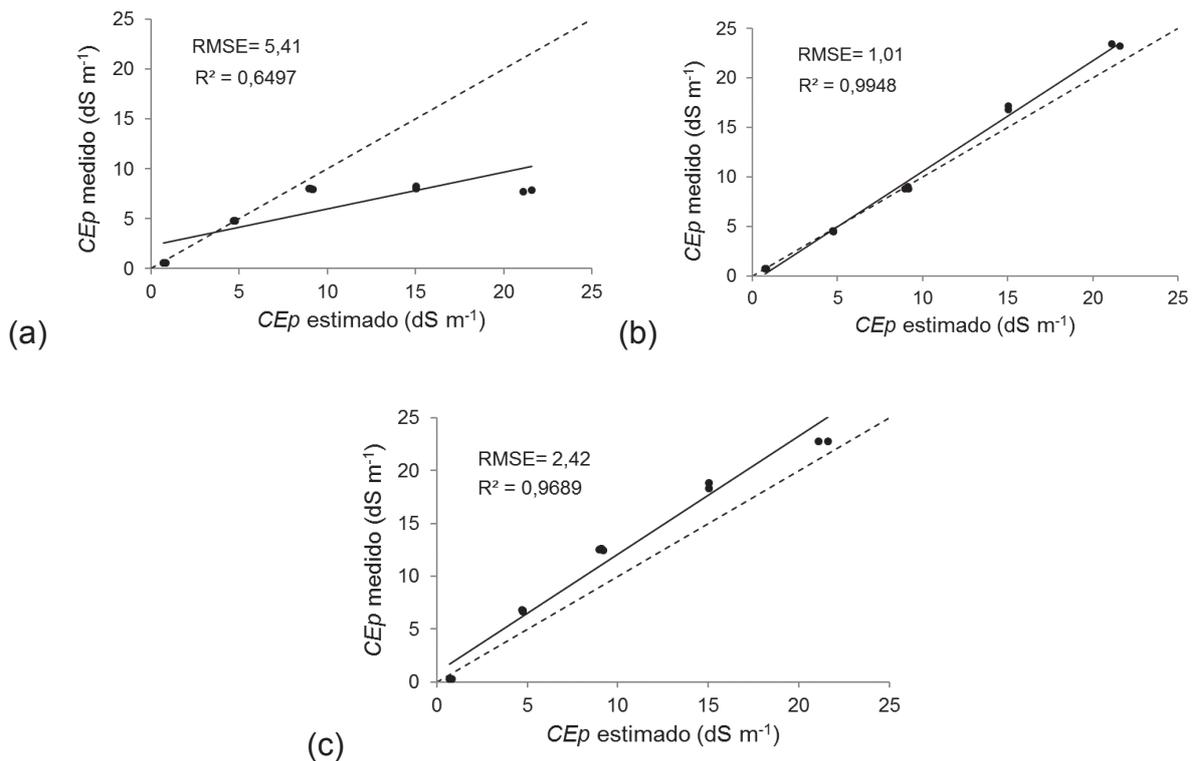
### 3.5.4 Ajuste das equações no teste de alta condutividade elétrica

Devido a falta de ajuste aos dados, os modelos de Rhoades et al. (1976) e Mualem e Friedman (1991) não foram utilizados no teste com alta salinidade. Na FIGURA 3.4a verifica-se que a equação de Hilhorst subestimou os valores de  $CE_p$  medidos na capsula porosa quando a  $CE_p$  foi superior a 10 dS m<sup>-1</sup>, não sendo possível obter nenhum valor do parâmetro  $\mathcal{E}_{CEa=0}$  capaz de estimar a condutividade elétrica da solução dos poros. O resultado contraria o observado por Hilhorst (2000), o qual estabeleceu  $\theta < 0,1$  m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> como o único critério limitante do modelo.

