

LUCAS YAGO DE CARVALHO LEAL

CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO EM
BETERRABA IRRIGADA SOB SALINIDADE

RECIFE - PE

2022

LUCAS YAGO DE CARVALHO LEAL

CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO EM
BETERRABA IRRIGADA SOB SALINIDADE

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientador:

Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza

Co-Orientador:

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva

RECIFE - PE

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- L435c Leal, Lucas Yago de Carvalho
Calibração de sensores de umidade do solo em beterraba irrigada sob salinidade / Lucas Yago de Carvalho Leal. -
2022.
114 f. : il.
- Orientador: Edivan Rodrigues de Souza.
Coorientador: Enio Farias de Franca e Silva.
Inclui referências.
- Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,
Recife, 2023.
1. Condutividade elétrica. 2. Beta vulgaris L.. 3. Resistividade elétrica. 4. Status hídrico. 5. Ajustamento osmótico. I.
Souza, Edivan Rodrigues de, orient. II. Silva, Enio Farias de Franca e, coorient. III. Título

LUCAS YAGO DE CARVALHO LEAL

CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DO SOLO EM
BETERRABA IRRIGADA SOB SALINIDADE

Tese defendida e aprovada em 29 de dezembro de 2022 pela banca examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza
DEPA- UFRPE

Examinadores:

Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva
DEAGRI - UFRPE

Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva
DENA - UFC

Prof. Dr. José Amilton Santos Júnior
DEADRI – UFRPE

Dra. Monaliza Alves dos Santos
PNPD – DEPA – UFRPE

“O homem erudito é um descobridor de fatos que já existem, mas o homem sábio é um criador de valores que não existem e que ele faz existir”

Albert Einstein

À Deus;

A minha esposa Zingara Magalhães;

Aos meus pais Emmanoel de Queiroz Leal
e Carmen Lucia de Lima Carvalho Leal;

Meu irmão Diego José de Carvalho Leal;

E a tantos outros que fizeram parte direta
e indiretamente deste trabalho.

DEDICO

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem fé eu nada faria. Agradeço também a minha família, pais e irmão que sempre me apoiaram durante esta longa jornada e em especial a minha querida esposa, que está ao meu lado antes mesmo do início da minha vida acadêmica, a ela eu agradeço e dedico este trabalho.

Ao meu orientador, por todos esses anos de parceria, seriedade, comprometimento e fonte de inspiração para que eu seguisse neste caminho, meu muito obrigado.

Aproveito para agradecer a toda a equipe do grupo de pesquisa Solo-água-planta, em especial a Jaciane e Francisco, que estiveram ao meu lado nos dias bons e nos dias não tão bons. A minha amiga de longa data Martha, pelo apoio mútuo, a PNPd do grupo de pesquisa Monaliza, por sua dedicação e pela parceria ao longo dos anos e por fim aos alunos da Iniciação científica, Vitor, Wellinton e Ana, pelo apoio e dedicação.

A todos os funcionários da UFRPE, em especial ao corpo docente, que dentre eles gostaria de citar o meu co-orientador Ênio e o professor Amilton, pois são fonte de inspiração e, sem dúvida, foram alicerce da geração de meu conhecimento e que tive o prazer de poder participar de suas aulas e de reuniões extraclasse.

Gostaria de citar todos que tive contato ao longo desta jornada e agradece-los, mas como infelizmente não consigo, gostaria apenas de parabenizar aos profissionais e estudantes que compuseram a UFRPE ao longo destes anos e que fizeram dela este inenarrável centro de conhecimento e formação, do qual tenho orgulho de ter participado.

A CAPES pela concessão da bolsa, tornando possível a realização desta e de tantas outras pesquisas em todo o Brasil.

Sumário

Lista de figuras.....	viii
Lista de tabelas.....	ix
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO GERAL / REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
RESUMO GERAL.....	11
GENERAL ABSTRACT	12
1.1. INTRODUÇÃO GERAL	13
1.2. OBJETIVOS	15
1.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
CAPÍTULO II - STATUS HÍDRICO DA BETERRABA CULTIVADA SOB FAIXAS DE UMIDADE DO SOLO E IRRIGAÇÃO COM ÁGUA SALOBRA	42
RESUMO	43
ABSTRACT.....	44
2.1. INTRODUÇÃO	45
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	46
2.3. VARIÁVEIS ANALISADAS.....	52
2.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA	56
2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
2.6. CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
CAPÍTULO III - CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE EM SOLO SALINIZADO SOB CULTIVO IRRIGADO COM ÁGUA SALOBRA.....	86
RESUMO	87
ABSTRACT.....	88
3.1. INTRODUÇÃO	89
3.2. MATERIAL E MÉTODOS	90
3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA	97
3.4. RESULTADO E DISCUSSÃO	98
3.5. CONCLUSÃO	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	114

Lista de figuras

Capítulo 2

Figura 1. Estufa utilizada durante o experimento	47
Figura 2. Esquema experimental e do sistema de irrigação	50
Figura 3. Sistema de irrigação: válvulas (A), motobomba (B), Visão geral (C).....	52
Figura 4. Análise da fluorescência da clorofila.	53
Figura 5. Fluorescência inicial da beterraba cultivada sob diferentes níveis de umidade do solo (A) e irrigada com diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (B) aos 36 DAT.	58
Figura 6. Fluorescência máxima da beterraba cultivada sob diferentes níveis de umidade do solo aos 36 DAT	59
Figura 7. Fluorescência variável da beterraba cultivada sob diferentes níveis de umidade do solo aos 36 DAT	59
Figura 8. Rendimento quântico máximo (Fv/Fm) da beterraba cultivada sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação aos 36 DAT (A) e aos 50 DAT (B).	60
Figura 9. Razão entre a fluorescência variável (Fv) e a fluorescência inicial (F0) da beterraba cultivada sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação aos 50 DAT	62
Figura 10. Clorofila <i>a</i> e <i>b</i> da beterraba cultivada sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação aos 50 DAT.	63
Figura 11. Carotenoides da beterraba cultivada sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação aos 50 DAT.	64
Figura 12. Número de folhas da beterraba sob diferentes faixas de umidade do solo aos 34 e 55 dias após o transplântio.....	65
Figura 13. Altura da beterraba e comprimento do limbo foliar sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação aos 34 dias após o transplântio	66
Figura 14. Altura e comprimento do limbo foliar da beterraba sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação e % da umidade na capacidade de campo aos 55 dias após o transplântio.	67
Figura 15. Largura do limbo foliar da beterraba sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação e diferentes níveis de umidade do solo aos 34 dias (A) após o transplântio e Largura do limbo foliar aos 55 DAT sob diferentes níveis de CE.....	68
Figura 16. Diâmetro (A) e Comprimento (B) da raiz da beterraba sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação e diferentes níveis de umidade do solo aos 55 dias após o início dos tratamentos.	68
Figura 17. Massa fresca da parte aérea (A) e das raízes (B) da beterraba sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação e diferentes níveis de umidade do solo aos 55 dias após o transplântio.	70
Figura 18. Teor relativo de água da beterraba irrigada com diferentes níveis de salinidade aos 52 dias após o transplântio.....	72
Figura 19. Suculência Foliar da beterraba irrigada com água salobra sob diferentes níveis de umidade aos 52 dias após o transplântio.....	73
Figura 20. Danos na membrana da beterraba sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação aos 52 dias após o transplântio.	74
Figura 21. Condutividade elétrica e Potencial osmótico do solo cultivado com beterraba irrigada com diferentes níveis de sais e de umidade do solo aos 52 dias após o transplântio.....	75
Figura 22. Potencial osmótico (A) e Potencial Hídrico (B) da beterraba irrigada com diferentes níveis de sais e de umidade do solo aos 52 dias após o transplântio.....	76

Capítulo 3

Figura 1. Composição de fotos das atividades realizadas nos experimentos	90
Figura 2. Coluna de solo com sensor YL-69 instalado.	94
Figura 3. Colunas de solo com tensiômetros instalados.	94
Figura 4. Esquema experimental e do sistema de irrigação (A) e composição de fotos do sistema de irrigação (B).	96
Figura 5. Curvas de secagem para os diferentes níveis de salinidade	98

Figura 6. Curvas características de retenção de água em solo salinizado por saturação com água salobra (A) e em solo salinizado por meio da irrigação com água salobra durante o cultivo de um ciclo da beterraba (B).....	100
Figura 7. Resistência elétrica do solo em relação aos dias transcorridos em solos irrigados com água salobra durante o cultivo da beterraba.....	101
Figura 8. Curvas de leitura do YL-69 na unidade de resistência elétrica em relação a umidade do solo medida pelo método padrão.	103
Figura 9. Curvas de leitura do YL-69 na unidade de resistência elétrica em relação a umidade do solo medida pelo método padrão.	104
Figura 10. Condutividade elétrica das colunas de solo (A) e dos vasos irrigados com diferentes níveis de água salobra durante o cultivo da beterraba (B).	105

Lista de tabelas

Capítulo 2

Tabela 1. Caracterização física inicial do Neossolo Flúvico utilizado nos experimentos.	48
Tabela 2. Caracterização química inicial do Neossolo Flúvico utilizado durante os experimentos.	49
Tabela 3. Resumo da análise de variância das variáveis de fluorescência da clorofila e pigmentos fotossintéticos da beterraba.....	57
Tabela 4. Resumo da análise de variância para as variáveis biométricas da beterraba.....	65
Tabela 5. Resumo da análise de variância das variáveis potencial osmótico e condutividade elétrica do solo e as variáveis de relação hídrica da planta.....	71
Tabela 6. Ajustamento osmótico da beterraba irrigada com água salobra e cultivada sob diferentes níveis de umidade do solo aos 52 dias após o transplântio.	77

Capítulo 3

Tabela 1. Caracterização física inicial do Neossolo Flúvico utilizado nos experimentos.	91
Tabela 2. Caracterização química inicial do Neossolo Flúvico utilizado durante os experimentos.	92
Tabela 3. Estatística das calibrações do tensiômetro e YL-69 em solo salinizado por saturação e em solo salinizado por irrigação durante o cultivo da beterraba.	105
Tabela 4. Estimativa da umidade volumétrica na capacidade de campo para todos os tratamentos salinos.	107

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL / REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

LEAL, LUCAS YAGO DE CARVALHO. Dr. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Outubro de 2022. **Calibração de sensores de umidade do solo em beterraba irrigada sob salinidade.**

Orientador: Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza
Co-Orientador: Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva

RESUMO GERAL

A seca e a salinidade promovem os estresses abióticos que mais causam perda na agricultura, e inúmeras estratégias de manejo da irrigação são adotadas com o intuito de reduzir as perdas de produção. Em situações em que ocorrem altas concentrações de sais no solo ou na água de irrigação, os sensores de umidade ainda são pouco usuais/recomendados devido a diminuição da precisão. A beterraba (*Beta vulgaris* L) é uma hortaliça com relevância nutricional e econômica, que apresenta alterações fisiológicas bastante distintas ao estresse hídrico e salino, principalmente em termos de açúcares e osmorregulação. Com isso, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o status hídrico do solo e planta, bem como processos fisiológicos da beterraba ao longo da salinização do solo sob faixas de umidade controladas e diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. Bem como, foi objeto de estudo a atuação de sensores com princípios e custos distintos sob condições de solo salino e não salino. Para isso, foram conduzidos 3 experimentos, sendo um em blocos casualizados com arranjo fatorial 5x3 com cinco níveis de salinidade da água de irrigação (0; 2; 4; 6 e 8 dS m⁻¹) e três níveis de umidade (100; 90 e 80% da umidade na capacidade de campo). Determinaram-se os potenciais da água nos solos e em beterraba, além de variáveis biométricas, de produção, suculência foliar (SF), ajustamento osmótico (AO) e danos da membrana. Realizou-se ainda mais 2 experimentos com os sensores de umidade no solo, sendo o primeiro deles em arranjo fatorial 5 x 2, sendo 5 níveis de condutividade elétrica das águas utilizadas para salinização do solo artificialmente (0, 2, 4, 8 e 16 dS m⁻¹) e dois sensores de umidade do solo (resistivo e tensiômetro) em blocos ao acaso com 4 repetições. O segundo experimento com sensores de umidade no solo foi realizado em solo não salino e salinizado ao longo do cultivo da beterraba com diferentes níveis de água salobra, sendo avaliado novamente em arranjo fatorial 5 x 2, sendo 5 os níveis da CE das águas utilizadas durante a irrigação (0, 2, 4, 6 e 8 dS m⁻¹) e dois sensores de umidade (resistivo e tensiômetro). Nos dois experimentos foram realizadas as calibrações dos sensores e as obtenções dos respectivos índices estáticos (abordados no capítulo III). Do capítulo 2 destaca-se as estratégias de convívio da beterraba aos estresses abióticos ao que se refere ao AO, SF, e redução dos potenciais de água na planta, além da capacidade produtiva mais elevada, quando cultivada na presença de sais. Os sensores resistivos e o tensiômetros apresentaram equações de calibração com altos coeficientes de determinação independente da salinidade do solo, entretanto a resistividade elétrica medida por meio do sensor de baixo custo YL-69 é afetada significativamente pela salinidade do solo, ao contrário do ocorrido com os tensiômetros que apresentaram baixa variação para os dois experimentos. Conclui-se que valores moderados de salinidade e umidade do solo, promovem ganhos de produção, AO e SF na cultura da beterraba e que o uso de sensores de baixo custo, quando calibrados, é possível em condições de salinidade, sem que haja perda da confiabilidade dos dados.

Palavras-chave: condutividade elétrica; *Beta vulgaris* L.; resistividade elétrica; status hídrico; ajustamento osmótico.

LEAL, LUCAS YAGO DE CARVALHO. Dr. Federal Rural University of Pernambuco. Outubro de 2022. **Calibration of soil moisture sensors in beetroot irrigated under salinity.**

Advisor: Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza

Co-advisor: Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva

GENERAL ABSTRACT

Drought and salinity are the abiotic stresses that most cause loss in agriculture, and numerous irrigation management strategies are adopted in order to reduce production losses. In situations where there are high concentrations of salts in the soil or irrigation water, moisture sensors are still barely recommended due to loss accuracy. Beetroot (*Beta vulgaris* L.) is a vegetable with nutritional and economic relevance, which presents very different physiological alterations to water and saline stress, mainly in terms of sugars and osmoregulation. The objective was to evaluate the water status of the soil and plant, as the physiological processes of the beet during a salinization process under controlled moisture ranges and different levels of salinity of water. The performance of sensors with different principles and costs under conditions of saline and non-saline soil was also studied. For this, 3 experiments were conducted, one in randomized blocks with a 5x3 factorial arrangement with five salinity levels of irrigation water (0, 2, 4, 6 and 8 dS m⁻¹) and three levels of soil moisture (moisture contents 100, 90 and 80 % of field capacity). Water potentials were determined in soils and in beetroot, biometric variables, production, leaf succulence (LS), osmotic adjustment (OA) and membrane damage. Two more experiments were carried out with soil moisture sensors, the first one was in a 5 x 2 factorial arrangement, with 5 levels of electrical conductivity (EC) of the water used for artificially salinizing the soil (0, 2, 4, 8 and 16 dS m⁻¹) and two soil moisture sensors (resistive and tensiometer) in randomized blocks with 4 repetitions. The second experiment was carried out in non-saline and salinized soil during the beetroot cultivation with different levels of brackish water, being evaluated in a 5 x 2 factorial arrangement, with 5 being the EC levels of the water used during irrigation (0, 2, 4, 6 and 8 dS m⁻¹) and two soil moisture sensors (resistive and tensiometer). In both experiments, the sensors were calibrated and the respective static indices were obtained (discussed in Chapter III). From chapter 2, it stands out the beetroot coexistence strategies to abiotic stresses with regard to OA, LS, and reduction of water potential in the plant, in addition to the higher productive capacity, when cultivated with salts. The resistive sensors and the tensiometer presented calibration equations with high coefficients of determination independent of soil salinity, however the electrical resistivity measured using the low cost sensor YL-69 is significantly affected by soil salinity, contrary to what happened with the tensiometers that showed low variation for both experiments. It is concluded that moderate values of salinity and soil moisture promote gains in production, OA and LS in the beetroot crop and that the use of low cost sensors is possible in salinity conditions when calibrated, without loss of data reliability.

Keywords: electrical conductivity; *Beta vulgaris* L.; electrical resistivity; water stats; osmotic adjustment.

1.1. INTRODUÇÃO GERAL

Na agricultura, a salinidade é uma das problemáticas que mais causa perdas de produção e já afeta cerca de 1 bilhão de hectares em todo o planeta, além disso, a agricultura é a atividade econômica que mais demanda recursos hídricos, sendo necessárias medidas de monitoramento e aumento da eficiência dos sistemas de irrigação para promoção da preservação dos recursos hídrico, energético e de fertilizantes (FAO, 2020).

Dentre os principais problemas acarretados pela salinidade, temos a perda de produção, a desertificação e o abandono de terras antes agricultáveis, tendo em vista que áreas que já apresentam problemas graves de salinidade possuem custo elevado de recuperação e que podem levar anos para reverter a degradação (SINGH, 2009; QADIR et al., 2014).

Solos afetados por sais geralmente possuem sua predominância em locais de clima árido e semiárido, ou seja, locais onde também predomina o estresse hídrico nos períodos de maior estiagem, gerando assim, mais uma acumulação de estresse para as culturas que não possuem mecanismos adaptativos (WILLADINO & CAMARA, 2010; GHEYI et al., 2016; RIBEIRO et al., 2016), de modo que se torna imprescindível o uso de culturas que possuem maior tolerância aos estresses.

Dentre as culturas que possuem maior tolerância aos estresses abióticos (seca e salinidade), temos as halófitas que possuem estruturas morfológicas e fisiológicas adaptadas a estas condições. Os principais mecanismos envolvidos no processo de tolerância das halófitas estão atrelados à manutenção e reposição hídrica, podendo destacar estratégias como o ajustamento osmótico, homeostase iônica e a capacidade de excluir ou compartimentalizar sais (MENG et al., 2018).

Dentre as plantas glicófitas, comumente cultivadas, poucas são as culturas que apresentam alguns dos mecanismos pertencentes às plantas halófitas, fazendo com que tolerem níveis de seca e salinidade bem abaixo dos valores de tolerância das halófitas (WILLADINO & CAMARA, 2010). Entretanto, ainda é possível encontrar culturas glicófitas moderadamente tolerantes à salinidade e, dentre este “grupo”, vale destacar as plantas natrofilicas, ou seja, as plantas que apresentam como elemento benéfico o sódio (BROADLEY et al., 2012).

O sódio é um dos cátions de maior prevalência em solos e águas afetados por sais, favorecendo o seu aparecimento principalmente em detrimento do clima, do tipo de formação rochosa, ou mesmo do uso indiscriminado de águas de qualidade inferior, acarretando o acúmulo no solo e nas águas das regiões (SINGH, 2009; BANERJEE & PRASAD, 2020;

NASCIMENTO et al., 2021). Sendo assim, pode-se identificar mais um motivo para se trabalhar com culturas que possuem afinidade ao elemento sódio e, dentre elas, as seguintes podem ser citadas: nabo, acelga, beterraba açucareira e beterraba de mesa, sendo esta última uma cultura que possui interesse socioeconômico, uma vez que possui altos teores nutricionais e é uma das hortaliças mais consumidas do Brasil (GONDIM, 2010; BROADLEY et al., 2012).

A beterraba é uma cultura moderadamente tolerante à salinidade, sendo reportada com uma salinidade limiar na ordem de 2,7 dS m⁻¹ para água de irrigação e 4dS m⁻¹ para a condutividade elétrica no extrato de saturação. Além disso, é uma cultura que possui altas concentrações de fibra, minerais, vitaminas e aminoácidos, sendo este último, possivelmente associado a processos antioxidantes e de regulação osmótica (AYERS & WESTCOT, 1985; SUBBARAO et al., 2001; BAIÃO et al., 2017).

Em locais de clima árido e semiárido, geralmente são necessários sistemas de irrigação para fazer a reposição da lâmina evapotranspirada, uma vez que em locais com estas características climáticas o balanço hídrico é negativo, ou seja, ocorre maior evapotranspiração do que precipitação (RODRIGUES et al., 2022).

A agricultura irrigada é dificultada em regiões de seca, tendo em vista a falta de recursos hídricos de boa qualidade, sendo normalmente utilizadas águas subterrâneas, que possuem elevadas concentrações de sais, porém o uso indiscriminado dessas águas sem o manejo adequado da terra, pode propiciar o agravamento do problema e o aumento do risco de desertificação (CASTRO & SANTOS, 2020).

Em locais com escassez hídrica torna-se ainda mais relevante a adoção de técnicas que estimem adequadamente a umidade do solo, sendo necessário agilidade e precisão para o correto monitoramento da água do solo e consequente recomendação da irrigação. Dentre os métodos indiretos, o uso de sensores de umidade no solo ganha destaque em detrimento dos resultados rápidos, além de poderem ser realizados em diversas áreas do cultivo (KC et al., 2021).

Apesar dos benefícios, os sensores precisam ser calibrados para as diversas condições de solo, com o intuito de possibilitar medidas de valores precisos, além disso, a salinidade é um dos fatores químicos que causam interferência nas leituras, sendo importante destacar, ainda, o custo de aquisição dos equipamentos, uma vez que se trata de equipamentos de alto custo, bem como alternativas de custo reduzido e adaptadas as condições anteriormente descritas, favorecendo o uso pela agricultura familiar (SU et al., 2014).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o status hídrico do solo e planta, bem como processos fisiológicos da beterraba ao longo da salinização do solo sob faixas de umidade controladas e diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. Bem como, foi objeto de estudo a atuação de sensores com princípios e custos distintos sob condições de solo salino e não salino.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliação dos sensores de umidade do solo (resistivo e tensiômetros) quanto a consistência e precisão em solo com problemas de salinidade;
- Acompanhamento o efeito da salinidade do solo em sensores de umidade;
- Determinar o manejo que possibilita o aumento de produção da beterraba;
- Determinar o potencial osmótico e hídrico foliar da planta;
- Determinar a condutividade elétrica e o potencial osmótico final do solo após o cultivo irrigado com água salobra;
- Avaliar os efeitos da salinidade e umidade do solo nos danos na membrana e teor relativo de água da cultura.
- Avaliar o ajustamento osmótico da beterraba quando submetida a níveis crescentes de salinidade, bem como sob diferentes umidades do solo;
- Avaliar as variáveis biométricas da cultura sob condições de estresse salino e diferentes níveis de umidade do solo;
- Avaliar a eficiência do uso da água nos diferentes tratamentos (salinidade e umidade do solo);
- Investigar a fluorescência e pigmentos da cultura cultivada com águas salobras nos diferentes níveis de umidade do solo.

1.3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.3.1. ESTRESSES ABIÓTICOS

As plantas estão sujeitas a estresses bióticos e, ou, abióticos. Dos estresses abióticos, os mais comumente encontrados na natureza são os estresses hídrico, salino, nutricional, de

temperatura e de radiação solar (TUTEJA & GILL, 2016). Estes estresses variam principalmente entre regiões, como é o caso da seca, que ocorre em regiões áridas e semiáridas (ZAREI, 2018), e da salinidade, que tanto é propensa em regiões áridas (RIBEIRO et al., 2016), como também em regiões costeiras, decorrente da intrusão marinha (GOPINATH et al., 2019).

1.3.1.1. Estresse hídrico

Dentre os diversos estresses abióticos, o estresse hídrico é o mais abrangente, e por isso um dos maiores causadores da perda do potencial produtivo das culturas em todo o mundo. Pode ocorrer de duas formas, seja pela falta d'água (principal ocorrência) ou pelo excesso de água e possuem ocorrência e efeitos bastante distintos, seja no solo ou na planta (TUTEJA & GILL, 2016).

A seca (déficit hídrico) é mais comum em regiões de clima quente e com baixa precipitação, além de ocorrer durante períodos de estiagem, onde no caso a frequência da chuva se torna o principal fator (GOCIC et al., 2020), já o estresse por excesso de água é mais comum em regiões com solos pouco profundos ou rasos, mal ou imperfeitamente drenados e hidromórficos, acarretando alagamento durante eventos de chuva e consequente falta de oxigênio para as plantas (NETO et al., 2017; SANTOS et al., 2018; TEHRANY et al., 2019; LIU et al., 2020).

As características físicas do solo, como textura, porosidade e grau de compactação, podem favorecer a ocorrência de determinados estresses, como no caso do estresse hídrico. Um dos motivos é a capacidade de retenção de água no solo e a aeração, ou seja, solos argilosos, possuem maior capacidade de retenção juntamente com uma menor velocidade de drenagem, já os solos arenosos possuem baixa capacidade de retenção e boa aeração em decorrência da macroporosidade elevada (LOVISOLO et al., 2016). Solos considerados jovens, como é o caso do Neossolo, apresentam textura arenosa, geralmente rasos, com conteúdo orgânico praticamente inexistente e com baixa capacidade de retenção de água, diferente de solos mais desenvolvidos como é o caso Argissolo e do Latossolo (SANTOS et al., 2018).

O nível de estresse hídrico é classificado em função de percentuais da capacidade de campo do solo em 5 categorias (CHAI et al., 2016):

- 1) Déficit hídrico severo: a umidade do solo é inferior a 50% da capacidade de campo;
- 2) Déficit hídrico moderado - a umidade do solo permanece entre 50 a 60% da capacidade do campo;

- 3) Déficit hídrico leve - a umidade do solo permanece entre 60 a 70% da capacidade do campo;
- 4) Sem déficit ou irrigação total - a umidade do solo geralmente é superior a 70% da capacidade do campo durante o período de maior crescimento das plantas;
- 5) Excesso de irrigação - a quantidade de água irrigada pode ser maior do que o necessário para o crescimento ideal das plantas.

Outro tipo de estresse bastante relevante em ambientes semiárido é aquele causado pela alta presença de sais, seja na solução do solo ou no complexo sortivo.

1.3.1.2. Estresse Salino

O estresse salino é um dos que mais afetam a produção agrícola, sendo este tipicamente conhecido por estar presente em áreas que possuem altos índices de evaporação, baixa pluviosidade e por muitas vezes atrelado a uma formação rochosa específica, que juntamente com as condições climáticas, favorece a liberação e acúmulo de determinados íons no solo, em especial os íons Na^+ e Cl^- (RIBEIRO et al., 2016).

Estima-se que mais de 831 milhões de hectares já estejam afetados por sais, seja por salinidade, sodicidade ou por ambos os problemas, o que implica em um grande prejuízo a economia e ao meio ambiente. Os processos que envolvem a recuperação destes solos, incluem, utilização de culturas tolerantes a salinidade, aplicação de substâncias solúveis a base de cálcio, frequentes lâminas de lixiviação, além de um sistema artificial de drenagem (OSMAN, 2018).

No solo, a salinidade e a sodicidade podem ocorrer de maneira conjunta acarretando em uma das formas mais severas desse estresse devido à dificuldade de recuperação deste solo e a propensão que o mesmo adquire a se tornar uma área desértica. Isto porque um solo com tais características dificilmente apresentará vegetação e sua composição química (fase trocável e solúvel) e física (estrutura do solo), estará bastante comprometida (ZHAO et al., 2018).

A classificação de um solo quanto à salinidade decorre de dois principais parâmetros, sendo eles a condutividade elétrica da solução do solo e a porcentagem de sódio trocável, cujos valores acima de 4 dS m^{-1} e 15 % classifica-os como salino e sódico, respectivamente (RICHARDS, 1954).

Outra variável bastante utilizada na avaliação de um solo quanto a problemas de ordem química é o potencial hidrogeniônico (pH), e apesar de ser utilizado em termos de acidez (< 7),

neutralidade (7) ou basicidade (> 7) é importante destacar ainda que ele poderá ser indicativo de problemas de ordem salina ou de sodicidade, já que este parâmetro ao longo destes tipos de processos, também é alterado (RENGASAMY, 2010; ZHAO et al., 2018).

A temperatura e luminosidade assim como os demais estresses anteriormente citados, estão muito vinculadas às características climáticas e, neste caso, são comuns em áreas que se distanciam da linha do equador, pois quanto mais bem definidas as estações do ano, mais haverá amplitude tanto da temperatura, quanto a luminosidade, ou seja, épocas quentes e com longos períodos de insolação e épocas com baixa temperatura e poucas horas de incidência solar (DODDs et al., 2019).

No caso do Brasil os estresses associados à temperatura e luminosidade são comuns apenas no sul do país, já nas demais regiões a temperatura e o tempo de insolação possuem baixa variação e encontram-se dentro da faixa de tolerância para a maioria das culturas (GONDIM, 2010; ALMEIDA et al., 2017; JESUS et al., 2018). Contudo é importante ressaltar que na região Nordeste também é possível encontrar temperaturas elevadas, inclusive com provável aumento para cenários futuros, de tal modo que possa inviabilizar ou reduzir o cultivo de plantas que necessitam de clima mais ameno para se desenvolverem ou completarem seus ciclos (MARENGO et al., 2019; MARTINS et al., 2019).

1.3.2. PLANTAS SOB ESTRESSE

1.3.2.1. Tolerância das plantas ao estresse

As plantas possuem adaptações morfológicas, fisiológicas e, ou, bioquímicas para conviver com determinados estresses, garantindo a homeostase e o desenvolvimento (SILVEIRA et al., 2016).

Em termos de estresse salino, as plantas são classificadas de acordo com o grau de tolerância, o que é consequência de processo evolutivo e do ambiente no qual está adaptada, e neste caso é dividido entre as glicófitas, plantas pouco tolerantes ao estresse salino, e as halófitas, plantas que naturalmente se desenvolveram em ambientes com altas concentrações de sais (FLOWERS & COLMER, 2008; FLOWERS & COLMER, 2015).

As glicófitas, apesar de menos tolerantes, são as mais comumente cultivadas, e apresentam graus de tolerância diferenciados, as vezes dentro da própria espécie essa variação é encontrada, como ocorre para os diferentes cultivares de beterraba, a exemplo da cultivar Itapuã, que em níveis de condutividade elétrica (CE) de até 6 dS m^{-1} , observa-se maiores

resultados de produção e eficiência do uso da água, ao contrário da cultivar Early Wonder, com decréscimos lineares das variáveis de produção em relação ao aumento da salinidade do solo (SILVA et al., 2016). A variação da tolerância das glicófitas decorre também dos mecanismos adaptativos, a exemplo do próprio ajustamento osmótico, que é a capacidade da planta de acumular íons e solutos no citosol de suas células para garantir a manutenção hídrica mesmo sob condições de estresse hídrico e salino (SILVEIRA et al., 2016).

As plantas halófitas são extremamente tolerantes devido às adaptações desenvolvidas ao longo do tempo, como por exemplo; a capacidade de armazenar e excluir sais, por meio de glândulas secretoras. Estas adaptações e tamanha tolerância se deve ao fato de serem plantas que naturalmente estão presentes em ambientes com altas concentrações de sais (especialmente os íons Na^+ e Cl^-) (WILLADINO & CÂMARA, 2010).

Em termos de tolerância é importante ressaltar o uso de elementos benéficos, como sódio e silício, tendo em vista o potencial dos mesmos, quando associados a culturas como espinafre, beterraba, salicornia, girassol e sorgo, uma vez que podem promover maior tolerância aos estresses abióticos (hídrico e salino), bem como gerar aumento de produtividade (YAMADA et al., 2016; HANEKLAUS et al., 2018; HURTADO et al., 2019).

1.3.2.2. Estresse osmótico, iônico e oxidativo

O estresse osmótico é resultante das altas concentrações de íons e solutos na solução do solo, o que por sua vez, provoca a redução do potencial osmótico no solo e conseqüentemente redução também do potencial total, que é dado pelo somatório do potencial osmótico e matricial, fazendo com que a água do solo seja retida com maior intensidade (DUARTE & SOUZA, 2016).

Em um primeiro momento, a planta é afetada pela dificuldade em absorver água e é regulado por meio da sinalização proveniente da raiz, sobretudo pelo hormônio ácido abscísico (ABA). A concentração do ABA nas raízes e sua translocação ao longo da planta pode ocorrer em pouco tempo, garantindo assim a sinalização do estresse e possíveis mecanismos adaptativos em resposta a falta d'água, como por exemplo a regulação estomática (TAIZ et al., 2017).

Em termos de estresse iônico, este se dá pela absorção em altas concentrações de íons potencialmente tóxicos, a exemplo do íon cloro e sódio, e esta alta concentração de íons específicos na planta, acima da sua capacidade de compartimentalização, associada principalmente a um desbalanceamento das relações iônicas, a exemplo da relação sódio-

potássio, reflete-se em estresse iônico (MUNNS & TESTER, 2008). Ainda segundo o mesmo autor, algumas das formas de diferenciar o efeito iônico do osmótico, é feita a partir da observação da taxa de produção de folhas novas, bem como da condutância estomática, pois o efeito osmótico é rápido e afeta a expansão de folhas novas ao mesmo tempo que reduz a abertura estomática, já o efeito iônico ocorre de maneira lenta e é observado no aumento da taxa de senescência das folhas, bem como no acompanhamento do aumento das lesões em folhas mais velhas.

Outro problema acarretado durante o estresse abiótico é o estresse oxidativo, oriundo do processo de formação de espécies reativas de oxigênio (ERO's), em especial os superóxidos (O_2^-) que podem reagir com outras substâncias e formarem o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), que em altas concentrações é tóxico para a planta, e por fim ainda poderá novamente reagir e formar a hidroxila (OH^-), extremamente tóxica para a planta (AHMAD et al., 2010).

Dentre as principais causas da geração das ERO's inclui-se o processo de fechamento estomático, que resulta em uma menor taxa de entrada do gás carbônico (CO_2) na folha, devido a dificuldade de difusão do mesmo perante o mesófilo foliar, provocando uma alta concentração de nicotinamida adenina dinucleótido fosfato reduzida (NADPH) e consequente limitação de NADP, por fim o oxigênio passa a atuar com aceptor na cadeia de elétrons, provocando assim a formação das ERO's (CADENAS, 1989).

As plantas apresentam distintas respostas a cada tipo de estresse que lhe é causado, e dentre essas respostas tem-se as Espécies Reativas de Oxigênio (EROS), que funcionam como transdutores de sinais, apesar de serem subprodutos tóxicos do metabolismo das plantas quando expostas a algum estresse. Quando as plantas estão sob estresses abióticos (seca, salinidade, luminosidade e/ou temperatura) as EROS resultantes serão diferentes para cada situação, tanto em termos de espécie quanto de concentração (CHOUDHURY et al., 2016).

Dentre os efeitos do estresse oxidativo incluem-se: peroxidação lipídica e consequente lesões na membrana, degradação proteica, inativação enzimática, interrupção de funções metabólicas e perda da integridade celular (PARIHAR et al., 2015).

1.3.2.3. Relações hídricas das plantas

As plantas para sobreviverem necessitam regular o seu status hídrico, neste caso, para a compreensão deste processo regulatório, o entendimento dos potenciais envolvidos é essencial, e são descritos pela seguinte equação (KIRKHAM, 2014):

$$\Psi = \Psi_{os} + \Psi_m + \Psi_p + \Psi_g$$

Equação 1

Sendo, Ψ_{os} o potencial osmótico ou de soluto; Ψ_m o potencial mátrico (forças de adsorção, como os das paredes celulares); Ψ_p o potencial de pressão ou turgor; Ψ_g o potencial gravitacional.

É importante destacar a princípio que o potencial gravitacional geralmente é desconsiderado, sendo aplicado apenas em caso de plantas de grande porte, quando passa a ter maior significância, em relação aos demais potenciais (COELHO FILHO et al., 2011). O segundo ponto a destacar, é o potencial mátrico da planta, uma vez que sua componente está intimamente ligada com a adsorção da água a constituintes sólidos e a dificuldade de distinguir no interior da planta qual está se comportando como sólido ou soluto, toma-se como efeito aditivo do mesmo ao potencial osmótico, ou seja, o potencial osmótico representa de uma maneira geral toda a energia com a qual a água é retida no interior da planta (NOBEL, 1999).

As principais formas de quantificação dos potenciais na planta são por meio de termopar (medição do potencial hídrico) (RODRIGUES et al., 2003), bomba de pressão de Scholander para medição do potencial hídrico na folha ou ramo (SCHOLANDER et al., 1965), quantificação do potencial osmótico através da determinação da osmolalidade em osmômetro de pressão a vapor, utilizando a seiva da planta e posterior aplicação da equação de van't Hoff (De Souza et al., 2012), ou estimação do mesmo por meio da curva pressão-volume utilizando a câmara de pressão de Scholander (LINS et al., 2018) e, por fim, estimação do potencial de pressão a partir da diferença entre o osmótico e o potencial total da planta.

Outro parâmetro de suma importância na mensuração do status hídrico da planta é o conteúdo (ou teor) relativo de água (C.R.A. ou T.R.A.) que relaciona a quantidade de água da planta no momento da coleta da amostra vegetal, a partir da diferença entre a massa fresca e seca da planta, e a quantidade máxima de água que a mesma poderia apresentar, obtido pela diferença entre a massa turgida e seca após estabilização do peso em estufa (BARRS & WEATHERLEY, 1962). Sendo este representado pela equação:

$$C.R.A. (\%) = \frac{(mf - ms)}{(mt - ms)} \times 100$$

Equação 2

Em que, mf a massa fresca da planta, ms a massa seca e mt a massa turgida.

O teor relativo de água pode ser indicativo de tolerância espécies ao estresse salino e consequentemente poder ser um dos critérios de escolha da planta, ou seja, as plantas que apresentam menores reduções de TRA por incremento unitário de salinidade, são mais tolerantes ao estresse em comparação as demais (DE SOUSA et al., 2017).

Tais parâmetros anteriormente descritos, são amplamente utilizados para avaliar plantas sob condições de estresse, em especial sob condições de estresse salino, tendo em vista se tratarem de variáveis que apresentam grandes variações em decorrência do estresse (DUARTE & SOUZA, 2016; OLIVEIRA et al., 2016).

Dentro os mecanismos de maior importância no convívio com o estresse hídrico e salino estão o ajustamento osmótico (AO) e as mudanças nas propriedades elásticas dos tecidos (SAVÉ et al., 1993; MUNNS et al., 2016). O AO permite a manutenção do turgor celular da planta, mesmo sob condições de estresse, ocorrendo devido ao acúmulo líquido de íons e solutos compatíveis na planta. Tal processo pode ocorrer tanto em plantas mais adaptadas ao estresse, como é o caso das halófitas, bem como em plantas menos tolerantes como é o caso das glicófitas, porém com uma menor intensidade (RODRÍGUEZ et al., 2010; LINS et al., 2018;).