As equações de Straten et al. (2014) e Rhoades et al. (1989) tiveram melhor desempenho em alta salinidade (FIGURA 3.4b,c), principalmente a Equação 12 para solo saturado. Porém, o sensor capacitivo GS3 (Decagon Devices) superestimou os valores de umidade quando submetido à salinidade superior a 10 dS m<sup>-1</sup>, obtendo umidades médias de 0,540 e 0,605 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> nas soluções de  $CE_{so}$  igual a 16,4 e 23,6 dS m<sup>-1</sup>, respectivamente. Tais resultados são inconsistentes, pois o volume total de

poros do solo ( $\alpha$ ) estudado é igual a  $0,48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Deste modo, o modelo de Straten para solo saturado (Equação 12) foi o que melhor se adequou, pois não leva em conta os valores de  $\theta$  superestimados com o sensor.

FIGURA 3.4 – ANÁLISES DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA SOLUÇÃO DOS POROS ( $CE_p$ ) MEDIDA PELA CAPSULA POROSA, E  $CE_p$  ESTIMADA PELOS MODELOS: a) HILHORST (2000), PARÂMETRO CALIBRADO ( $\mathcal{E}_{CE_a=0} = 2,65$ ); b) STRATEN et al. (2014), PARÂMETRO CALIBRADO ( $\rho = 0,208$ ); E, c) RHOADES et al. (1989); NAS SALINIDADES DE  $0,31$  A  $23,6 \text{ dS m}^{-1}$ , NA UMIDADE DE SATURAÇÃO,  $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .



FONTE: A Autora (2019)

### 3.5.5 Validação a campo

As calibrações em laboratório foram realizadas associando apenas um valor de  $CE_a$  com um valor de  $CE_p$ , para cada tratamento. No campo, a validação dos modelos foi dificultada, pois várias leituras do SGS3 foram comparadas com uma única medida da cápsula porosa. Para isso, foram realizadas médias da  $CE_a$  medidas em seis sensores durante todo o período em que as cápsulas porosas ficaram submetidas à vácuo. Neste período, que compreendeu em média 4 h, houve variação nas leituras de temperatura, umidade do solo e condutividade elétrica aparente. Os modelos de Rhoades et al. (1989), Hilhorst (2000) e Straten et al.

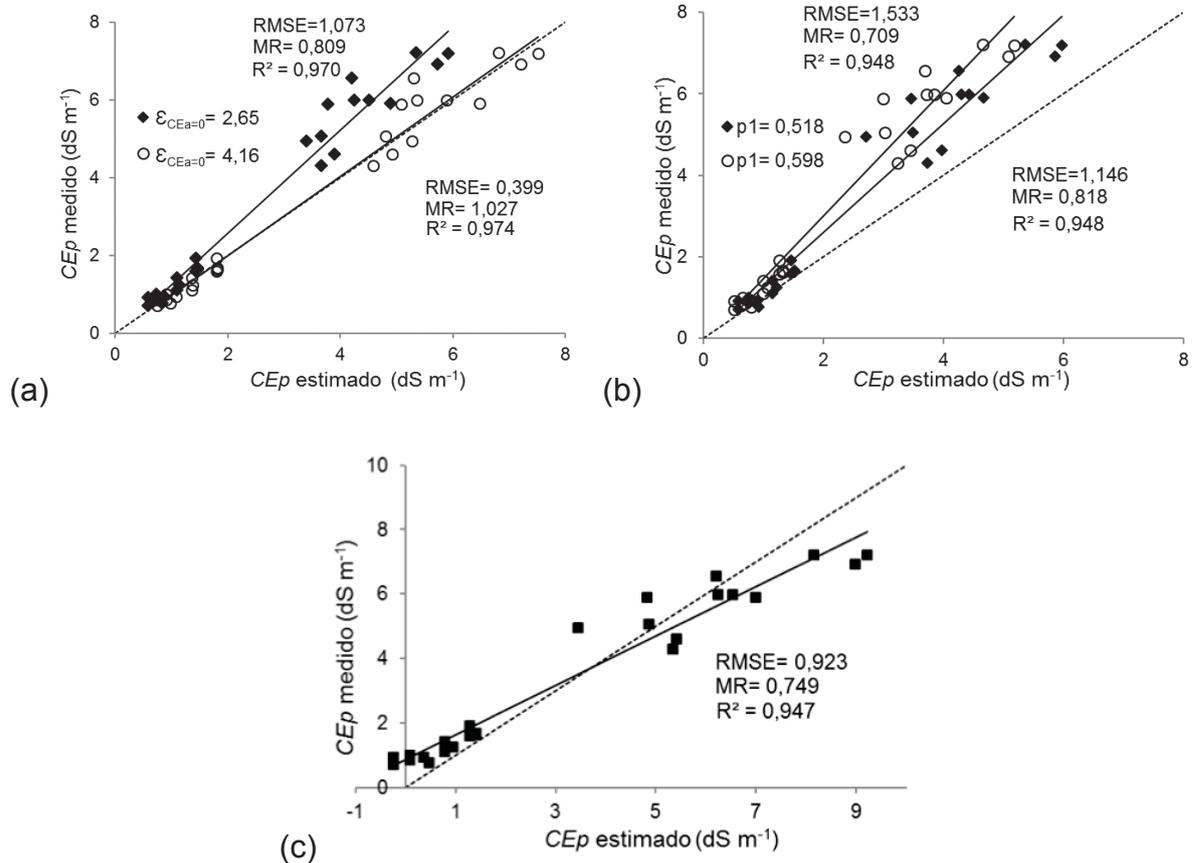
(2014) foram selecionados para validação, pois tiveram os melhores desempenhos nas avaliações no laboratório (menores  $RMSE$ ;  $MR \cong 1$ ;  $R^2 \cong 1$ ).

Conforme discutido anteriormente, as soluções com diferentes íons e crescentes umidades do solo interferiram na calibração dos parâmetros nas equações de Hilhorst e Straten (TABELA 3.5), e as maiores umidades volumétricas do solo forneceram leituras e estimativas de condutividades elétricas mais precisas. Por isso, a validação foi realizada tanto com os parâmetros calibrados em todos os tratamentos como em condições “ótimas”, sendo alta umidade, solução de NaCl, mesmo sal utilizado nas soluções de fertirrigação do campo,  $\mathcal{E}_{CEa=0} = 4,16$  e  $p1 = 0,598$  (TABELA 3.4).

Os valores estimados com a modelo de Hilhorst e  $\mathcal{E}_{CEa=0} = 4,16$ , ficaram muito próximos das leituras obtidas com a cápsula porosa. Em média, os resultados obtidos na validação superestimaram a  $CE_p$  em apenas  $0,027 \text{ dS m}^{-1}$  ( $MR$ ) e tiveram erro menor que o observado em laboratório ( $RMSE = 0,399 \text{ dS m}^{-1}$ ; FIGURA 3.5a). O maior desvio da  $CE_p$  estimada com  $\mathcal{E}_{CEa=0} = 2,65$ , calibrado com os dados de todos os tratamentos, demonstrou sensibilidade do parâmetro  $\mathcal{E}_{CEa=0}$  às variáveis analisadas. No entanto, o parâmetro de melhor ajuste ( $\mathcal{E}_{CEa=0} = 4,16$ ) ficou bem próximo do sugerido na literatura ( $\mathcal{E}_{CEa=0} = 4,1$ ; HILHORST, 2000). Logo, em solos arenosos, o parâmetro “genérico” pode ser utilizado em condições de campo com a perspectiva de obtenção de baixos erros. Contudo, para outros tipos de solo, estudos científicos e outras finalidades que necessitam maior precisão, a Equação 10 deve ser calibrada para cada situação.

O contrário ocorreu com o modelo de Straten et al. (2014), em que o menor  $RMSE$  foi obtido com parâmetro  $p1$  calibrado para todos os tratamentos (FIGURA 3.5b). Em condições de laboratório, a equação de Rhoades (Equação 5) obteve erros maiores do que a de Straten (TABELA 3.4), mas na validação encontrou-se o contrário. O modelo de Straten (Equação 13) para solos não saturados apresentou piores ajustes em campo, quando comparado com os modelos de Hilhorst e Rhoades (FIGURA 3.5). Os resultados deveram-se provavelmente a simplicidade da equação, não considerando variáveis que comprovadamente interfere nas medidas de  $CE$ , como a temperatura (RHOADES et al., 1999; HARDIE; DOYLE, 2012).