É importante destacar que o ajustamento só poderá ser considerado realmente considerado, se o mesmo não for resultado de uma rápida perda de água pela planta, tendo em vista que o potencial osmótico deverá ser mais negativo em decorrência do acúmulo dos íons e solutos e não decorrente da perda de água (BRAY, 1997).

Ainda em termos de ajustamento osmótico, dentre os íons que mais são armazenados estão o sódio e cloro, bem como solutos orgânicos compatíveis a exemplos da prolina e da glicina betaína (SILVA et al., 2010; NASCIMENTO et al., 2015). Ocorre ainda aumento da concentração de enzimas, como ascorbato peroxidase (APX), catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD), entre outras, que por sua vez promovem proteção as ERO's, uma vez que se tratam de substâncias antioxidantes ou que auxiliam no processo de recuperação de substâncias antioxidantes, evitando dentre outros desgastes a peroxidação lipídica (RODRÍGUEZ et al., 2010).

1.3.2.4. Efeito nas trocas gasosas foliares e na fotossíntese da planta

Plantas sob déficit hídrico, seja ele causado pela baixa umidade do solo ou pela salinidade, resulta em alterações na condutância estomática, o que de modo geral consiste no

fechamento estomático para tentativa de manutenção do status hídrico da planta (SILVA et al., 2015; LIMA et al., 2017).

O estresse abiótico (seca e salinidade) apresenta duas rotas de sinalização do estresse na planta, sendo uma das rotas dependentes do ácido abscísico (ABA), relacionada ao fechamento dos estômatos, uma vez que consiste em uma rápida biossíntese do próprio ABA, provocando acúmulo na folha, e por fim o fechamento estomático, reduzindo a transpiração da planta (TAIZ et al., 2017).

Apesar do importante papel do fechamento estomático para redução da transpiração, outros processos decorrem deste fechamento, como por exemplo a menor difusão de CO₂ na planta e o aumento da temperatura na planta, com isso, o aparato fotossintético da planta poderá ser afetado, seja de maneira reversível, após um estresse curto ou de menor intensidade, ou de maneira irreversível após um comprometimento da atividade metabólica em decorrência de um estresse severo (FELLER, 2016).

O primeiro efeito da redução na atividade fotossintética é oriundo do processo do fechamento estomático, porém a medida que o estresse se agrava e conseqüentemente os estômatos continuam fechados, ocorre redução progressiva da atividade metabólica da planta implicando na possível redução de ATP, RuBP, assim como na própria inibição da Rubisco, comprometendo assim o ciclo de Calvin e a assimilação de CO₂ pela planta (LAWLOR, 2002; LIU et al., 2019). Nestas condições mesmo que a concentração de CO₂ interna na planta aumente a assimilação já está em parte comprometida.

Uma das formas de monitorar os danos ao aparato fotossintético pode ser realizada por meio de fluorômetros, em especial pela quantificação da eficiência quântica do fotossistema II (QY), oriunda da diferença entre a fluorescência máxima (*f_m*) e mínima (*f₀*) da clorofila, corresponde a fluorescência variável (*F_v*), e esta, por sua vez, dividida pela *f_{máx}*, conforme equação 3:

$$Q_y = \frac{f_m - f_0}{f_m} = \frac{f_v}{f_m} \quad \text{Equação 3}$$

Em níveis normais, os valores de QY devem estar acima de 0,75, porém em condições de estresse é facilmente observados valores menores, conforme observado por Lima et al. (2019) em plantas de algodão sob estresse salino.

Em partes esta variação na QY decorre de menores valores da *f_v*, o que pode ocorrer tanto devido ao aumento da fluorescência inicial, quanto da redução da fluorescência máxima (ZLATEV & YORDANOV, 2004). O aumento da *f₀* e redução da *f_m* podem estar atrelados a

danos e/ou inativação dos centros de reação do PSII, possivelmente oriundos de danos na proteína D1 (HU et al., 2016). Ressalta-se que mesmo quando as variações são pequenas na f_0 a mesma pode ter grande repercussão na QY, que neste caso é considerada uma variável sensível ao estresse salino (INBARAJ & MUTHUCHELIAN, 2011).

Devido as reduções nas trocas gasosas, ocorre alterações no ponto de compensação de CO_2 , uma vez que houve redução na assimilação líquida da planta ao mesmo tempo que ocorre aumento na taxa de fotorespiração em decorrência do estresse (YAMORI, 2016), ocasionando um novo ponto de compensação (ponto II) (Figura 1).

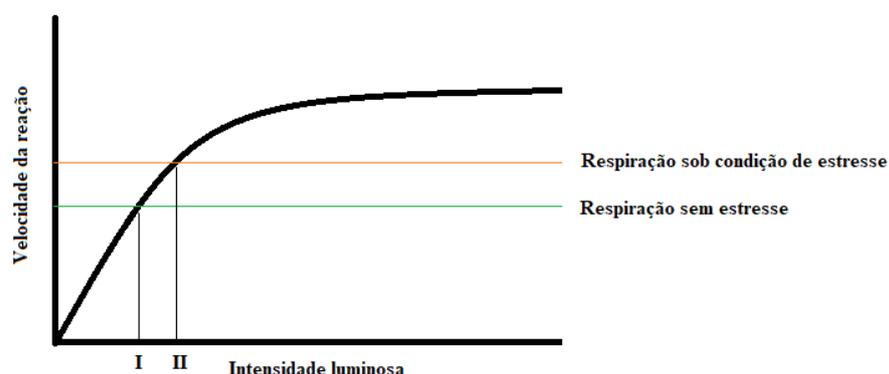


Figura 1. Gráfico hipotético entre a intensidade luminosa e a fotossíntese da planta, com os respectivos pontos de compensação de CO_2 de uma planta sem estresse (ponto I) e sob estresse (ponto II).

Outra forma de verificação de danos ao aparato fotossintético ocasionados pelo estresse abiótico, ocorre por meio da quantificação do conteúdo de clorofila, no qual geralmente se observa as clorofilas *a*, *b* e os carotenoides (PAUL et al., 2017). Sendo relevante destacar que os carotenoides além de pigmentos acessórios do processo fotossintéticos (abrangendo o espectro de comprimento de onda absorvido pela planta), também são considerados antioxidantes de baixo peso molecular e com isso também possuem importante papel no combate das ERO's (YOUNG & LOWE, 2018).

O aumento da salinidade, mesmo sob condições distintas de solo ou de sistema de cultivo, promove a redução no conteúdo de clorofila *a*, *b* e carotenoides, o que indiretamente causa a redução do SPAD (teor relativo de clorofila), sendo este efeito mais efetivo em culturas mais sensíveis como as hortaliças folhosas, em relação a culturas mais tolerantes como o tomateiro (MOLES et al., 2016; BADAWEY et al., 2018; NIU et al., 2018).

1.3.2.5. Efeitos na produção e na geração de produtos

Como relatado ao longo desta revisão, inúmeros são os componentes da planta que podem ser afetadas pelo estresse salino. Estes danos causados culminam em perdas de produção, como comumente estabelecida por meio da tabela de Ayers & Westcot (1985), que relacionam a produção relativa em termos do incremento da salinidade na água de irrigação para diferentes culturas e em casos severos impossibilitam o desenvolvimento da cultura, culminando na morte das mesmas.

Dependendo da área de interesse na planta ao qual se deseja produzir, a salinidade poderá causar prejuízos, como acontece na grande maioria dos casos, a exemplo da perda de área foliar no caso de hortaliças, e da redução do rendimento dos frutos no caso das frutíferas, entre outras reduções que conseqüentemente refletem-se nas variáveis de massa fresca e seca da cultura, podendo comprometer assim a qualidade do produto final (OUZOUNIDOU et al., 2016; D'IMPERIO et al., 2018; FERREIRA et al., 2019).

Contudo assim como no caso do déficit hídrico, a salinidade em níveis controlados, pode promover ganhos no produto final, a exemplo do acúmulo e exportação de solutos orgânicos, para áreas de maior interesse (WU et al., 2015), bem como no aumento da produção de óleos essenciais, promovendo benefícios técnico econômico (YADAV et al., 2017).

1.3.3. MANEJO DA IRRIGAÇÃO EM CONDIÇÕES DE SALINIDADE

O uso de água salobra na irrigação está cada vez mais comum em áreas de clima árido e semiárido, principalmente em decorrência da menor oferta de água de qualidade superior, ou mesmo devido ao intuito de preservação da água para outras finalidades nas quais são imprescindíveis (WANG et al., 2015; GHAZARYAN & CHEN, 2016; BAATH et al., 2017).

A aplicação de lâminas “econômicas”, menores que a evapotranspiração da cultura, bem como o uso de águas salobras na irrigação, geralmente promovem reduções na produção agrícola, contudo, a interação entre a lâmina utilizada e o nível de salinidade da água, poderá resultar no aumento da eficiência do uso da água, sem falar da preservação da água de qualidade superior para outras finalidades (YUAN et al., 2019).

No manejo da salinidade, visando uma redução da perda de produtividade, é importante destacar os fatores umidade do solo e fase fenológica da cultura, pois existem fases na qual a cultura é mais sensível a estresses abióticos (seca e salinidade), e uma das possíveis estratégias

de manejo para redução do estresse pode ser a manutenção de uma alta umidade do solo, principalmente durante fases mais críticas do desenvolvimento (DAI et al., 2011; GAO et al., 2014).

A alta umidade do solo (próxima umidade do solo na capacidade de campo), resulta em uma menor concentração na zona radicular de culturas, promovendo melhores resultados de produção, mesmo em solos com problemas de sais (LI et al., 2018). Tal promoção da umidade, pode ser oriunda de técnicas como o uso da cobertura morta e a incorporação de matéria orgânica em camadas subsuperficiais, ou mesmo devido ao aumento da frequência de irrigação (ZHAO et al., 2014; ASKRI et al., 2014).

O sistema de irrigação comumente utilizado na aplicação de água salobra é o gotejamento, em decorrência de três principais fatores: a não acumulação de sais nas folhas, o que normalmente acontece durante o uso de aspersores; a área de aplicação do emissor geralmente é úmida e ajuda a lixiviar os sais presentes imediatamente ao local de aplicação, o que geralmente corresponde a zona radicular das plantas, ou seja, local onde se localiza a maior densidade de raízes; e o terceiro, a alta frequência de aplicação do sistema permite a manutenção da umidade do solo, tornando-a próxima a umidade do solo na capacidade de campo, bem como um maior controle do nível de salinidade na área de aplicação (HANSON & MAY, 2011).

Para um adequado manejo da irrigação uma base de dados ampla e com acurácia se torna imprescindível. Os dados podem ser oriundos de estações meteorológicas, para posterior determinação de valores como o da evapotranspiração, por intermédio de modelos padrões como o de Penman – Monteith da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) (ALLEN et al. 1998), diretamente obtidos no solo por meio de métodos diretos, quando se determina a umidade gravimétrica e ou volumétrica do solo (TEIXEIRA et al., 2017), ou mesmo de maneira indireta, a partir de sensores de umidade no solo (ZAZUETA & XIN, 1994).

1.3.4. SENSORES DE UMIDADE DO SOLO

A umidade do solo costuma ser monitorada indiretamente por meio dos tensiômetros, que correlacionam a tensão mátrica exercida pelo solo e a umidade do solo, sendo esta correlação feita por meio da curva característica de retenção de água no solo (RICHARDS & GARDNER, 1936; RICHARDS, 1938; VAN GENUCHTEN, 1980).

Uma das principais desvantagens dos tensiômetros em relação aos demais sensores está na limitação de uso, ou seja, a faixa de tensão suportada, que de modo geral não ultrapassa tensões de 85 kPa, tendo em vista que a partir da mesma é provável a ocorrência da cavitação e conseqüente quebra da coluna de água. Já uma de suas principais vantagens seria a não influência da salinidade na estimativa da umidade do solo (SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP, 2011; METER GROUP INC, 2019).

Os sensores de umidade do solo são amplamente utilizados em projetos automatizados, transmitindo a “leitura”, a um controlador, que ao depender do sinal elétrico oriundo dos sensores, bem como de outros sensores que possam ter sido incorporados, determinará se o sistema dará ou não início ao processo de irrigação (ZHANG et al., 2017). Em se tratando de solos afetados por sais, ou mesmo da utilização de água salobra na irrigação, pouco são os sensores capazes de trabalharem em grandes faixas de salinidade e temperatura sem perder a acurácia de seus dados (THOMPSON et al., 2007; CARDENAS-LAILHACAR & DUKES, 2015).

A forma que o sensor interage com o meio, sistema solo-água, acarreta em um maior ou menor efeito as diferentes concentrações de sais no solo. Tendo em vista o grande número de sensores presentes no mercado, ocorre variação quanto a sensibilidade à salinidade, como por exemplo os resistivos, até sensores que apresentam menor influência e maior capacidade de adaptação ao meio, como os de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), onde suas adaptações permitem resultados ainda melhores em ambientes com alta salinidade (ZAZUETA & XIN, 1994; TAN et al., 2018).

Existem outros sensores com diferentes princípios de funcionamento como os de Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR), que podem funcionar em níveis moderados de salinidade, ou seja, suportam até determinadas faixas de salinidade do solo, sem perda da precisão dos dados, porém ressalta-se em muitos casos a necessidade de se realizar uma calibração específica para cada situação (MATULA et al., 2016).

Além das questões da salinidade, o custo dos sensores é fator decisivo na tomada de decisão e por isso existem pesquisas sendo realizadas a fim de determinar a possibilidade de se utilizar sensores de baixo custo como o YL-69, sem que haja perda da confiabilidade dos dados, apresentando em situações específicas resultados satisfatórios que viabilizam sua utilização (JIMÉNEZ et al., 2019; ADLA et al., 2020).

1.3.4.1. Sensores que utilizam a constante dielétrica do solo

Os sensores TDR e FDR/capacitivos utilizam como princípio as propriedades dielétricas do solo como forma de prever conteúdo de água no solo (EVETT et al., 2008). Sua funcionalidade se faz possível em decorrência da grande diferença entre a constante dielétrica do solo seco, que varia entre 0,1 a 5 (a depender principalmente da textura do solo), do ar que corresponde a ≈ 1 e da água pura, que é de ≈ 80 (PARK et al., 2017).

TDR são sensores que emitem um pulso eletromagnético de intensidade conhecida e “avalia” as alterações na onda gerada ao longo do tempo, sendo possível a estimativa da permissividade dielétrica aparente, bem como de outras variáveis como a condutividade elétrica, uma vez que estão diretamente relacionadas ao tempo de propagação do pulso durante o local de interpretação (sonda) (SCHWARTZ et al., 2013; SCHWARTZ et al., 2016).

Os FDR/capacitivos por sua vez, determinam valores de umidade no solo a partir de alterações na frequência da onda, esta medição é possível pelo uso de um oscilador, que produz uma onda sinusoidal em alta frequência, de modo que a frequência observada é reduzida à medida que se eleva o valor da permissividade elétrica do solo avaliado, ou seja, à medida que o mesmo apresenta um aumento em seu conteúdo de água (DEAN et al., 1987).

Os sensores capacitivos têm estrutura e configuração semelhante aos FDR, por isso muitas vezes são considerados iguais, porém uma diferenciação que pode ser feita é que os FDR propriamente ditos, medem a variação da frequência e os capacitivos a capacidade do solo de armazenar energia (solo como elemento capacitor) (METER GROUP INC, 2017).

As vantagens da utilização destes sensores ocorrem principalmente em ambientes salinos, uma vez que em muitos casos são capazes de serem calibrados para tais circunstâncias, e seus usos geralmente estão atrelado a resultados precisos (SKIERUCHA & WILCZEK, 2010).

1.3.4.2. Sensores resistivos

Funcionam a partir da variação da resistência elétrica quando a umidade do solo é reduzida, ou seja, o solo saturado apresenta o menor valor de resistência elétrica, em outras palavras a resistência a passagem da corrente elétrica é mínima quando o mesmo está saturado e máxima quando o mesmo está seco, possibilitando assim uma correlação entre as variáveis umidade do solo e resistência elétrica (TAN et al., 2019). A dificuldade de medição em

ambientes onde ocorre alteração da concentração de íons, dá-se justamente porque o seu princípio de avaliação é afetado sem que necessariamente haja alteração no conteúdo de água (ZAZUETA & Xin, 1994).

1.3.4.3. Sonda de nêutrons

Baseado no espalhamento de nêutrons, contendo este uma fonte de nêutrons rápidos e um detector de nêutrons lentos, seu princípio se dá em resposta a contagem de nêutrons que foram emitidos pelo equipamento e seu retorno em baixa velocidade, sendo estes afetados tanto pela densidade de hidrogênio em torno da sonda, sendo uma das principais fontes de hidrogênio a água, porém também influenciado pela densidade do solo (ROBOCK, 2014).

Pode ser utilizado para medições em superfície e ao longo do perfil, graças a utilização de um tubo de acesso apropriado, resultando em rápidas leituras, além de permitir leituras com baixa interferência em ambientes salinos, com exceção de situações extremas (CE acima de 15 dS m⁻¹) (FAYER & GEE, 2005; WELLS & FITYUS, 2011).

Contudo a sonda de nêutrons é pouco indicada para a quantificação em áreas rasas, devido a possível quantificação do ar no entorno, além de fazer uso de radiação gama, o que acarreta em uma série de riscos ao usuário e ao local em que será avaliado, caso as medidas de segurança não sejam rigorosamente seguidas, tanto para transporte quanto manuseio do mesmo (FAYER & GEE, 2005; ROBOCK, 2014; EVETT, 2016).

Durante a escolha do sensor é importante avaliar características de desempenho, porém levando-se em consideração o valor e as condições ambientais onde o mesmo será utilizado (Tabela 1).

Tabela 1. Comparativo entre os principais tipos de sensores de umidade do solo presentes no mercado.

Técnica	Custo	Influência	Vantagens	Desvantagens
TDR	Moderado	Pouca CE e T	Precisão	Tempo de resposta; custo moderado
FDR	Moderado	Média CE e T	Tempo de resposta	Custo para automação moderado
Capacitivo	Baixo	Média CE e T	Tempo de resposta; Baixo custo	Menor precisão que o TDR e o FDR
Resistivo	Baixo	Alta CE; T;	Tempo de resposta; Baixo custo	Afetado pela salinidade;
Sonda de Neutrôns	Alto	Ds; mineralogia	Leitura em diferentes profundidades	Custo elevado

Sendo, CE a condutividade elétrica, T a temperatura e DS a Densidade do solo.

Fonte: Zazueta & Xin, 1994; Evett, 2016.

1.3.5. CULTURA DA BETERRABA

A beterraba (*Beta vulgaris* L.) é uma das principais hortaliças cultivadas no Brasil, possuindo um ciclo de cultivo que varia entre 60 e 70 dias, sendo principalmente conhecida pela sua coloração forte de cor roxa/avermelhada e com sabor adocicado, sendo geralmente o produto de consumo a raiz tuberosa, porém suas folhas também podem ser consumidas (GONDIM, 2010).

Existem três tipos de beterraba, a açucareira, forrageira e a que é consumida pela população de modo geral. Apresentam diferenças notáveis tanto na aparência quanto na utilização, a beterraba açucareira ou beterraba branca como também é conhecida, é bastante cultivada na Europa, pois é a principal matéria prima para produção de açúcar, já a beterraba forrageira tem como finalidade a alimentação animal, sendo a mais popular no Brasil a beterraba de mesa (LANA et al., 2016).