FIGURA 3.5 – ANÁLISES DE REGRESSÃO LINEAR ENTRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA SOLUÇÃO DOS POROS ( $CE_p$ ) MEDIDA COM A CÁPSULA POROSA, E  $CE_p$  ESTIMADA COM OS MODELOS: a) HILHORST, COM PARÂMETRO CALIBRADO EM TODOS OS TRATAMENTOS ( $\varepsilon_{CEa=0} = 2,65$ ) E EM CONDIÇÕES ÓTIMAS ( $\varepsilon_{CEa=0} = 4,16$ ); b) STRATEN, COM PARÂMETRO CALIBRADO EM TODOS OS TRATAMENTOS ( $p1 = 0,518$ ) E EM CONDIÇÕES ÓTIMAS ( $p1 = 0,598$ ); E, c) RHOADES (EQUAÇÃO 5)



FONTE: A Autora (2019)

As análises realizadas no presente trabalho evidenciaram que a calibração dos modelos em laboratório não é perfeitamente adequada para descrever a situação da condutividade elétrica a campo, principalmente para o modelo de Straten. Por isso, recomenda-se que a calibração dos modelos seja feita diretamente no campo. Estudos que considerem outros tipos de solo são necessários, para possibilitar melhor entendimento da questão.

### 3.6 CONCLUSÕES

- A calibração dos parâmetros nos modelos de Hilhorst e Straten proporcionaram melhores estimativas da condutividade elétrica da solução dos poros ( $CE_p$ ) em laboratório;
- Os modelos de conversão da condutividade elétrica estimaram a  $CE_p$  com maior precisão nas condições de solo saturado ou próximo a saturação;
- A equação para solos saturados de Straten foi a que melhor estimou os valores de  $CE_p$  no teste de alta condutividade, por não utilizar valores de umidade volumétrica do solo superestimados pelo sensor GS3;
- Os parâmetros de calibração das equações de condutividade elétrica são sensíveis às condições ambientais, por isso devem ser calibrados em condições semelhantes à de campo;
- O modelo de Hillhorst, desenvolvido para ser usado com sensores capacitivos e sugerido no manual do sensor GS3, apresentou o menor erro na estimativa da  $CE_p$  em campo, porém apresentou limitação quando a  $CE_p$  foi superior a  $10 \text{ dS m}^{-1}$ .

### 3.7 REFERÊNCIAS

- ALJOUMANI, B.; SÀNCHEZ-ESPIGARES, J. A.; CAÑAMERAS, N.; JOSA, R. An advanced process for evaluating a linear dielectric constant–bulk electrical conductivity model using a capacitance sensor in field conditions. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 10, p. 1828-1839, 2015.
- BISWAS, T. K.; DALTON, M.; BUSS, P.; SCHRALE, G. Evaluation of salinity-capacitance probe and suction cup device for real time soil salinity monitoring in South Australian irrigated horticulture. In: Trans 2<sup>nd</sup> International Symposium on Soil Water Measurement Using Capacitance and Impedance and Time Domain Transmission. November, 2007.
- DECAGON DEVICES. Operator's manual: GS3, Water content, EC and Temperature sensors. Washington, USA, 2016.
- FRIEDMAN, S. P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. **Computers and electronics in agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 45-70, 2005.
- GRISSE, R. D.; ALLEY, M. M.; HOLSHOUSER, D. L.; THOMASON, W. E. Precision Farming Tools. Soil Electrical Conductivity. **Virginia Polytechnic Institute and State University**, 2009.

HANSON, B.; GRATTAN, S. R.; FULTON, A. **Agricultural salinity and drainage**. University of California Irrigation Program, University of California, Davis. 2006.

HARDIE, M.; DOYLE, R. Measuring soil salinity. In: **Plant Salt Tolerance**. Humana Press, Totowa, NJ, 2012. p. 415-425.

HILHORST, M. A. A pore water conductivity sensor. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 1922-1925, 2000.

LIM, S. J.; SHIN, M. N.; SON, J. K.; SONG, J. D.; CHO, K. H.; LEE, S. H.; CHO, J. Y. Evaluation of soil pore-water salinity using a Decagon GS3 sensor in saline-alkali reclaimed tidal lands. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 132, p. 49-55, 2017.

MALICKI, M. A. et al. Determining soil salinity from simultaneous readings of its electrical conductivity and permittivity using TDR. In: **Proceedings of the Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Evanston**. 1994. p. 7-9.

MATTHEES, Heather L. et al. Predicting soil electrical conductivity of the saturation extract from a 1: 1 soil to water ratio. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 18, p. 2148-2154, 2017.

MUALEM, Y.; FRIEDMAN, S. P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resources Research**, v. 27, n. 10, p. 2771-2777, 1991.

PERSSON, Magnus. Evaluating the linear dielectric constant-electrical conductivity model using time-domain reflectometry. **Hydrological sciences journal**, v. 47, n. 2, p. 269-277, 2002.

RHOADES, J. D. Predicting Bulk Soil Electrical Conductivity versus Saturation Paste Extract Electrical Conductivity Calibrations from Soil Properties 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 1, p. 42-44, 1981.

RHOADES, J. D.; CHANDUVI, F. **Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements**. Food & Agriculture Org., 1999.

RHOADES, J. D.; MANTEGHI, N. A.; SHOUSE, P.J.; ALVES, W.J. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 53:433-439. 1989.

RHOADES, J. D.; RAATS, P. A. C.; PRATHER, R. J. Effects of Liquid-phase Electrical Conductivity, Water Content, and Surface Conductivity on Bulk Soil Electrical Conductivity 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, n. 5, p. 651-655, 1976.

RHOADES, J. D.; SHOUSE, P. J.; ALVES, W. J.; MANTEGHI, N. A.; LESCH, S. M. Determining soil salinity from soil electrical conductivity using different models and estimates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, n. 1, p. 46-54, 1990.

RODRIGUEZ, F.R. A. **Calibrating capacitance sensors to estimate water content, matric potential, and electrical conductivity in soilless substrates.** Tese Doutorado, University of Maryland. 2009. Disponível em: [https://drum.lib.umd.edu/bitstream/handle/1903/10241/ArguedasRodriguez\\_umd\\_0117N\\_11061.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://drum.lib.umd.edu/bitstream/handle/1903/10241/ArguedasRodriguez_umd_0117N_11061.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

SAMSON, M. E., CARON, J., PEPIN, S., PARYS, B., & FORTIN, J. Precision and accuracy of time-domain reflectometry and capacitive probes to determine soil electrical conductivity in cranberry production. **Canadian journal of soil science**, v. 97, n. 1, p. 31-37, 2017.

SHAINBERG, I.; RHOADES, J. D.; PRATHER, R. J. Effect of Exchangeable Sodium Percentage, Cation Exchange Capacity, and Soil Solution Concentration on Soil Electrical Conductivity 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 3, p. 469-473, 1980.

SOUZA, E. R. MELO, H.F.; ALMEIDA, B. G.; MELO, D.V.M. Comparação de métodos de extração da solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 17, n. 5, 2013.

STRATEN, G. V.; VOS, A.; VLAMING, R.; OOSTERBAAN, R. Dielectric sensors in an automated facility for testing salt tolerance of irrigated field crops. **Paper**. 18th World Congress of CIGR, Beijing. September, 2014.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de Métodos de Análise de Solo. **Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 2017.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, 16(3), 574–582. 1980.

VOGELER, I.; CLOTHIER, B. E.; GREEN, S. R.; SCOTTER, D. R.; TILLMAN, R. W. Characterizing water and solute movement by time domain reflectometry and disk permeametry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 1, p. 5-12, 1996.