Em termos de exigência nutricional, a beterraba vermelha apresenta significativa melhora na produção quando ocorre uma correta adubação e calagem do solo, porém em especial destacam-se a aplicação de nitrogênio, com maiores respostas de produção para as doses de 180 e 240 Kg ha⁻¹ e o boro. O boro está intimamente ligado com a qualidade das raízes (principal produto de interesse), uma vez que a cultura é exigente neste micronutriente e quando o solo possui baixas concentrações, observa-se manchas corticoides e áreas necróticas escuras (TRANI et al., 2013).

De maneira geral a beterraba apresenta tolerância moderada a salinidade, com uma salinidade limiar de 2,7 dS m⁻¹ da água de irrigação e até 4 dS m⁻¹ para salinidade do solo sem que haja perda do potencial produtivo, porém requer atenção durante a fase de germinação, no qual a condutividade elétrica do solo não poderá ultrapassar 3 dS m⁻¹, fase de maior sensibilidade a salinidade (AYERS & WESTCOT, 1985).

Em se tratando de estresse hídrico, a beterraba apresenta reduções no conteúdo de açúcar sob condições de estresse moderado e grave, o que decorre principalmente da menor acumulação de açúcar como fonte de reserva, em detrimento do seu direcionamento para manutenção dos tecidos da planta e conseqüentemente do crescimento da planta (STAGNARI et al., 2014). Ainda segundo o autor, durante o estresse hídrico observa-se um aumento nas concentrações do antioxidante betaxantina e no total fenólico, aumentando assim a atividade antioxidante na raiz da planta.

Apesar do estresse hídrico alto a moderado promover perdas significativas na cultura a produção em solos bem drenados promove ganhos de desenvolvimento da cultura, quando em

comparação a solos encharcados (NIWA et al., 2008). Já em relação a salinidade a cultivar Early Wonder demonstra aumento dos sólidos totais dissolvidos quando irrigada com água salobra com condutividade elétrica (CEa) de 5,8 dS m⁻¹ em comparativo as plantas irrigadas com águas com baixa salinidade (CEa de 0,3 dS m⁻¹) (GADELHA et al., 2021).

A beterraba é uma hortaliça rica em fibras, minerais (K, Na, Fe, Cu, Mg, Ca, P e Zn), vitaminas (retinol, ácido ascórbico e complexo B), elevadas concentrações de aminoácidos, e em se tratado de salinidade é provável que a mesma aumente o seu conteúdo de aminoácidos, por meio da síntese e regulação, de modo que haja um controle do íon sódio bem como da glicina betaína entre o vacúolo e o citoplasma (SUBBARAO et al., 2001; BAIÃO et al., 2017).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADLA, S.; RAI, N. K.; SRI KARUMANCHI, H.; TRIPATHI, S.; DISSE, M.; PANDE, S. Laboratory Calibration and Performance Evaluation of Low-Cost Capacitive and Very Low-Cost Resistive Soil Moisture Sensors. **Sensors**, v. 20, n. 2, p. 363, 2020.
- AHMAD, P.; JALEEL, C. A.; SALEM, M. A.; NABI, G.; SHARMA, S. Roles of enzymatic and nonenzymatic antioxidants in plants during abiotic stress. **Critical reviews in biotechnology**, v. 30, n. 3, p. 161-175, 2010.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements**. FAO Irrigation and Drainage paper 56. FAO, Rome, 1998, 300p.
- ALMEIDA, C. T.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; DELGADO, R. C.; CUBO, P.; RAMOS, M. C. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 4, p. 2013-2026, 2017.
- ASKRI, B.; AHMED, A. T.; ABICHO, T.; BOUHLILA, R. Effects of shallow water table, salinity and frequency of irrigation water on the date palm water use. **Journal of hydrology**, v. 513, p. 81-90, 2014.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. rev. 1, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 29, 1985. 160p.
- BAATH, G. S.; SHUKLA, M. K.; BOSLAND, P. W.; STEINER, R. L.; WALKER, S. J. Irrigation water salinity influences at various growth stages of Capsicum annum. **Agricultural water management**, v. 179, p. 246-253, 2017.
- BADAWY, E. S. M.; KHALID, K. A.; HEIKAL, A. A. E. M.; NAGDY, M. M. Effect of Salinity Stress and Soil Types on Growth, Photosynthetic Pigments and Essential Oil of Artemisia annua L. **Asian Journal of Crop Science**, v. 10, p. 40-47, 2018.
- BAIÃO, D.S.; DA SILVA, D. V.; DEL AGUILA, E. M.; PASCHOALIN, V. M. F. Nutritional, bioactive and physicochemical characteristics of different beetroot formulations. In **Food Additives**, InTech: Rijeka, p. 1–24, 2010.
- BANERJEE, P.; PRASAD, B. Determination of concentration of total sodium and potassium in surface and ground water using a flame photometer. **Applied Water Science**, v. 10, n. 5, p. 1-7, 2020.
- BARRS, H. D.; WEATHERLEY, P. E. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. **Australian Journal of Biological Science**, v. 15, n.3, p. 413-428, 1962.
- BRAY, E. A. Plant responses to water deficit. **Trends in plant science**, v. 2, n.2, p. 48-54, 1997.

CADENAS, E. Biochemistry of oxygen toxicity. **Annual review of biochemistry**, v. 58, n. 1, p. 79-110, 1989.

CARDENAS-LAILHACAR, B.; DUKES, M. D. Effect of temperature and salinity on the precision and accuracy of landscape irrigation soil moisture sensor systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 141, n. 7, p. 04014076, 2015.

CASTRO, F. C.; SANTOS, A. M. D. Salinity of the soil and the risk of desertification in the Semiarid region. **Mercator** (Fortaleza), v.19, p. e 19002, 2020.

CHAI, Q.; GAN, Y.; ZHAO, C.; XU, H. L.; WASKOM, R. M.; NIU, Y.; SIDDIQUE, K. H. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 3, p. 1-21, 2016.

CHOUDHURY, F. K.; RIVERO, R. M.; BLUMWALD, E.; MITTLER, R. Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. **The Plant Journal**, v. 90, n. 5, p. 856-867, 2016.

COELHO FILHO, M. A.; BASSOI, L. H.; ANGELOCCI, L. R.; COELHO, E. F.; PEREIRA, F. A. C. Relação solo-planta-atmosfera. In: SOUSA V. F.; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. ed.1, Brasília, DF: Embrapa, 2011. Cap. 1, p. 27-90.

D'IMPERIO, M.; MONTESANO, F. F.; RENNA, M.; LEONI, B.; BUTTARO, D.; PARENTE, A.; SERIO, F. NaCl stress enhances silicon tissue enrichment of hydroponic "baby leaf" chicory under biofortification process. **Scientia Horticulturae**, v. 235, p. 258-263, 2018.

DAI, X.; HUO, Z.; WANG, H. Simulation for response of crop yield to soil moisture and salinity with artificial neural network. **Field Crops Research**, v. 121, n. 3, p. 441-449, 2011.

DE SOUSA, J. R. M.; GHEYI, H. R.; BRITO, M. E. B.; DE LIMA, G. S. Dano na membrana celular e pigmentos clorofilianos de citros sob águas salinas e adubação nitrogenada. **Irriga**, v. 22, n.2, p. 353-368, 2017.

DE SOUZA, E. R.; DOS SANTOS FREIRE, M. B. G.; DA CUNHA, K. P. V.; DO NASCIMENTO, C. W. A.; RUIZ, H. A.; LINS, C. M. T. Biomass, anatomical changes and osmotic potential in *Atriplex nummularia* Lindl. cultivated in sodic saline soil under water stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 82, p. 20-27, 2012.

DEAN, T. J.; BELL, J. P.; BATY, A. J. B. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique, Part I. Sensor design and performance. **Journal of Hydrology**, v. 93, n 1-2, p. 67-78, 1987.

DODDS, W. K.; BRUCKERHOFF, L.; BATZER, D.; SCHECHNER, A.; PENNOCK, C.; RENNER, E.; TROMBONI, F.; BIGHAM, K.; GRIEGER, S. The freshwater biome gradient framework: predicting macroscale properties based on latitude, altitude, and precipitation. **Ecosphere**, v. 10, n.7, p. e02786, 2019.

DUARTE, H. H. F.; SOUZA, E. R. Soil water potentials and Capsicum annum L. under salinity. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 40, p. 1-11, 2016.

EVETT, S. R. **Soil Water Sensors for Agriculture** – Theory and Issues. In: NRCS Soil Water Sensor Webinar Series. USDA, Agricultural Research Service, 2016, 62p.

EVETT, S.R.; HENG, L.K.; MOUTONNET, P.; NGUYEN, M. L. **Field Estimation of Soil Water Content: A Practical Guide to Methods, Instrumentation, and Sensor Technology**. IAEA-TCS-n. 30. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2008, 131p.

FAYER, M. J.; GEE, G. W. Neutron scattering In: HILLEL, D.; ROSENZWEIG, C.; POWLSON, D.; SCOW, K.; SINGER, M.; SPARKS, D. **Encyclopedia of Soils in the environment**, 1 ed., Elsevier Inc - Academic press, 2005. v. 3, p. 6-12.

FELLER, U. Drought stress and carbon assimilation in a warming climate: Reversible and irreversible impacts. **Journal of Plant Physiology**, v. 203, p. 84-94, 2016.

FERREIRA, J. F.; LIU, X.; SUAREZ, D. L. Fruit yield and survival of five commercial strawberry cultivars under field cultivation and salinity stress. **Scientia Horticulturae**, v. 243, p. 401-410, 2019.

FLOWERS, T. J., COLMER, T. D. Salinity tolerance in halophytes. **New Phytologist**, v. 179, p. 945-963, 2008.

FLOWERS, T. J.; COLMER, T. D. Plant salt tolerance: adaptations in halophytes. **Annals of botany**, v. 115, n. 3, p. 327-331, 2015

GADELHA, B. B.; FREIRE, M. H. D. C.; SOUSA, H. C.; COSTA, F. H.; LESSA, C. I.; SOUSA, G. G. D. Growth and yield of beet irrigated with saline water in different types of vegetable mulching. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 12, p. 847-852, 2021.

GAO, Y.; XIE, Y.; JIANG, H.; WU, B.; NIU, J. Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching. **Field Crops Research**, v. 156, p. 40-47, 2014.

GHAZARYAN, K.; CHEN, Y. Hydrochemical assessment of surface water for irrigation purposes and its influence on soil salinity in Tikanlik oasis, China. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, p. 1-15, n. 383, 2016.

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S.; MILANOVIC, M. Precipitation and Drought Analysis in Serbia for the Period 1946–2017 In: NEGM, A. M.; ROMANESCU, G.; ZELENAKOVA, M. **Water Resources Management in Balkan Countries**, 1 ed. Springer Water, Springer Cham, 2020. p. 277-292.

GONDIM, A. **Catálogo Brasileiro de Hortaliças: saiba como plantar e aproveitar 50 das espécies mais comercializadas no país**. 1 ed., Brasília, DF: Embrapa Hortaliças: SEBRAE, 2010, 59p.

GOPINATH, S.; SRINIVASAMOORTHY, K.; SARAVANAN, K.; PRAKASH, R. Discriminating groundwater salinization processes in coastal aquifers of southeastern India:

geophysical, hydrogeochemical and numerical modeling approach. **Environment, Development and Sustainability**, v. 21, p. 2443-2458, 2019.

HANEKLAUS, S.; BLOEM, E.; SCHNUG, E. Hungry Plants: A short treatise on how to feed crops under stress. **Agriculture**, v. 8, n.3, p. 1-13, 2018.

HANSON, B.; MAY, D. **Drip Irrigation Salinity Management for Row Crops, University of California**. Agriculture and Natural Resources, ANR Publication 8447, 2011.13p

HURTADO, A. C.; CHICONATO, D. A.; DE MELLO PRADO, R.; JUNIOR, G. D. S. S.; FELISBERTO, G. Silicon attenuates sodium toxicity by improving nutritional efficiency in sorghum and sunflower plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 142, p. 224-233, 2019.

INBARAJ, M. P.; MUTHUCHELIAN, K. Photoinhibition of photosynthesis in leaves of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp. P152) under boron and high irradiance stresses. **Journal of Biosciences Research**, v. 2, n.2, p. 81-89, 2011.

JESUS, C. S.; DA SILVA UEBEL, L.; COSTA, S. S.; MIRANDA, A. L.; DE MORAIS, E. G.; DE MORAIS, M. G.; COSTA, J. A. V.; NUNES, I. L.; FERREIRA, E. S.; DRUZIAN, J. I. Outdoor pilot-scale cultivation of *Spirulina* sp. LEB-18 in different geographic locations for evaluating its growth and chemical composition. **Bioresource technology**, v. 256, p. 86-94, 2018.

JIMÉNEZ, A. L. Á. C.; DE ALMEIDA, C. D. G. C.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; DE MORAIS, J. E. F.; DE ALMEIDA, B. G.; DE ANDRADE, F. H. N. Accuracy of capacitive sensors for estimating soil moisture in northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104413, 2019.

KC, B.; CHAU, H. W.; MOHSEN, M.; CAMERON, K.; SAFA, M.; MCINDOE, I.; RUTTER, H.; DARK, A.; LEE, M.; PANDEV, V. P.; SCHULTZ, B.; PRASAD, K. Assessment of spatial and temporal variability in soil moisture using multi-length TDR probes to calibrate Aquaflex sensors. **Irrigation Science**, v. 39, p. 703-713, 2021.

KIRKHAM, M. B. **Principles of soil and plant water relations**. 2 ed , Academic Press Elsevier, 2014. 580p.

LANA, M. M.; DOS SANTOS, F. F.; MATOS, M. J. L. F.; TAVARES, S. A.; DE MELO, M. F. **Hortaliça** - Como comprar, conservar e consumir: Beterraba. 2ed., Brasília, DF: Embrapa hortaliças EMATER-DF, 2016. 2p.

LAWLOR, D. W. Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: stomata vs. metabolism and the role of ATP. **Annals of botany**, v. 89, n.7, p. 871-885, 2002.

LI, X.; JIN, M.; ZHOU, N.; JIANG, S.; HU, Y. Inter-dripper variation of soil water and salt in a mulched drip irrigated cotton field: Advantages of 3-D modelling. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 186-194, 2018.

LIMA, G. S.; GHEYI, H. R.; NOBRE, R. G.; DOS SOARES, L. A.; FERNANDES, P. D.; DE FREITAS FURTADO, G. Trocas gasosas, pigmentos cloroplastídicos e dano celular na

mamoneira sob diferentes composições catiônica da água. **Irriga**, v. 22, n.4, p. 757-774, 2017.

LIMA, G. S. D.; DIAS, A. S.; SOARES, L. A. D. A.; GHEYI, H. R.; NOBRE, R. G.; SILVA, A. A. R. D. Eficiência fotoquímica, partição de fotoassimilados e produção do algodoeiro sob estresse salino e adubação nitrogenada. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n.1, p. 211-220, 2019.

LINS, C. M. T.; DE SOUZA, E. R.; DE MELO, H. F.; PAULINO, M. K. S. S.; DOURADO, P. R. M.; DE CARVALHO LEAL, L. Y.; SANTOS, H. R. B. Pressure-volume (PV) curves in *Atriplex nummularia* Lindl. for evaluation of osmotic adjustment and water status under saline conditions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 124, p. 155-159, 2018

LIU, X.; WATTS, R. J.; HOWITT, J. A.; MCCASKER, N. Carbon and nutrient release from experimental inundation of agricultural and forested floodplain soil and vegetation: influence of floodplain land use on the development of hypoxic blackwater during floods. **Marine and Freshwater Research**, v. 71, n.2, p. 213-228, 2020.

LIU, Y.; MAUVE, C.; LAMOTHE-SIBOLD, M.; GUÉRARD, F.; GLAB, N.; HODGES, M.; JOSSIER, M. Photorespiratory serine hydroxymethyltransferase 1 activity impacts abiotic stress tolerance and stomatal closure. **Plant, cell & environment**, v. 42, n.9, p. 2567-2583, 2019.

LOVISOLO, C.; LAVOIE-LAMOUREUX, A.; TRAMONTINI, S.; FERRANDINO, A. Grapevine adaptations to water stress: new perspectives about soil/plant interactions. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 28, p. 53-66, 2016.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P.; SOARES, W. R.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M.; DE BARROS BRITO, S. S.; CUARTAS, L. A.; LEAL, K.; RIBEIRO NETO, G.; ALVALÁ, R. C. S.; MAGALHAES, A. R. Increase Risk of Drought in the Semiarid Lands of Northeast Brazil Due to Regional Warming above 4 C. In: NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; SOARES, W. R. **Climate change risks in Brazil**, 1 ed., Springer Cham, 2019. Cap.7, p. 181-200.

MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; DIAS, C. G. Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. **Agricultural water management**, v. 216, p. 339-350, 2019.

MATULA, S.; BÁTĚKOVÁ, K.; LEGESE, W. L. Laboratory performance of five selected soil moisture sensors applying factory and own calibration equations for two soil media of different bulk density and salinity levels. **Sensors**, v. 16, n. 11, p. 1912, 2016.

MENG, X.; ZHOU, J.; SUI, N. Mechanisms of salt tolerance in halophytes: Current understanding and recent advances. **Open life sciences**, v. 13, n.1, p. 149-154, 2018.

Meter Group Inc, 2017. **Soil moisture sensors**—How they work. Why some are not research-grade. Disponível em: <<https://www.metergroup.com/environment/articles/tdr-fdr-capacitance-compared/>>, visto em: 19/03/2020.

Meter Group Inc, 2019. **TEROS 32 User Manual**. 32p.

MOLES, T. M.; POMPEIANO, A.; REYES, T. H.; SCARTAZZA, A.; GUGLIELMINETTI, L. The efficient physiological strategy of a tomato landrace in response to short-term salinity stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 109, p. 262-272, 2016.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, p. 651-681, 2008.

NASCIMENTO, F. J. D. S. C.; BARROSO, A. D. A. F.; DOS SANTOS, H. D. O. R.; DE FREITAS LIMA, P. Hidrogeoquímica das águas subterrâneas da microrregião do Baixo Jaguaribe, Ceará, Brasil. **Águas Subterrâneas**, v. 35, n. 1, p. 1-11, 2021.

NASCIMENTO, H. H. C. D.; SANTOS, C. A. D.; FREIRE, C. S.; SILVA, M. A. D.; NOGUEIRA, R. J. M. C. Ajustamento osmótico em mudas de jatobá submetidas à salinidade em meio hidropônico. **Revista Árvore**, v. 39, p. 641-653, 2015.

NETO, G. B. S.; BAYMA, A. P.; NETO, S. B.; ROIG, H. L.; MENEZES, P. H. B. J. Análise de susceptibilidade a alagamento na bacia hidrográfica do Riacho Fundo—Distrito Federal por meio de Sistemas de Informação Geográfica—SIG. **Territorium**, v. 24, p. 77-87, 2017.

NIU, G.; SUN, Y.; MASABNI, J. Impact of low and moderate salinity water on plant performance of leafy vegetables in a recirculating NFT system. **Horticulturae**, v. 4, n.1, p. 1-13, 2018.

NIWA, K.; SEINO, N.; YOKOBORI, J.; KIKUCHI, K.; HONGO, C. Effect of soil type on the time-course of changes in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) productivity in Tokachi District, Hokkaido, Japan. **Soil science and plant nutrition**, v. 54, n.6, p. 928-937, 2008.