#### 4 CONCLUSÃO GERAL

Baixas umidades volumétricas do solo dificultaram as medidas de  $CE$  do solo com os métodos da cápsula porosa e sensor, sendo os valores de  $CE$  aparente os mais influenciados pela umidade. Os íons em solução influenciaram as medidas de  $CE$  em todos os métodos utilizados, a solução com fertilizante NPK subestimou a condutividade elétrica do solo, e o sal NaCl superestimou as condutividades elétricas aparente ( $CE_a$ ) e da solução dos poros ( $CE_p$ ), sendo a maior dispersão das leituras de  $CE$  observada com o método ERSA-1:1. Os modelos de conversão da  $CE$  testados, estimaram a  $CE_p$  com maior precisão nas condições de solo saturado ou próximo a saturação. A calibração dos parâmetros dos modelos de Hilhorst e Straten proporcionaram melhores estimativas da condutividade elétrica da solução dos poros em laboratório, e o modelo de Hillhorst, desenvolvido para ser usado com sensores capacitivos e sugerido no manual do sensor GS3, apresentou menor erro na estimativa da  $CE_p$  em campo; porém, apresentou limitação quando a  $CE_p$  foi superior a  $10 \text{ dS m}^{-1}$ . No teste de alta condutividade, a equação para solos saturados de Straten foi a que melhor estimou os valores de  $CE_p$ , por não utilizar os valores de umidade volumétrica do solo superestimados pelo sensor GS3 em condições de  $CE_{so} > 16 \text{ dS m}^{-1}$ . Os parâmetros de calibração das equações são sensíveis às condições ambientais, por isso devem ser calibrados em condições semelhantes à de campo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O teste de alta condutividade elétrica foi realizado para fins de pesquisa, pois a maioria das plantas cultivadas não produziriam em ambientes tão salinos. Estudos que abordem outros tipos de solo são necessários para o melhor entendimento de como as *CE*'s do solo, medida em cada metodologia, se associariam com os íons aplicados em solução e crescentes umidades volumétricas do solo. Maior número de variáveis do solo também precisa ser considerado, para permitir identificar as propriedades do solo que mais influenciam os parâmetros empíricos utilizados nos modelos de *CE*. Assim, ao invés de utilizar valores empíricos, seria possível estabelecer equações capazes de estimar os parâmetros para cada situação.

## REFERÊNCIAS GERAIS

- ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and electronics in agriculture**, v. 44, n. 1, p. 71-91, 2004.
- ALJOURMANI, B.; SÀNCHEZ-ESPIGARES, J. A.; CAÑAMERAS, N.; JOSA, R. An advanced process for evaluating a linear dielectric constant–bulk electrical conductivity model using a capacitance sensor in field conditions. **Hydrological Sciences Journal**, v. 60, n. 10, p. 1828-1839, 2015.
- BISWAS, T. K.; DALTON, M.; BUSS, P.; SCHRALE, G. Evaluation of salinity-capacitance probe and suction cup device for real time soil salinity monitoring in South Australian irrigated horticulture. In: Trans 2<sup>nd</sup> International Symposium on Soil Water Measurement Using Capacitance and Impedance and Time Domain Transmission. November, 2007.
- BRESLER, E.; MCNEAL, B. L.; CARTER, D.L. **Saline and Sodic Soils: Principles–Dynamics Modeling**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1982.
- BREVIK, E. C.; FENTON, T. E. Influence of soil water content, clay, temperature, and carbonate minerals on electrical conductivity readings taken with an EM-38. **Soil Horizons**, v. 43, n. 1, p. 9-13, 2002.
- BREVIK, E. C.; FENTON, T. E.; LAZARI, A. Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. **Precision Agriculture**, v. 7, n. 6, p. 393-404, 2006.
- CARMO, D. L. D.; SILVA, C. A.; LIMA, J. M. D.; PINHEIRO, G. L. Electrical Conductivity and Chemical Composition of Soil Solution: Comparison of Solution Samplers in Tropical Soils. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.
- DECAGON DEVICES. Operator's manual: GS3, Water content, EC and Temperature sensors. Washington, USA, 2016.
- DIAS, N.S.; DUARTE, S.N.; GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F.; SOARES, T.M. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade do solo sob ambiente protegido, utilizando-se de extratores de solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, n.4, p.496-504, 2005.
- FREIRE, A. L. O.; SARAIVA, V. P.; MIRANDA, J. R. P.; BRUNO, G. B. Crescimento, acúmulo de íons e produção de tomateiro irrigado com água salina. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 1, 2010.
- FRIEDMAN, S. P. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. **Computers and electronics in agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 45-70, 2005.
- GRISSE, R. D.; ALLEY, M. M.; HOLSHOUSER, D. L.; THOMASON, W. E. Precision Farming Tools. Soil Electrical Conductivity. **Virginia Polytechnic Institute and State University**, 2009.