NOBEL, P. S. **Physicochemical and environmental plant physiology**. 2 ed., San Diego: Academic Press, 2 ed., 1999. 446p.

OLIVEIRA, W. J. D.; SOUZA, E. R.; ALMEIDA, B. G. D; SILVA, Ê. F. F.; MELO, H. F.; LEAL, L. Y. C. Soil water energetic status and cowpea beans irrigated with saline water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 685-691, 2016.

OSMAN, K. T. Saline and Sodic Soils In: OSMAN, K. T. **Management of Soil Problems**, 1 ed., Springer, Cham. 2018. Cap. 10, p. 255-298.

OUZOUNIDOU, G.; GIANNAKOULA, A.; ILIAS, I.; ZAMANIDIS, P. Alleviation of drought and salinity stresses on growth, physiology, biochemistry and quality of two *Cucumis sativus* L. cultivars by Si application. **Brazilian Journal of Botany**, v. 39, p. 531-539, 2016.

PARIHAR, P.; SINGH, S.; SINGH, R.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, p. 4056-4075, 2015.

PARK, C. H.; BEHRENDT, A.; LEDREW, E.; WULFMAYER, V. New approach for calculating the effective dielectric constant of the moist soil for microwaves. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, p.1-30, 2017.

PAUL, V.; SHARMA, L.; KUMAR, R.; PANDEY, R.; MEENA, R. C. Estimation of Chlorophylls/Photosynthetic Pigments–Their Stability is an Indicator of Crop Plant Tolerance to Abiotic Stresses. **Manual of ICAR Sponsored Training Programme for Technical Staff of ICAR Institutes on “Physiological Techniques to Analyze the Impact of Climate Change on Crop Plants”**, 8-14. 2017.

QADIR, M.; QUILLÉROU, E.; NANGIA, V.; MURTAZA, G.; SINGH, M.; THOMAS, R. J.; DRECHSEL, P.; NOBLE, A. D. Economics of salt-induced land degradation and restoration. **Natural resources forum**, v. 38, n.4, p. 282-295, 2014.

RENGASAMY, P. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. **Functional Plant Biology**, v. 37, n.7, p. 613-620, 2010.

RIBEIRO, M. R.; RIBEIRO FILHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T. Origem e classificação dos solos afetados por sais In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. 1ed., Fortaleza,CE: INCTSal, 2016. Cap. 2, p. 10-19.

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington, D.C.: United States Salinity Laboratory, United States Department of Agriculture - Handbook, 60, 1954, 160p.

RICHARDS, L. A.; GARDNER, W. Tensiometers for Measuring the Capillary Tension of Soil Water. **Agronomy Journal**, v. 28, n.5, p. 352-358, 1936.

RICHARDS, S. J. Soil moisture content calculations from capillary tension records. **Soil Science Society of America Journal**, v. 3, p. 57-64, 1938.

ROBOCK, A. Hydrology, Floods and Droughts: Soil Moisture. In: NORTH, G. R.; PYLE, J. A.; ZHANG, F. **Encyclopedia of Atmospheric Sciences**, 2 ed, Elsevier Inc, 2014. p. 232-239.

RODRIGUES, L. G.; DE ARAÚJO MOREIRA, P. B.; DOS SANTOS, L. F.; TEIXEIRA, Y. N.; FIRMINO, P. R. A.; DE OLIVEIRA, C. C. F. Balanço Hídrico e Classificação Climática para Estação Meteorológica do Cariri. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 2, p. 618-633, 2022.

RODRIGUES, O.; DIDONET, A. D.; ROMAN, E. S. **Avaliação do Potencial Hídrico Foliar em Plantas de Trigo**. Passo Fundo, RS: Embrapa Trigo, 2003. 12 p. (Embrapa Trigo. Circular Técnica Online; 15). Disponível: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/ci/p_ci15.html

RODRÍGUEZ, E. S.; RUBIO-WILHELMI, M.; CERVILLA, L. M.; BLASCO, B.; RIOS, J. J.; ROSALES, M. A.; ROMER, O, L. M.; RUIZ, J. M. Genotypic differences in some physiological parameters symptomatic for oxidative stress under moderate drought in tomato plants. **Plant science**, v. 178, n. 1, p. 30-40, 2010.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; DOS ANJOS, L. H. C.; DE OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; DE ALMEIDA, J. A.; DE ARAÚJO FILHO, J. C.; DE OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed., Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.

SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; HEMMINGSEN, E. A.; BRADSTREET, E. D. Sap pressure in vascular plants. **Science**, v. 148, n. 3668, p. 339-346, 1965.

SCHWARTZ, R. C.; CASANOVA, J. J.; PELLETIER, M. G.; EVETT, S. R.; BAUMHARDT, R. L. Soil permittivity response to bulk electrical conductivity for selected soil water sensors. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n.2, p. 1-13, 2013.

SCHWARTZ, R. C.; EVETT, S. R.; ANDERSON, S. K; ANDERSON, D. J. Evaluation of a direct-coupled time-domain reflectometry for determination of soil water content and bulk electrical conductivity. **Vadose zone journal**, v. 15, n.1, p. 1-8, 2016.

SILVA, A. O.; SILVA, E. F. F.; KLAR, A. E. Yield of beet cultivars under fertigation management and salinity control in a protected environment. **Chilean journal of agricultural research**, v. 76, n. 4, p. 463-470, 2016.

SILVA, E. N.; SILVEIRA, J. A. G.; RODRIGUES, C. R. F.; DE LIMA, C. S.; VIÉGAS, R. A. Contribuição de solutos orgânicos e inorgânicos no ajustamento osmótico de pinhão-mansão submetido à salinidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 437-445, 2010.

SILVA, F. G. D.; DUTRA, W. F.; DUTRA, A. F.; OLIVEIRA, I. M. D.; FILGUEIRAS, L.; MELO, A. S. D. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 946-952, 2015.

SILVEIRA, J. A. G.; SILVA, S. L. F.; SILVA, E. N.; VIÉGAS, R. A. Mecanismos biomoleculares envolvidos com a resistência ao estresse salino em plantas. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. 2ed., Fortaleza, CE: INCTSal, 2016. Cap. 11, 181-196.

SINGH, G. Salinity-related desertification and management strategies: Indian experience. **Land Degradation & Development**, v. 20, n. 4, p. 367-385, 2009.

SKIERUCHA, W.; WILCZEK, A. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10–500 MHz frequency range. **Sensors**, v. 10, n.4, p. 3314-3329, 2010.

SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. **Operating instructions: 2710ARL and 2725ARL: 2710ARL Tensiometer and 2725ARL Jet Fill Tensiometer**, Santa Barbara, CA: Soilmoisture, 2011, 12p.

STAGNARI, F.; GALIENI, A.; SPECA, S.; CAFIERO, G.; PISANTE, M. Effect of light and water supply on morphological and physiological leaf traits of red beet. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 459-468, 2014.

SU, S. L.; SINGH, D.N.; BAGHINI, M. S. A. Critical review of soil moisture measurement, **Measurement**, v. 54, p. 92-105, 2014.

SUBBARAO, G. V.; WHEELER, R. M.; LEVINE, L. H.; STUTTE, G. W. Glycine betaine accumulation, ionic and water relations of red-beet at contrasting levels of sodium supply. **Journal of Plant Physiology**, v. 158, n. 6, p. 767-776, 2001.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

TAN, X.; WU, J.; HUANG, J.; WU, M.; ZENG, W. Design of a new TDR probe to measure water content and electrical conductivity in highly saline soils. **Journal of soils and sediments**, v. 18, p. 1087-1099, 2018.

TAN, W. Y.; THEN, Y. L.; LEW, Y. L.; TAY, F. S. Newly calibrated analytical models for soil moisture content and pH value by low-cost YL-69 hygrometer sensor. **Measurement**, v. 134, p. 166-178, 2019.

TEHRANY, M. S.; JONES, S.; SHABANI, F. Identifying the essential flood conditioning factors for flood prone area mapping using machine learning techniques. **Catena**, v. 175, p. 174-192, 2019.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ed., Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574p.

THOMPSON, R. B.; GALLARDO, M.; FERNANDEZ, M. D.; VALDEZ, L. C.; MARTINEZ-GAITAN, C. Salinity effects on soil moisture measurement made with a capacitance sensor. **Soil Science Society of America Journal**, v. 71, n. 6, p. 1647-1657, 2007.

TRANI, P. E.; TIVELLI, S. W., FACTOR, L., BREDA JUNIOR, J. M. **Calagem e adubação da beterraba**. 1 ed., Campinas, SP: Instituto Agrônômico de Campinas, 2013. 15p.

TUTEJA, N.; GILL, S. S. **Abiotic Stress Response in Plants**, 1 ed., Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2016. 456p.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

WANG, X.; YANG, J.; LIU, G.; YAO, R.; YU, S. Impact of irrigation volume and water salinity on winter wheat productivity and soil salinity distribution. **Agricultural Water Management**, v. 149, p. 44-54, 2015.

WELLS, T.; FITYUS, S. Neutron soil moisture probe operation in saline environments. **Soil science**, v. 176, n. 12, p. 642-651, 2011.

WILLADINO, L.; CAMARA, T. R. Tolerância das plantas à salinidade: Aspectos fisiológicos e bioquímicos. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, n.11, p.1-23, 2010.

WU, G.-Q.; JIAO, Q.; SHUI, Q.-Z. Effect of salinity on seed germination, seedling growth, and inorganic and organic solutes accumulation in sunflower (*Helianthus annuus* L.). **Plant, Soil and Environment**, v. 61, n. 5, p. 220-226, 2015.

YADAV, R. K; SANGWAN, R. S.; SRIVASTAVA, A. K.; SANGWAN, N. S. Prolonged exposure to salt stress affects specialized metabolites-artemisinin and essential oil accumulation in *Artemisia annua* L.: metabolic acclimation in preferential favour of enhanced

terpenoid accumulation accompanying vegetative to reproductive phase transition. **Protoplasma**, v. 254, p. 505-522, 2017.

YAMADA, M.; KURODA, C.; FUJIYAMA, H. Growth promotion by sodium in amaranthaceous plants. **Journal of Plant Nutrition**, v. 39, n.8, p. 1186-1193, 2016.

YAMORI, W. Photosynthetic response to fluctuating environments and photoprotective strategies under abiotic stress. **Journal of plant research**, v. 129, n. 3, p. 379-395, 2016.

YOUNG, A.; LOWE, G. Carotenoids—Antioxidant Properties. **Antioxidants**, v. 7, n. 2, p. 1-4, 2018.

YUAN, C.; FENG, S.; HUO, Z.; JI, Q. Effects of deficit irrigation with saline water on soil water-salt distribution and water use efficiency of maize for seed production in arid Northwest China. **Agricultural water management**, v. 212, p. 424-432, 2019.

ZAREI, A. R. Evaluation of drought condition in arid and semi-arid regions, using RDI index. **Water resources management**, v. 32, p. 1689-1711, 2018.

ZAZUETA, F. S.; XIN, J. Soil moisture sensors. **Soil Sci**, v. 73, p. 391-401, 1994.

ZHANG, X.; ZHANG, J.; LI, L.; ZHANG, Y.; YANG, G. Monitoring citrus soil moisture and nutrients using an iot based system. **Sensors**, v. 17, n. 3, p. 447, 2017.

ZHAO, Y.; PANG, H.; WANG, J.; HUO, L.; LI, Y. Effects of straw mulch and buried straw on soil moisture and salinity in relation to sunflower growth and yield. **Field Crops Research**, v. 161, p. 16-25, 2014.

ZHAO, Y.; WANG, S.; LI, Y.; LIU, J.; ZHUO, Y.; CHEN, H.; WANG J.; XU, L.; SUN, Z. Extensive reclamation of saline-sodic soils with flue gas desulfurization gypsum on the Songnen Plain, Northeast China. **Geoderma**, v. 321, p. 52-60, 2018.

ZLATEV, Z.; YORDANOV, I. T. Effects of soil drought on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in bean plants. **Bulgarian Journal of Plant Physiology**, v. 30, n. 3-4, p. 3-18, 2004.

CAPÍTULO II

STATUS HÍDRICO DA BETERRABA CULTIVADA SOB FAIXAS DE UMIDADE DO SOLO E IRRIGAÇÃO COM ÁGUA SALOBRA

RESUMO

Em regiões semiáridas, devido a escassez hídrica, comumente se utiliza águas com concentrações elevadas de sais em detrimento da ausência de águas de qualidade superior para o cultivo, o que pode ocasionar a existência de dois tipos de estresse de forma conjunta. Sendo assim, é imprescindível investigar os efeitos da salinidade e umidade do solo em culturas com importância socioeconômica para estas regiões. Objetivou-se com essa pesquisa avaliar parâmetros biométricos e fisiológicos da beterraba (*Beta vulgaris* L.) cv. Tall Top em condição de estresse abióticos. Para isso, foi realizado um experimento em casa de vegetação no Centro de Pesquisas Vegetais (CEPEVE) coordenadas 8° 01' 01" S, 34° 56' 41" O, na Universidade Federal Rural de Pernambuco, em um delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições em arranjo fatorial 5 x 3, sendo 5 (cinco) níveis de concentrações de cloreto de sódio representados em termos de condutividades elétrica da água (CEa: 0, 2, 4, 6 e 8 dS m⁻¹) e 3 (três) níveis de umidade do solo: 100, 90 e 80% da umidade na capacidade de campo. Foram determinados parâmetros biométricos (massa fresca e seca da parte aérea e raiz), potenciais hídrico e osmótico foliar e calculado o ajustamento osmótico (AO), teor relativo de água (TRA), Suculência foliar (SF) e danos na membrana. Houve aumento da suculência foliar (SF) em decorrência da salinidade. Houve redução do potencial osmótico da beterraba devido ao aumento dos níveis de salinidade do solo, sendo mais evidenciado no solo com umidade de 80%. O maior ajustamento osmótico foi observado na umidade de 90%, tendo um aumento do AO de 50% em relação a umidade de 100% e de 29% em relação a umidade de 80% para a CE de 4 dS m⁻¹. Os níveis moderados de sais (até 4 dS m⁻¹) e de umidade (90%), resultaram nos maiores valores de crescimento e produção da beterraba, tendo máxima produção alcançada para umidade em 90% na CE de 3,6 dS m⁻¹ em relação a parte aérea e de 2,5 dS m⁻¹ para as raízes. O cultivo irrigado a 100% da capacidade de campo com água salobra sem uso de sistema de drenagem promove o maior aumento da salinidade do solo, acarretando reduções mais significativas dos parâmetros da cultura. A tolerância da cultura da beterraba sob diferentes níveis de umidade e salinidade pode ser aferido por meio dos potenciais energéticos da cultura, TRA, danos na membrana e SF.

Palavras-chave: relações hídricas; capacidade de campo do solo; danos da membrana; potenciais de água na planta.

ABSTRACT

In semi-arid regions, due to water scarcity, water with high concentrations of salts is commonly used by the absence of water of superior quality for cultivation, which can lead to the existence of two types of stress together. Therefore, it is essential to investigate the effects of salinity and soil moisture on crops with socioeconomic importance for these regions. The objective of this research was to evaluate biometric and physiological parameters of beetroot (*Beta vulgaris* L.) cv. Tall Top in abiotic stress condition. For this, an experiment was carried out in a greenhouse at the Centro de Pesquisas Vegetais (CEPEVE) coordinates 8° 01' 01" S, 34° 56' 41" W, at the Federal Rural University of Pernambuco, in a randomized block design, with four replications in a 5 x 3 factorial arrangement, with 5 (five) levels of sodium chloride concentrations represented in terms of electrical conductivities of water (ECw: 0, 2, 4, 6 and 8 dS m⁻¹) and 3 (three) soil moisture contents: 100, 90 and 80% of field capacity. Biometric parameters (fresh and dry mass of shoots and roots), leaf water potential and osmotic potential were determined and osmotic adjustment (OA), relative water content (RWC), leaf succulence (LS) and membrane damage were calculated. There was an increase in LS due to salinity. There was a reduction in the osmotic potential of the beetroot due to the increase in soil salinity levels, being more evident in the soil with 80% moisture, however the soil that resulted in the greatest osmotic adjustment had moisture maintained at 90%, with an increase in OA of 50% in relation to 100% humidity and 29% in relation to 80% humidity for an EC of 4 dS m⁻¹. The soil irrigated with moisture content of 100% at field capacity had the highest salinity level among the 3 studied. Moderate levels of salts (up to 4 dS m⁻¹) and moisture content (90%) resulted in the highest growth and production values, with maximum production achieved for moisture at 90% in EC of 3.6 dS m⁻¹ in relation to shoots and 2.5 dS m⁻¹ for roots. Irrigated cultivation at moisture content of 100% of field capacity with brackish water without the use of a drainage system promotes the greatest increase in soil salinity, resulting in more significant reductions in crop parameters. The tolerance of the beetroot crop with different levels of moisture and salinity can be measured by means of the energy potentials of the crop, RWC, membrane damage and LS.

Keywords: water relations; soil field capacity; membrane damage; water potentials in the plant.

2.1. INTRODUÇÃO

A seca e a salinidade são estresses abióticos que estão presentes em larga escala no mundo, causando perdas na produção agrícola, além de afetar propriedades do solo. Esses estresses ocorrem de forma associada ou isolada (SHAH et al., 2017; COLES & ESLAMIAN, 2017; OSMAN, 2018). A seca é um problema comum em locais com baixa precipitação e alta evapotranspiração, porém por meio da irrigação é possível contornar este problema, uma vez que quando ocorre de maneira isolada, o suprimento de água em proporções adequadas possibilita a supressão do problema (WANG et al., 2019). Contudo, locais onde ocorrem a seca podem também conter fontes hídricas com altas concentrações de sais e neste caso, quando as mesmas são utilizadas durante a irrigação propiciam a salinização e/ou sodificação do solo, gerando assim um novo problema (RIBEIRO et al., 2016).

A importância de se monitorar adequadamente a umidade e salinidade do solo pode ser observada durante o manejo da irrigação, e dentre os benefícios se incluem menores efeitos deletérios dos sais na planta, além da maior eficiência dos recursos hídricos e energéticos (GRABOW et al., 2013; CHAI et al., 2016; CHEN et al., 2018; QI et al., 2018). É importante destacar ainda a necessidade de se utilizar método de irrigação compatíveis com a situação, como por exemplo o uso da irrigação localizada, devido a sua alta eficiência, juntamente com a maior manutenção da umidade e salinidade na zona radicular da planta, propiciando menores efeitos deletérios nas mesmas (HANSON & MAY, 2011).

A escolha da espécie vegetal para cultivos em ambiente com problemas de salinidade é um fator importante, especialmente quanto à tolerância (AYERS & WESTCOT, 1985). As culturas amplamente cultivadas e comercializadas no mundo são geralmente aquelas que respondem de maneira negativa à presença de sais no solo, as quais são classificadas como glicófitas. Em se tratando de tolerância das plantas ao estresse salino, um fator que deverá ser levado em consideração é a afinidade com íons específicos, como é o caso das natrofilicas, na qual observam-se melhorias das características físicas e químicas da planta na presença do elemento sódio, resultando assim em uma maior produtividade, quando se faz presente (WILLADINO & CÂMARA, 2010; HANEKLAUS et al., 2018).

Existe um grande número de métodos para monitoramento dos efeitos dos sais e da seca nas plantas, sendo um dos principais, a observação das relações hídricas da cultura, pois além de avaliar as características da planta é possível constatar a existência de mecanismos de tolerância aos estresses, como é o caso do ajustamento osmótico (SAVÉ et al., 1993; MUNNS et al., 2016; BLUM, 2017).

A beterraba de mesa, é uma das hortaliças mais consumidas no Brasil, devido à concentração de nutrientes, vitaminas, minerais e aminoácidos. Estes por sua vez, são a provável fonte para ajustamento osmótico da beterraba a condições de estresse, sendo assim, antioxidantes importantes tanto para planta em situação de estresse, quanto para a população que a consome (SUBBARAO et al., 2001; GONDIM, 2010; BAIÃO et al., 2017). A beterraba possui tolerância distinta aos estresses, apresentando reduções em seu conteúdo de açúcar sob condições graves ou moderadas de estresse hídrico e em termos de salinidade apresenta tolerância moderada (AYERS & WESTCOT, 1985; STAGNARI et al., 2014).

Diante do exposto, objetivou-se avaliar o desenvolvimento da cultura da beterraba em termos de status hídrico, ao que se refere ao potencial hídrico e osmótico, teor relativo de água e suculência foliar sob condições de salinidade nos níveis de 0, 2, 4, 6 e 8 dS m⁻¹ e umidade do solo controlada em 100, 90 e 80% da capacidade de campo, de tal forma que possibilite o melhor entendimento do solo e da planta sob condições de irrigação com água salobra.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Caracterização do ambiente experimental

O experimento foi conduzido em ambiente protegido, em casa de vegetação pertencente ao Centro de Pesquisa Vegetais (CEPEVE) na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Campus Recife, Localizado a 8° 01' 01" de latitude sul, 34° 56' 41" de longitude oeste, e altitude de 6,5 m.

A estrutura era composta lateralmente por tela anti-afídeo e com cobertura com filme plástico difusor de 150 micras, sendo suas dimensões internas 11 x 6 m, totalizando 66m² (Figura 1).



Figura 1. Estufa utilizada durante o experimento.

2.2.2. Coleta do solo

A coleta do solo foi realizada na camada do solo entre as profundidades de 0 a 30 cm na Fazenda Nossa Senhora do Rosário (Coordenadas geográficas 8° 34' 11" latitude sul, 37° 48' 54" longitude oeste e 630m de altitude acima do nível do mar) (CISAGRO, 1991), no município de Pesqueira – PE, região Agreste e semiárida do Nordeste do Brasil. Segundo classificação de Köppen o clima da região é BSh que, por sua vez, indica se tratar de um clima extremamente quente e semiárido, tendo uma precipitação total média anual de 730 mm e uma evapotranspiração de referência média anual de 1683 mm (USDA, 2014). Segundo Sistema Brasileiro de Classificação do Solo, o solo é classificado como Neossolo Flúvico (SANTOS et al., 2018).

O solo foi coletado e transportado até a Universidade Federal Rural de Pernambuco e colocado em uma lona em ambiente protegido, para secar ao ar. Posteriormente, o solo foi destorroado e passado em peneira de malha de 4 mm com intuito de manter a microagregação do solo e aumentar a representatividade de campo durante os experimentos.

2.2.3. Caracterização inicial de solo

Para caracterização física do solo realizou-se o procedimento de preparo da amostra, tornando-a terra fina seca ao ar (TFSA) e nela determinou-se granulometria e argila dispersa

em água pelo método do densímetro, densidade do solo pelo método do anel volumétrico e de partículas pelo balão volumétrico (TEIXEIRA et al., 2017). Determinou-se ainda, a umidade na capacidade de campo (CC), na qual o potencial mátrico correspondeu a 100 cca, sendo determinado por meio da mesa de tensão utilizando amostras indeformadas extraídas dos vasos (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização física inicial do Neossolo Flúvico utilizado nos experimentos.

Variável	Valor	Unidade
Areia Total	200	g kg ⁻¹
Silte	560	g kg ⁻¹
Argila	240	g kg ⁻¹
Classe textural	Franco-Siltoso	
Ds	1,34	g cm ⁻³
Dp	2,60	g cm ⁻³
ADA	101,60	g kg ⁻¹
PT	48,68	%
GF	58,36	%
GD	41,64	%
θ_{cc}	0,42	cm ⁻³ cm ⁻³

Ds = Densidade do solo; Dp = Densidade de partículas; ADA = Argila dispersa em água; PT = Porosidade total; GF = Grau de floculação; GD = Grau de dispersão; θ_{cc} = Umidade volumétrica na capacidade de campo.

Para caracterização química determinou-se os cátions Na⁺ e K⁺ trocáveis, extraídos por acetato de amônio 1 mol L⁻¹ (THOMAS, 1982). Os cátions Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ foram extraídos por cloreto de potássio 1 mol L⁻¹, o fósforo disponível foi extraído em Mehlich⁻¹ e o carbono orgânico por oxidação por dicromato de potássio (TEIXEIRA et al., 2017). O extrato de saturação foi obtido por meio do preparo da pasta de saturação (RICHARDS, 1954) e determinou-se a condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) e o pH em água no extrato 1:2,5 (TEIXEIRA et al., 2017) (Tabela 2).

Tabela 2. Caracterização química inicial do Neossolo Flúvico utilizado durante os experimentos.

Variáveis	Valores
Extrato de saturação	
CEes (dS m ⁻¹)	1,39
Complexo de troca	
pH (1:2,5)	5,76
Na ⁺ (cmolc.dm ⁻³)	0,57
K ⁺ (cmolc.dm ⁻³)	0,40
Ca ²⁺ (cmolc.dm ⁻³)	11,68
Mg ²⁺ (cmolc.dm ⁻³)	3,90
P (mg.dm ⁻³)	120,51
SB (cmolc.dm ⁻³)	16,54
Al ³⁺ (cmolc.dm ⁻³)	0,00
H ⁺ + Al ³⁺ (cmolc.dm ⁻³)	3,07
CTC Efetiva (cmolc.dm ⁻³)	16,54
T (cmolc.dm ⁻³)	19,61
V (%)	84,33
CO (g.kg ⁻¹)	18,17
PST (%)	2,89

P = fósforo disponível; SB = Soma de bases; H⁺ + Al³⁺ = Acidez potencial; CTC = Capacidade de Troca de Cátions; T = CTC Total; V = Saturação por base; CO = Carbono Orgânico; CEes = Condutividade elétrica; PST= porcentagem de sódio trocável.

2.2.4. Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi realizado em um delineamento em blocos casualizados com 4 repetições em arranjo fatorial 5 x 3, sendo 5 níveis de concentração de cloreto de sódio (NaCl) das águas de irrigação representadas pelos níveis de condutividade elétrica de (CE) 0; 2; 4; 6 e 8 dS m⁻¹ e 3 níveis de umidade do solo, sendo eles representados por 100, 90 e 80% da umidade na capacidade de campo (obtida por meio da mesa de tensão), totalizando 60 unidades experimentais.

O sistema de irrigação foi composto por uma motobomba de 1/2cv, microcontrolador, válvulas solenoides, emissores gotejadores autocompensantes de 4L/h (Figura 2). Já as unidades experimentais eram compostas por vasos com capacidade de 15L.

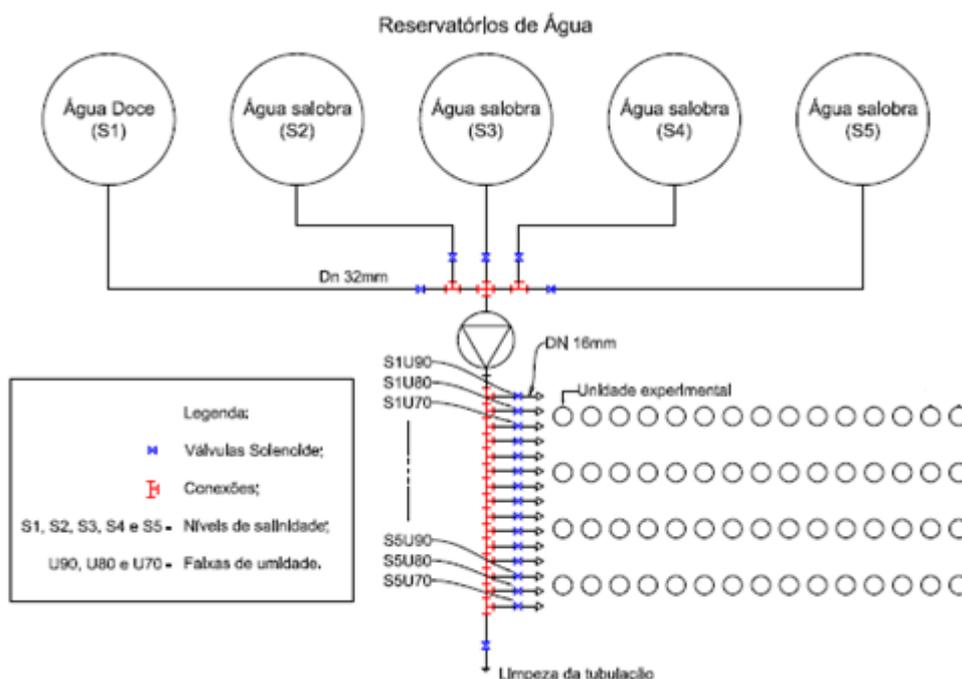


Figura 2. Esquema experimental e do sistema de irrigação.

A umidade do solo era restabelecida toda vez que a umidade reduzia até 10% em relação aos respectivos tratamentos, ou seja, quando isto ocorria o sistema era acionado e a lâmina evapotranspirada era repostada até o retorno da umidade para os valores de 100%, 90% e 80% da umidade do solo na capacidade de campo.

A lâmina de irrigação para cada tratamento foi obtida a partir da diferença entre as umidades de 100 e 90% para o tratamento um, 90 e 80% tratamento dois e 80 e 70% para o tratamento três. Feito isso, foi calculado o tempo necessário para o sistema de irrigação fazer a reposição da lâmina evapotranspirada com base na vazão dos emissores.

2.2.5. Preparo das águas

Durante a condução dos experimentos foram confeccionadas águas com cinco níveis distintos de condutividade elétrica (CE). Os níveis de salinidade foram obtidos a partir do incremento de cloreto de sódio (NaCl) na água de abastecimento local (controle), até a obtenção dos respectivos níveis de CE: 0 (água de abastecimento público sem incremento de cloreto de sódio com $CE < 0,1 \text{ dS m}^{-1}$), 2,0; 4,0; 6,0 e $8,0 \text{ dS m}^{-1}$.

2.2.6. Unidade experimental, Preparo do solo e cultura

A unidade experimental foi representada por vaso de polietileno com capacidade para 15L, com diâmetro de 30 cm e volume útil preenchido por solo de 11L e uma massa de solo seco de 17,6 kg, obtendo assim uma densidade de aproximadamente 1,6 g/cm³.

Fisicamente o solo utilizado no preenchimento dos vasos passou pelo preparo de amostra até obtenção do solo peneirado em malha de 4 mm, já a adubação mineral de nitrogênio, fósforo e potássio, ocorreu conforme recomendação para a cultura da beterraba nos valores de 40; 60 e 30 Kg/ha de N, P₂O₅ e K₂O (CAVALCANTE et al., 2008).

As mudas foram produzidas a partir do semeio em bandejas de produção, sendo as sementes utilizadas livre de agrotóxico, sendo deixadas em água por 12 horas para quebra da dormência e posteriormente colocadas em material inerte, nas bandejas. Durante o desenvolvimento das mudas as mesmas foram irrigadas com solução nutritiva a meia força e transplantadas para os vasos após a obtenção de 4 folhas verdadeiras (FURLANI et al., 1999).

2.2.7. Condução do experimento

O experimento foi conduzido em bancadas em nível, e cada bloco experimental foi representado por 15 unidades, sendo os tratamentos casualizados entre si. O espaçamento adotado foi de 50 cm entre os respectivos centros de cada parcela e cada bancada comportava 2 blocos.

As mudas foram transplantadas para os vasos e cada unidade experimental foi representada por 2 plantas de beterraba (*Beta vulgaris* L.) cultivar Early Wonder Tall Top, sendo colhidas aos 55 dias após o transplântio (DAT).

Para melhor aclimatação da espécie ao clima da região, foi utilizado tela de sombreamento de 50% durante toda a condução do experimento (Figura 3).

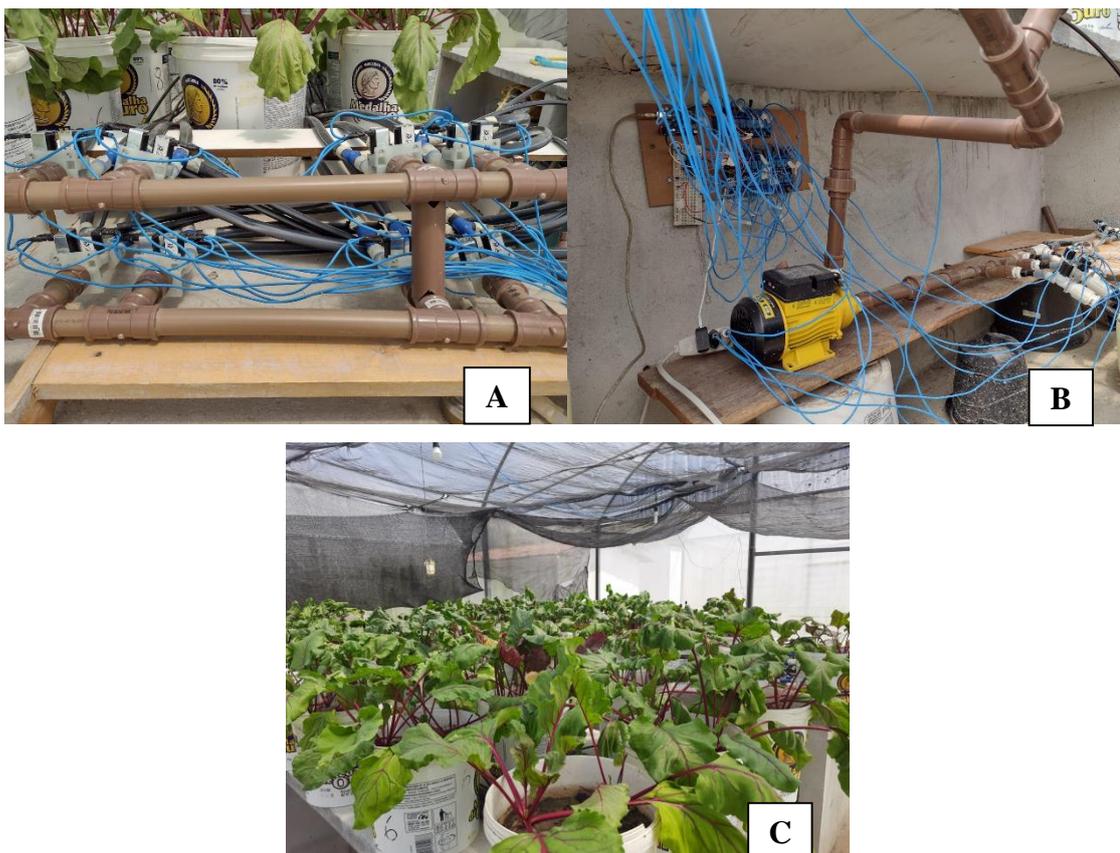


Figura 3. Sistema de irrigação: válvulas (A), motobomba (B), Visão geral (C).

2.3. VARIÁVEIS ANALISADAS

2.3.1. Variáveis biométricas e de produção

Foi obtido aos 34 e 55 DAT o número de folhas, a largura e comprimento do limbo foliar e altura da planta (cm), além da massa fresca e seca da planta (g planta^{-1}).

A massa fresca foi obtida imediatamente após a colheita, sendo dividida em parte aérea e raiz da planta, e a massa seca, também separada em parte aérea e raiz foi obtida após a secagem do material vegetal em estufa de aeração forçada a 65°C por 72h.

2.3.2. Fluorescência da clorofila

A fluorescência da clorofila *a* das plantas foi avaliada ao que se refere à fluorescência inicial (F_0), fluorescência máxima (F_m), fluorescência variável (F_v), além do rendimento quântico máximo do fotossistema II (F_v/F_m) e a razão F_v/F_0 , utilizando o fluorômetro (Marca: Fluorpen, Modelo: FP-100). As leituras foram realizadas aos 36 e aos 50 dias após o transplântio (DAT) entre às 9 e 11h da manhã em folhas aclimatadas ao escuro por meio de um

pinçamento durante 30 minutos, que por sua vez, manteve no escuro a área da folha a ser avaliada (Figura 4).



Figura 4. Análise da fluorescência da clorofila.

2.3.3. Pigmentos fotossintéticos

Para a quantificação do conteúdo de pigmentos fotossintéticos nas lâminas foliares, amostras pesando aproximadamente 0,1 g de tecidos foliares fragmentados foram colocadas em frascos contendo 10 mL de etanol 95 % P.A. e envoltos com papel alumínio aos 50 DAT. Foi adotada a metodologia descrita por Lichtenthaler (1987), sendo que a absorvância (A) da clorofila a (Ca) lida em 664,2 nm, a clorofila b (Cb) em 648,6 nm, e os carotenoides (Cx+c) em 470 nm. Feito isso, foi calculada a concentração da clorofila a, b e carotenoides em µg de pigmentos por g de massa fresca (Equação 1).

$$C_a = (13,36A_{664,2} - 5,10A_{648,6})x \frac{V}{1000}$$

$$C_b = (27,43A_{648,6} - 8,12A_{664,2})x \frac{V}{1000}$$

$$C_{(a+b)} = (5,24A_{664,2} - 22,24A_{648,6})x \frac{V}{1000}$$

$$C_{(x+c)} = \left(\frac{1000A_{470} - 2,13C_a - 97,64C_b}{209} \right) x \frac{V}{1000}$$

Equação 1

2.3.4. Teor Relativo de Água (TRA)

No *predawn*, aos 52 dias após o transplântio, foram coletados 5 (cinco) discos foliares que tiveram seu peso fresco (PF) anotado imediatamente após a coleta e posteriormente submetidos a saturação em água destilada para alcançarem o peso turgescência durante 48h, em ambiente refrigerado e protegidos da luz, sendo obtido assim o peso turgido (PT) e, por fim, foram colocados para secar em estufa de aeração forçada a 65°C por 48h, para obtenção do peso seco (PS), e assim determinou-se o teor relativo de água (TRA) conforme equação (2) abaixo (Equação 02) (SILVEIRA et al., 2003).

$$TRA(\%) = \frac{PF-PS}{PT-PS} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

2.3.5. Suculência foliar (SF)

Os valores de suculência foliar foram obtidos por meio dos dados de TRA, a partir das relações massa fresca (MF), massa seca (MS) e área dos discos foliares (A), representada pela equação abaixo (Equação 3) (Delf, 1912).

$$SF = \frac{MF-MS}{A} \quad \text{Equação 3}$$

Em que,

MF = massa fresca (g);

MS = massa seca (g);

A = área dos discos foliares (dm²);

2.3.6. Danos na membrana

A integridade da membrana celular foi avaliada por meio da observação do vazamento de eletrólitos do tecido foliar. Para isso, 20 discos foliares foram coletados, tendo 1 cm de diâmetro cada; e imersos em 30 ml de água destilada por 24 horas, para realização da primeira leitura de condutividade elétrica, conhecida como condutividade livre (CL). Feito isso, as amostras ficaram em banho maria a 100 °C por 1 hora, para a realização da segunda leitura de

condutividade elétrica, chamada de condutividade total (CT). Por fim, foi calculada a porcentagem de danos da membrana (DN) (Equação 4) (VASQUEZ-TELLO et al., 1990).

$$DN(\%) = \frac{CL}{CT} * 100 \quad \text{Equação 4}$$

Em que,

CL - Condutividade livre (dS m⁻¹);

CT - Condutividade total (dS m⁻¹).