GROBLER, L.; CLAASSENS, A. S.; ANNANDALE, J. G. Ceramic suction samplers: A reliable method for extracting soil solutions for analysis. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 20, n. 3, p. 161-164, 2003.

HANSON, B.; GRATTAN, S. R.; FULTON, A. **Agricultural salinity and drainage**. University of California Irrigation Program, University of California, Davis. 2006.

HARDIE, M.; DOYLE, R. Measuring soil salinity. In: **Plant Salt Tolerance**. Humana Press, Totowa, NJ, 2012. p. 415-425.

HILHORST, M. A. A pore water conductivity sensor. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 1922-1925, 2000.

KÖPPPEN, W.G.; GEIGER, R.M. Handbuch der Klimatologie. Berlin, Verlag von G. Boentraeger, 1936.

LIM, S. J.; SHIN, M. N.; SON, J. K.; SONG, J. D.; CHO, K. H.; LEE, S. H.; CHO, J. Y. Evaluation of soil pore-water salinity using a Decagon GS3 sensor in saline-alkali reclaimed tidal lands. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 132, p. 49-55, 2017.

MAAS, E.V. & HOFFMAN, G.J. Crop salt tolerance - current assessment. **J. Irrig. and Drainage Div.**, ASCE 103 (IR2), p. 115-134, 1977.

MALICKI, M. A. et al. Determining soil salinity from simultaneous readings of its electrical conductivity and permittivity using TDR. In: **Proceedings of the Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry in Environmental, Infrastructure, and Mining Applications, Evanston**. 1994. p. 7-9.

MALICKI, M. A.; WALCZAK, R. T. Evaluating soil salinity status from bulk electrical conductivity and permittivity. **European Journal of Soil Science**, v. 50, n. 3, p. 505-514, 1999.

MARIAPPAN, V.E.N.; SELVARAJ, T.; VADIVEL, N. Soil Salinity Perspectives, Approaches and Strategies. **J. Adv. Res. Civil Env. Eng.**, v. 1, p. 33- 39, 2014

MATTHEES, Heather L. et al. Predicting soil electrical conductivity of the saturation extract from a 1: 1 soil to water ratio. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 48, n. 18, p. 2148-2154, 2017.

MUALEM, Y.; FRIEDMAN, S. P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resources Research**, v. 27, n. 10, p. 2771-2777, 1991.

OLIVEIRA, F. D. A. D.; MEDEIROS, J. F. D.; DUARTE, S. N.; SILVA JÚNIOR, M. J. D.; & CAMPELO, C. M. Calibração de extratores providos de cápsula porosa para monitoramento da salinidade e da concentração de íons. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 3, p. 520-528, 2011.

PERSSON, Magnus. Evaluating the linear dielectric constant-electrical conductivity model using time-domain reflectometry. **Hydrological sciences journal**, v. 47, n. 2, p. 269-277, 2002.

QUEIROZ, S.O.P.; TESTEZLAF, R.; MATSURA, E.F. Avaliação de equipamentos para determinação da condutividade elétrica do solo. **Irriga**, Botucatu, v.10, n.3, p.279-287, 2005.