2.3.7. Potencial Hídrico foliar

No quarto dia que antecede a colheita no período da *predawn* foi avaliado, por meio da câmara de Pressão de Scholander (modelo 615D da PMS Instrument Company), potencial hídrico foliar das plantas de beterraba (Ψ_w), diretamente no local do experimento. Para tal, foi coletada uma folha completamente expandida e, após corte em bisel no pecíolo, a mesma foi introduzida na câmara e submetida a uma pressão de fluxo constante até que o pecíolo apresentasse um espelhamento, ou seja, no momento em que a seiva estava na iminência de extravasar, sendo assim, anotada a pressão do momento de ocorrência.

2.3.8. Potencial osmótico na planta

Para a determinação da osmolalidade total do tecido foliar, as folhas coletadas para o potencial hídrico, foram maceradas em almofariz com pistilo com auxílio de nitrogênio líquido. A seiva foi filtrada utilizando tecido musseline e posteriormente centrifugada a 10.000 g por 10 min a 4 °C. Uma alíquota de 10 µL do sobrenadante foi utilizada para a determinação da osmolalidade, com um osmômetro de pressão de Vapor (VAPRO, Modelo 5600, Wescor). Os valores obtidos em milimoles por quilograma foram convertidos em potencial osmótico (Ψ_o), por meio da equação (5) de Van't Hoff (KIRKHAM, 2014; HILLEL, 2007; DE SOUZA et al., 2012).

$$\Psi_o(MPa) = - \text{moles do soluto} * R * T \quad \text{Equação 5}$$

Em que, R é a constante universal dos gases (0,008314 MPa. Kg. K⁻¹.mmol⁻¹) e T é a temperatura em Kelvin.

Para determinação do potencial osmótico do solo, foi realizado o processo de obtenção do extrato de saturação, a partir da extração e filtração da pasta saturada do solo em papel filtro quantitativo (RICHARDS, 1954). Assim como para avaliação do potencial osmótico da planta, uma alíquota de 10 µL foi utilizada do extrato de saturação do solo resultante da filtração da pasta saturada sob vácuo.

2.3.9. Ajustamento Osmótico

Por ocasião de coleta das folhas para potencial hídrico foliar, coletou-se também uma folha próxima e com características semelhantes (idade e expansão) para a realização do ajustamento osmótico. As folhas coletadas foram acondicionadas em isopor com gelo e transportadas para o laboratório, onde foram postas para saturar em sacos plásticos totalmente preenchidos por água destilada, por 24h a 4°C no escuro.

Após atingirem o completo turgor, as folhas foram secas em papel toalha e posteriormente seguiu-se as mesmas etapas realizadas durante a obtenção da seiva para determinação do potencial osmótico da folha, sendo elas: maceração com cadinho e pistilo, filtração, centrifugação e coleta do sobrenadante.

As leituras de osmolalidade também foram obtidas por meio do osmômetro de pressão a vapor e determinou-se o potencial osmótico por meio da equação de Van't Hoff. A partir daí os resultados de ajustamento osmótico, foram obtidos a partir da diferença entre o potencial osmótico das plantas controle em relação as plantas estressadas (equação 6) (BLUM, 1989).

$$AO_{tot} = \Psi_{oc}^{100} - \Psi_{os}^{100} \quad \text{Equação 6}$$

Em que,

AO_{tot} = Ajustamento osmótico total;

Ψ_{oc}^{100} = Potencial osmótico das plantas controle a pleno turgor;

Ψ_{os}^{100} = Potencial osmótico das plantas estressadas a pleno turgor.

2.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados das análises de solo e plantas, foram tabulados e submetidos a uma série de análises estatísticas, sendo elas descritivas por meio de medidas de tendência central (média, mediana e moda) e de dispersão (desvio-padrão, assimetria e curtose).

Cada parâmetro utilizado para avaliar os diferentes níveis de umidade e as crescentes concentrações de NaCl, passaram por programa estatístico com intuito principal de realizar a análise de variância (ANOVA) e observar se houve ou não diferença significativa a 5 ou 1 % de probabilidade.

Uma vez realizada a ANOVA, os diversos parâmetros que apresentaram significância a pelo menos 5% de probabilidade ($p < 0,05$), passaram por ajustes de equações de regressão, com o objetivo de obter o comportamento gráfico e a equação que explicou os dados obtidos de modo que apresentaram, entre outros fatores, um desvio de regressão não significativo, alto coeficiente de determinação (R^2) e/ou explicação biológica, de forma que possibilite a estimação de dados por meio das equações geradas.

Para avaliar os diferentes níveis de umidade e salinidade, também foi utilizado o teste de comparação de média Scott-Knott a 5% de probabilidade.

2.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1. Fluorescência da clorofila e Pigmentos fotossintéticos

Resultado da análise estatística para as variáveis da fluorescência da clorofila e dos pigmentos fotossintéticos (Tabela 3).

Tabela 3. Resumo da análise de variância das variáveis de fluorescência da clorofila e pigmentos fotossintéticos da beterraba.

Fator	F0	Fm	Fv/fm 36 DAT	Fv/fm 50 DAT	CLa	CLb	Car.
<i>θcc</i>	11,53**	6,27**	0,47ns	2,51ns	3,70*	2,18ns	6,44**
CEa	3,23*	0,68ns	3,72*	0,28ns	4,09**	3,36*	5,26**
<i>θcc</i> x CEa	1,27ns	1,71ns	1,68ns	2,97*	2,45*	2,42*	3,50**
CV (%)	7,9	8,8	2,3	2,2	13,8	13,9	12,7

θcc = fator umidade; CEa = Fator condutividade elétrica da água de irrigação; *θcc* x CEa = interação entre os fatores umidade e Condutividade elétrica da água; CV = coeficiente de variação; F0= fluorescência inicial; Fm= fluorescência máxima; Fv/fm=Rendimento quântico máximo do fotossistema II; CLa = clorofila a; CLb = Clorofila = b; Car.= carotenoides; DAT = dias após o transplante; ** $p < 0,1$; * = $p < 0,05$; ns = não significativo.

2.5.1.1. Fluorescência da clorofila

A fluorescência inicial (F0) foi significativa para a umidade do solo ($p < 0,01$) e para a CE da água de irrigação ($p < 0,05$). Observa-se resposta oposta da F0 aos fatores estudados, enquanto o nível intermediário de umidade estabelecido neste trabalho (90% da capacidade de campo) causou redução significativa da mesma (Figura 5A), o nível de salinidade, também intermediário (4 dS m⁻¹), causou aumento significativo da F0 (Figura 5B).

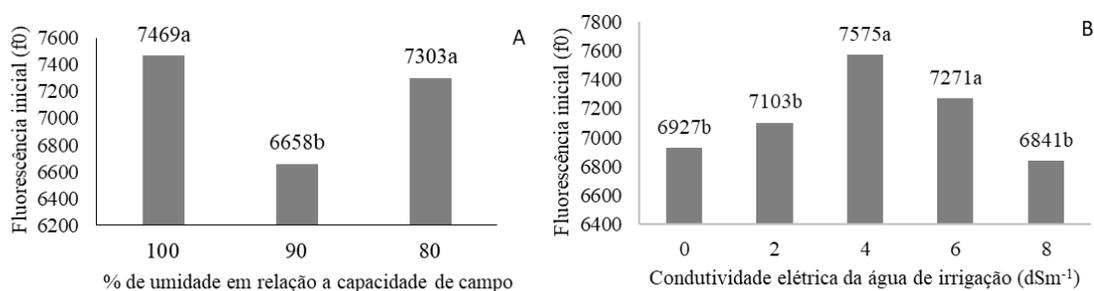


Figura 5. Fluorescência inicial da beterraba cultivada sob diferentes níveis de umidade do solo (A) e irrigada com diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação (B) aos 36 DAT. Letras iguais não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de média Scott-Knott.

A variável fluorescência máxima (Fm) apresentou diferença significativa apenas para umidade do solo ($p < 0,01$). Assim como para F0 observou-se redução significativa da variável quando a beterraba foi cultivada com uma umidade de 90% da capacidade de campo (Figura 6), entretanto a Fm não apresentou resposta significativa aos tratamentos salinos.

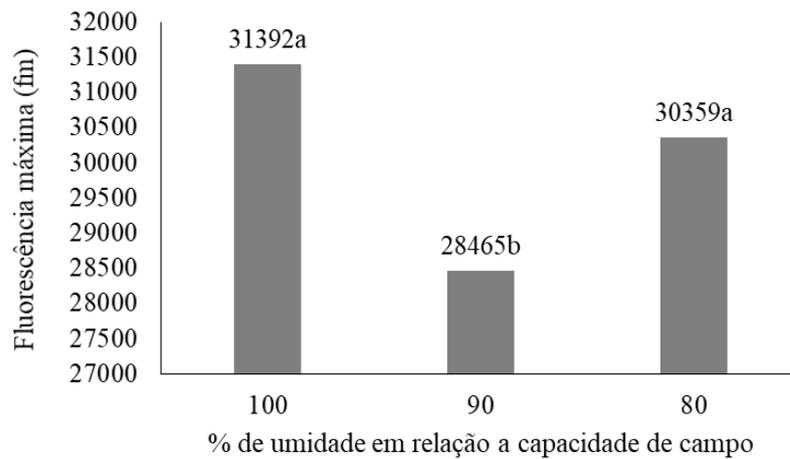


Figura 6. Fluorescência máxima da beterraba cultivada sob diferentes níveis de umidade do solo aos 36 DAT. Letras iguais não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de média Scott-Knott.

A fluorescência variável (Fv) apresentou diferença significativa apenas para umidade do solo ($p < 0,05$). Assim como para as variáveis anteriores (F0 e Fm), uma redução significativa ocorreu para umidade de 90% da capacidade de campo (Figura 7).

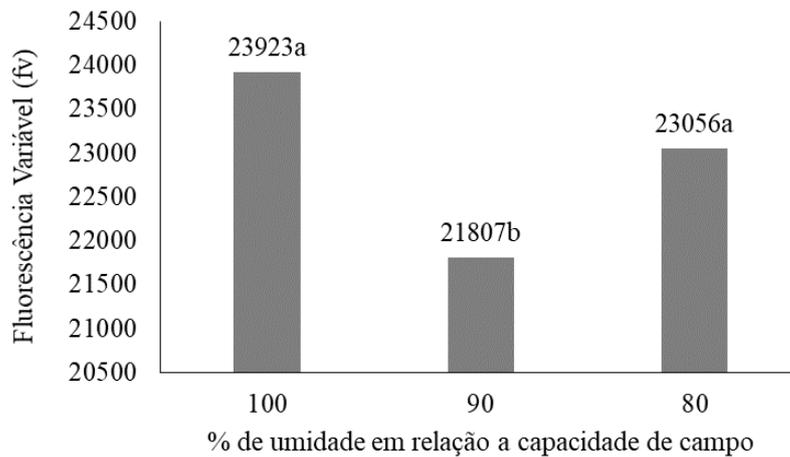


Figura 7. Fluorescência variável da beterraba cultivada sob diferentes níveis de umidade do solo aos 36 DAT. Letras iguais não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de média Scott-Knott.

Aos 36 DAT verificou-se efeito significativo da CEa sobre o rendimento quântico máximo (Fv/Fm) ($p < 0,05$), sendo verificada uma redução da razão Fv/Fm para os níveis

moderados de salinidade (Figura 8A). Já aos 50 DAT houve interação significativa entre os fatores CEa e as diferentes faixas de umidade do solo a 5% de probabilidade, observa-se valores máximos para umidade de 80% na CEa de 4,9 dS m⁻¹ correspondente a 0,771 e de mínimo para umidade de 90% na CEa de 4,6 dS m⁻¹ correspondendo a 0,755 (Figura 8B).

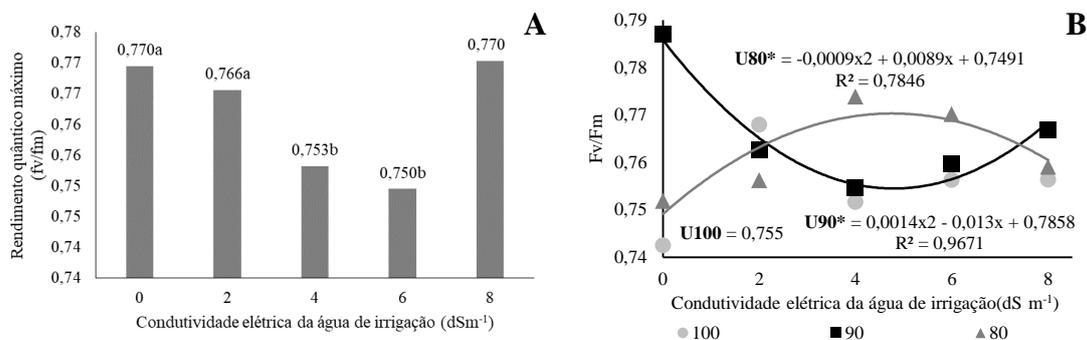


Figura 8. Rendimento quântico máximo (Fv/Fm) da beterraba cultivada sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação aos 36 DAT (A) e aos 50 DAT (B). Letras iguais não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de média Scott-Knott. ●, ■ e ▲ representam as umidades a 100, 90 e 80% da capacidade de campo respectivamente.

Pode haver aumento da fluorescência inicial e máxima em detrimento ao estresse hídrico, seja em decorrência do excesso ou escassez hídrica (ZHANG et al., 2019). No caso desta pesquisa os valores mais baixos são obtidos pelo nível de 90% da capacidade de campo, o que provavelmente indica uma condição favorável para o cultivo da beterraba, o mesmo foi observado para culturas como sorgo e feijão, quando estas foram irrigadas com umidades de 80% da capacidade de campo (MONTEIRO et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2018).

Em se tratando de salinidade, de modo geral as plantas apresentam reduções da eficiência fotossintética quando na presença excessiva de sais e mais especificamente quando há excesso de cloreto de sódio (ALKAHTANI et al., 2020; MARTINS et al., 2020). Entretanto é importante destacar que, aos 30 DAT, o fator salinidade foi preponderante, uma vez que a umidade não afetou significativamente ($p > 0,05$), porém os únicos valores que apresentaram redução significativa foram os valores de salinidade moderada, ou seja, os níveis de 4 e 6 dS m⁻¹.

Outro ponto chave da discussão, é a ordem dos valores, ou seja, a eficiência fotossintética apresentada aos 30 DAT, apesar de ter uma redução significativa para os níveis 4 e 6 dSm⁻¹, não ficaram abaixo de 0,75, ou seja, um indicativo de tolerância da cultura aos estresses, uma vez que, valores entre 0,75 e 0,85 são considerados valores típicos, indicativo da não ocorrência da fotoinibição (BOLHÀR-NORDENKAMPF & ÖQUIST, 1993).

Neste tipo de pesquisa a duração e severidade do estresse devem ser levados em consideração (WILLADINO & CAMARA, 2010), uma vez que tornou mais significativa a atuação dos fatores propostos na pesquisa. Além disso, o fator *eustress* também deve ser levado em consideração, uma vez que ao nível de 90% de umidade em um primeiro momento acarretou ganhos de eficiência, bem como o efeito da salinidade moderada na umidade de 80%, promoveu uma tendência de aumento da eficiência fotossintética da planta.

Sendo importante destacar ainda que, apesar da umidade passar a apresentar uma interação significativa aos 50 DAT, novamente não foram observados valores inferiores a 0,75, e apesar do tratamento de 80% com níveis moderados de salinidade apresentar valores mais altos que os níveis de 100 e 90%, a diferença é pequena e não demonstra significância em relação ao teste de média scott-kott ($p>0,05$). Por isso, a importância de se trabalhar com variáveis análogas, mas que permitem o aumento da sensibilidade da diferença entre os tratamentos, como é o caso da variável f_v/f_0 no caso da eficiência máxima do fotossistema II (LICHTENTHALER et al., 2005).

A razão entre a fluorescência variável (F_v) e a fluorescência inicial (F_0) gerou um comportamento semelhante ao observado pela razão F_v/F_m , apresentando uma interação significativa entre os fatores salinidade e umidade do solo ($P<0,05$).

Destaca-se que neste caso, houve diferença significativa para as umidades do solo nos tratamentos 0 e 4 dSm^{-1} pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade, sendo o maior valor observado no tratamento de menor salinidade com a umidade de 90%, além da diferenciação e aumento do tratamento com 80% da capacidade de campo na CEa de 4 $dS m^{-1}$ em relação aos demais níveis de umidade para esta mesma CEa (Figura 9).

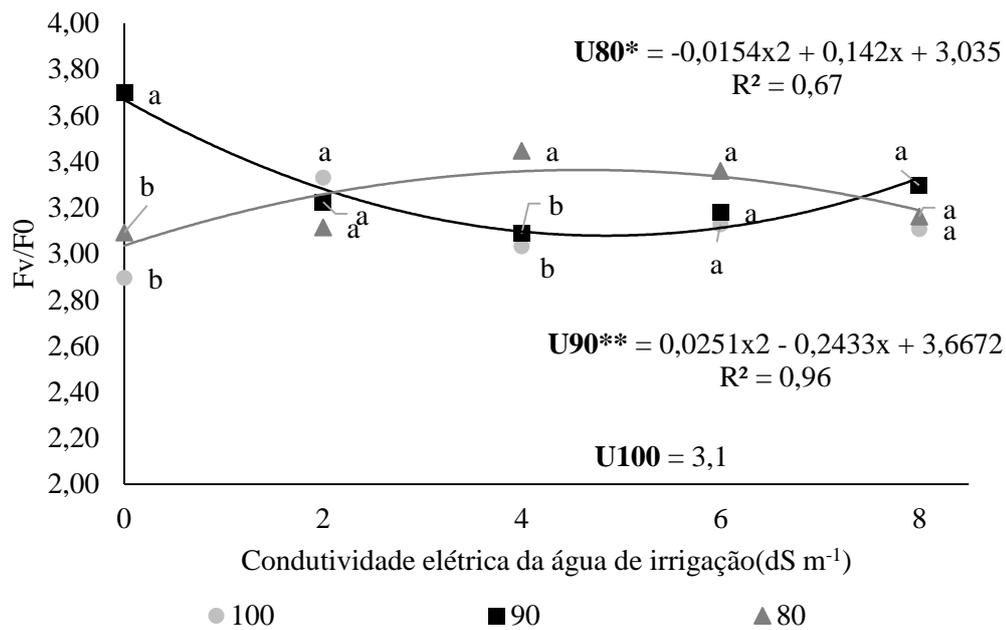


Figura 9. Razão entre a fluorescência variável (Fv) e a fluorescência inicial (F0) da beterraba cultivada sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação aos 50 DAT. Letras iguais não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de média Scott-Knott. ●, ■ e ▲ representam as umidades a 100, 90 e 80% da capacidade de campo respectivamente.