RHOADES, J. D. Predicting Bulk Soil Electrical Conductivity versus Saturation Paste Extract Electrical Conductivity Calibrations from Soil Properties 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, n. 1, p. 42-44, 1981.

RHOADES, J. D.; CHANDUVI, F. **Soil salinity assessment: Methods and interpretation of electrical conductivity measurements**. Food & Agriculture Org., 1999.

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**, v. 48.

RHOADES, J. D.; MANTEGHI, N. A.; SHOUSE, P.J.; ALVES, W.J. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and calibrations. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 53:433-439. 1989.

RHOADES, J. D.; RAATS, P. A. C.; PRATHER, R. J. Effects of Liquid-phase Electrical Conductivity, Water Content, and Surface Conductivity on Bulk Soil Electrical Conductivity 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 40, n. 5, p. 651-655, 1976.

RHOADES, J. D.; SHOUSE, P. J.; ALVES, W. J.; MANTEGHI, N. A.; LESCH, S. M. Determining soil salinity from soil electrical conductivity using different models and estimates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, n. 1, p. 46-54, 1990.

Rodriguez, F.R. A. **Calibrating capacitance sensors to estimate water content, matric potential, and electrical conductivity in soilless substrates**. Tese Doutorado, University of Maryland. 2009. Disponível em: [https://drum.lib.umd.edu/bitstream/handle/1903/10241/ArguedasRodriguez\\_umd\\_0117N\\_11061.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://drum.lib.umd.edu/bitstream/handle/1903/10241/ArguedasRodriguez_umd_0117N_11061.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

SAMSON, M. E., CARON, J., PEPIN, S., PARYS, B., & FORTIN, J. Precision and accuracy of time-domain reflectometry and capacitive probes to determine soil electrical conductivity in cranberry production. **Canadian journal of soil science**, v. 97, n. 1, p. 31-37, 2017.

SHAINBERG, I.; RHOADES, J. D.; PRATHER, R. J. Effect of Exchangeable Sodium Percentage, Cation Exchange Capacity, and Soil Solution Concentration on Soil Electrical Conductivity 1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 3, p. 469-473, 1980.

SHRIVASTAVA, P.; KUMAR, R. Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. **Saudi journal of biological sciences**, v. 22, n. 2, p. 123-131, 2015.

SILVA, A. O.; SILVA, Ê. F.; KLAR, A. E. Manejo da fertirrigação e salinidade do solo no crescimento da cultura da beterraba. **Engenharia Agrícola**, p. 230-241, 2015.

SONMEZ, S.; BUYUKTAS, D.; OKTUREN, F.; CITAK, S. Assessment of different soil to water ratios (1: 1, 1: 2.5, 1: 5) in soil salinity studies. **Geoderma**, v. 144, n. 1-2, p. 361-369, 2008.

SOUZA, E. R. MELO, H.F.; ALMEIDA, B. G.; MELO, D.V.M. Comparação de métodos de extração da solução do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 17, n. 5, 2013.

STRATEN, G. V.; VOS, A.; VLAMING, R.; OOSTERBAAN, R. Dielectric sensors in an automated facility for testing salt tolerance of irrigated field crops. **Paper**. 18th World Congress of CIGR, Beijing. September, 2014.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de Métodos de Análise de Solo. **Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)**, 2017.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, 16(3), 574–582. 1980.

VOGELER, I.; CLOTHIER, B. E.; GREEN, S. R.; SCOTTER, D. R.; TILLMAN, R. W. Characterizing water and solute movement by time domain reflectometry and disk permeametry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, n. 1, p. 5-12, 1996.

ZHANG, F.; TIYIP, T.; DING, J. L.; HE, Q. S. The effects of the chemical components of soil salinity on electrical conductivity in the region of the delta oasis of Weigan and Kuqa Rivers, China. **Agricultural Sciences in China**, v. 8, n. 8, p. 985-993, 2009.

ZHANG, R.; WIENHOLD, B. J. The effect of soil moisture on mineral nitrogen, soil electrical conductivity, and pH. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 63, n. 2-3, p. 251-254, 2002.