A razão entre Fv e F0 apesar de relacionada a razão Fv e Fm comumente utilizada para determinação da eficiência quântica máxima do fotossistema II, demonstra ser mais sensível para aumentar variações significativas dos resultados de estresses abióticos, (LICHTENTHALER et al., 2005; AZEVEDO NETO et al., 2011). Neste caso específico, permitiu a observação da significância do maior resultado apresentado pela umidade de 90%, quando a beterraba foi irrigada sem acréscimo de sais e do aumento significativo da umidade de 80% ao nível de 4 dS m⁻¹ da água de irrigação em relação aos níveis de 100 e 90%, ou seja, o acréscimo de cloreto de sódio a níveis moderados promoveu ganhos da eficiência fotossintética da planta quando irrigada sob umidade de 80% da capacidade de campo.

Por fim, observa-se que a umidade de 100% da capacidade de campo inibiu os efeitos da salinidade no aparato fotossintético da planta, de modo a se verificar valores médios para Fv/Fm e Fv/F0, sem que haja tendência de alteração dos dados. A manutenção da umidade em valores elevados pode promover a redução dos efeitos da salinidade na planta, seja em detrimento do maior fornecimento de água, ou por uso de técnicas como a cobertura do solo (ZHANG et al., 2018; YUAN et al., 2019).

2.5.1.2. Pigmentos fotossintéticos

Houve interação entre os fatores salinidade da água de irrigação e a umidade do solo ($p < 0,05$) para as clorofilas *a* e *b*, sendo observado nestas variáveis, reduções entre o nível controle e o maior nível de salinidade na umidade de 90% da capacidade de campo, na ordem de 20 e 31%, respectivamente.

Apesar das reduções apresentadas entre o controle e o nível de 8 dS m^{-1} para a umidade de 90%, ressalta-se que assim como na fluorescência, maiores valores foram observados nesta mesma umidade quando o sistema era irrigado com água controle em relação aos tratamentos de 80 e 100%, bem como uma tendência de resultados semelhantes entre as diferentes faixas de umidade, quando as beterrabas foram irrigadas com o nível mais alto de salinidade (Figura 10).

Assim como observado na fluorescência da clorofila, observou-se tendência de valores médios para os pigmentos estudados quando foram irrigados com 100% da capacidade de campo.

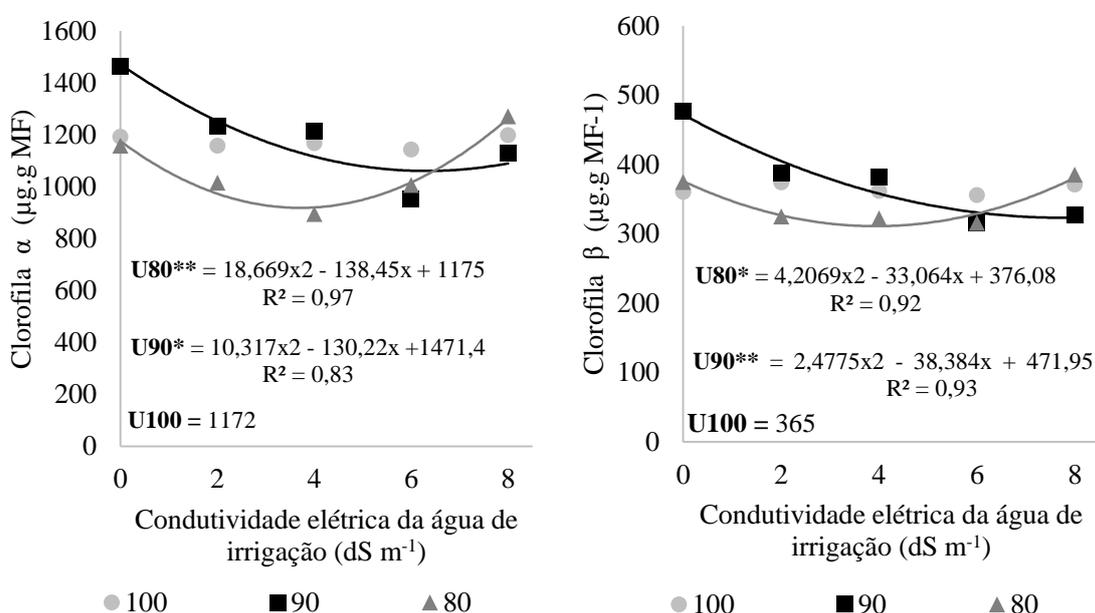


Figura 10. Clorofila *a* e *b* da beterraba cultivada sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação aos 50 DAT. ●, ■ e ▲ representam as umidades a 100, 90 e 80% da capacidade de campo respectivamente.

Houve interação significativa entre a salinidade e a umidade do solo para os carotenoides ($p < 0,01$). Em relação ao comportamento e tendência, estes se repetiram aos

observados pelas clorofilas *a* e *b*. Enquanto o nível de 90% de umidade da capacidade de campo apresentou uma redução entre o controle e o nível mais severo na ordem de 23%, a umidade de 80 apresentou aumento de 12 %, já o valor médio apresentado pela umidade de 100% foi de 280 µg por grama de massa fresca (MF) (Figura 11).

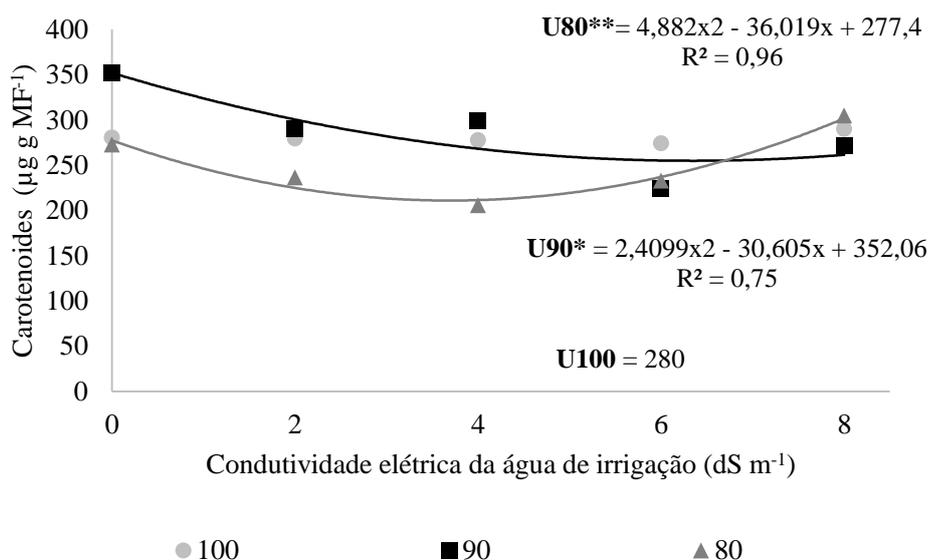


Figura 11. Carotenoides da beterraba cultivada sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação aos 50 DAT. ●, ■ e ▲ representam as umidades a 100, 90 e 80% da capacidade de campo respectivamente.

Provavelmente há tolerância na cultura da beterraba à salinidade, associados com os melhores resultados da umidade de 90% devido a cultura ser adaptada a solos bem drenados, uma vez que é relatado na literatura que solos mal drenados ou com secas excessivas prejudicam a produtividade da cultura (NIWA et al., 2008).

Assim como na fluorescência da clorofila, os pigmentos fotossintéticos foram representados por valores médios na umidade de 100% da capacidade de campo e o valor de 80% de umidade tendeu a se aproximar das demais umidades quando cultivada a 8 dS m⁻¹, um indicativo provável efeito benéfico do sódio a cultura.

Plantas natrofilicas tendem a apresentar melhores resultados do seu aparato fotossintético na presença de sódio, principalmente quando comparadas a plantas glicófitas que não se beneficiam do elemento; além disso, na beterraba sob condições de estresse hídrico moderado resulta em um aumento do índice de área foliar, o que por sua vez acarreta em um

aumento da interceptação de luz e melhora o uso de água da folha sob estresse (BROADLEY et al., 2012; EL-KATONY & EL-FATAH, 2021).

2.5.2. Biometria da beterraba

Resultado da análise estatística das variáveis de biometria da beterraba (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da análise de variância para as variáveis biométricas da beterraba.

Fator	MFF	MFR	NF	NF	AP	AP	CL	CL	LF	LF	DR	CR
			34	55	34	50	34	55	34	55		
			DAT									
θcc	0,99 ^{ns}	16,48 ^{**}	5,19 ^{**}	8,26 ^{**}	2,48 ^{ns}	0,19 ^{ns}	2,73 ^{ns}	5,50 ^{**}	1,81 ^{ns}	1,22 ^{ns}	2,52 ^{ns}	9,40 ^{**}
CEa	4,69 ^{**}	1,03 ^{ns}	0,54 ^{ns}	0,96 ^{ns}	7,63 ^{**}	4,18 ^{**}	3,10 [*]	4,24 ^{**}	0,75 ^{ns}	6,30 ^{**}	3,32 [*]	0,58 ^{ns}
θcc x CEa	3,97 ^{**}	4,17 ^{**}	2,00 ^{ns}	0,95 ^{ns}	1,63 ^{ns}	2,33 [*]	1,39 ^{ns}	2,22 [*]	2,59 [*]	0,42 ^{ns}	3,09 ^{**}	2,38 [*]
CV (%)	17,9	6,3	9,4	9,1	5,5	6,3	8,3	7,0	10,6	8,7	8,5	8,3

θcc = fator umidade; CEa = Fator condutividade elétrica da água de irrigação; θcc x CEa = interação entre os fatores umidade e Condutividade elétrica da água; CV = coeficiente de variação; MFF = massa fresca da folha; MFR = massa fresca da raiz; NF = número de folhas; AP = altura da planta; CL = comprimento do Limbo; LF = largura foliar; DR = diâmetro da raiz; CR = comprimento da raiz; DAT = dias após o transplante; ** $p < 0,1$; * $p < 0,05$; ^{ns} = não significativo ($p > 0,05$).

O número de folhas não variou significativamente para o fator CE da água de irrigação, mas diferiu para os diferentes a umidade do solo aos 34 e 55 DAT ($p < 0,01$), com destaque para as umidades de 90 % e 100% da capacidade de campo, ressaltando que o mesmo comportamento se repetiu, entretanto, o aumento no número de dias reduziu a quantidade de folhas para todos os tratamentos. (Figura 12).

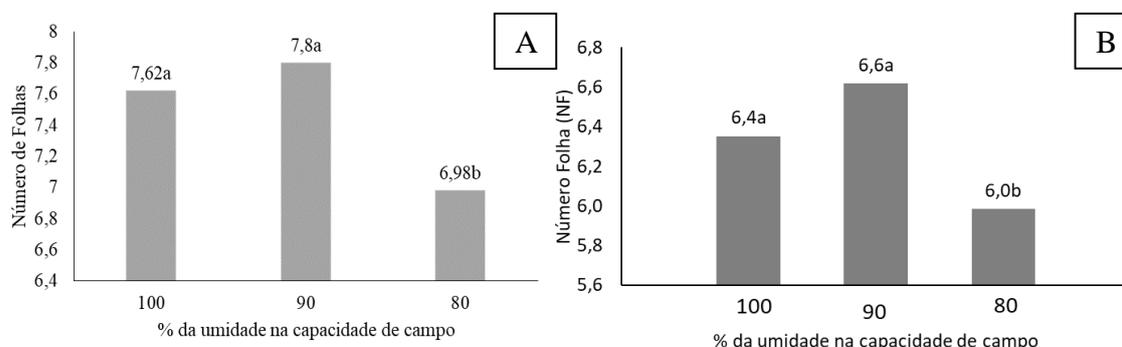


Figura 12. Número de folhas da beterraba sob diferentes faixas de umidade do solo aos 34(A) e 55(B) dias após o transplante. Letras iguais não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott ao nível de 5%.

A altura da beterraba e o comprimento do limbo foliar foram influenciados significativamente apenas pelo fator salinidade da água de irrigação a 1 e a 5% respectivamente. Com base no comportamento gráfico, estimou-se um ponto de máxima altura da beterraba de 44,91 cm para uma respectiva CE de 3,56 dS m⁻¹ (Figura 13). O comprimento do limbo foliar dos níveis de 2 e 4 dS m⁻¹ foram significativamente maiores que os demais níveis de salinidade.

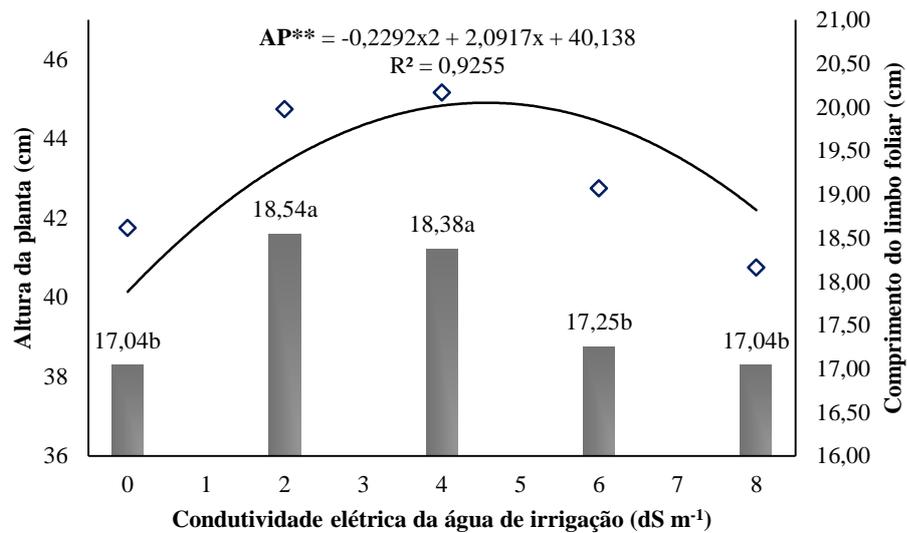


Figura 13. Altura da beterraba e comprimento do limbo foliar sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação aos 34 dias após o transplante. Letras iguais não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott ao nível de 5%.

Aos 55 DAT houve interação significativa entre os fatores para altura da planta ($p < 0,01$) e comprimento do limbo foliar ($p < 0,05$). No qual se destaca níveis de 90% da umidade para ambas as variáveis, apresentando valores de 3,2 e 4,3% a mais em relação aos níveis de 100 e 80% respectivamente para altura da planta quando baseado no ponto de máxima de 3,4 dS m⁻¹. Já em relação ao comprimento do limbo foliar, observa-se comportamento semelhante para os níveis de 90 e 80%, porém a umidade a 100% não apresentou tendência dos dados, obtendo assim uma média de 22,35 cm (Figura 14).

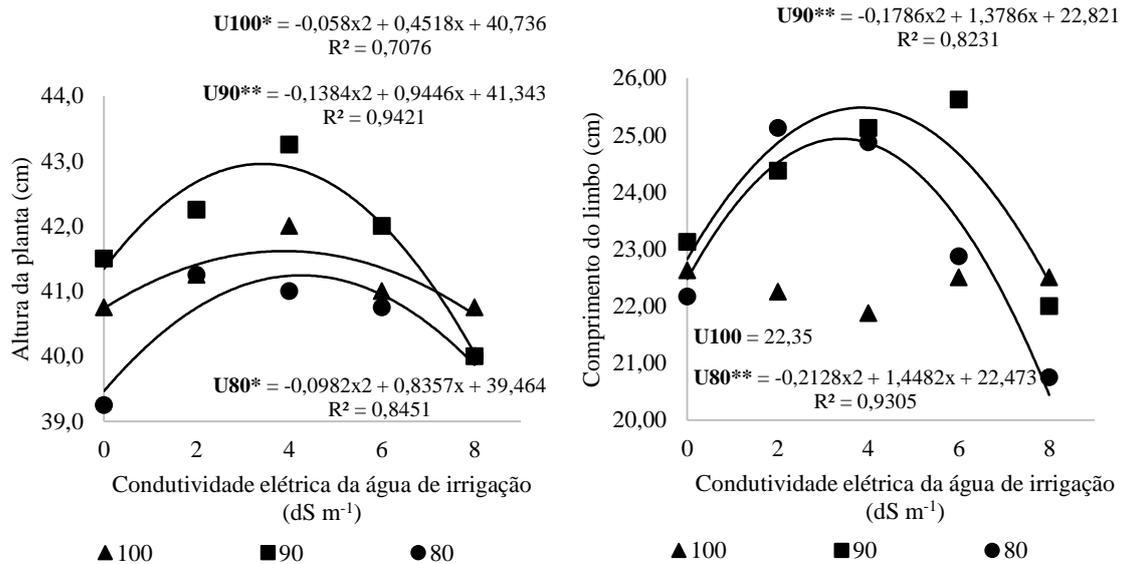


Figura 14. Altura e comprimento do limbo foliar da beterraba sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação e % da umidade na capacidade de campo aos 55 dias após o transplante. ▲ , ■ e ● representam as umidades a 100, 90 e 80% da capacidade de campo respectivamente.

Observou-se na largura foliar interação significativa entre os fatores condutividade elétrica da água de irrigação e umidade do solo aos 34 DAT ($p < 0,05$). Destaca-se um ponto de interseção entre a largura das folhas da beterraba nos tratamentos 100 e 90 para CE, estimada em $5,5 \text{ dS m}^{-1}$ e em $5,9 \text{ dS m}^{-1}$ entre os tratamentos de 90 e 80% da umidade na capacidade de campo (Figura 15A). Já aos 55 DAT, apenas o fator salinidade causou alterações significativas ($p < 0,01$) (Figura 15B) e observou-se uma tendência dos dados com máxima estimada de $16,34 \text{ cm}$ para CE de $3,6 \text{ dS m}^{-1}$ e que os níveis de $2,0$; $4,0$ e $6,0 \text{ dS m}^{-1}$, não diferiram estatisticamente entre si, mas foram superiores aos níveis de 0 e $8,0 \text{ dS m}^{-1}$ ($p < 0,05$).

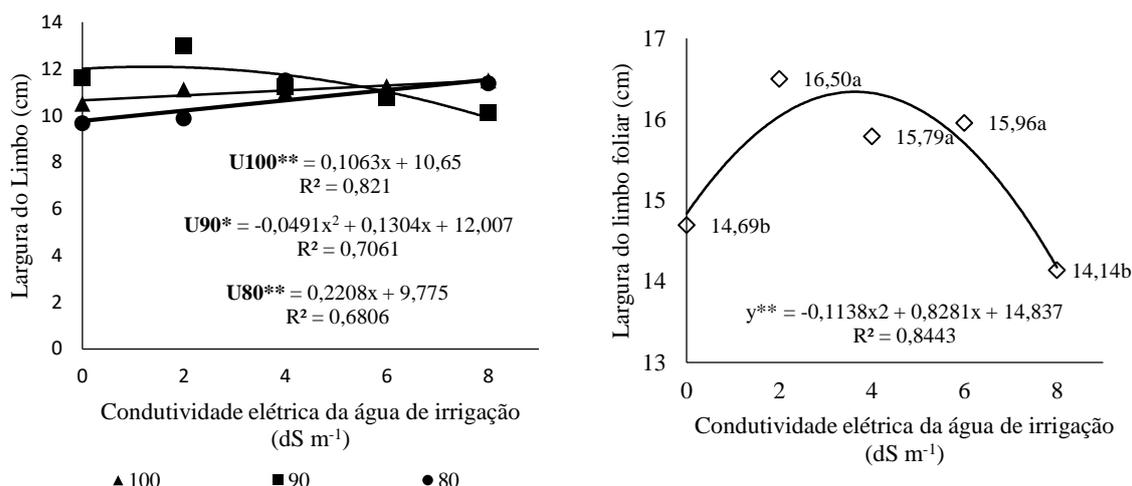


Figura 15. Largura do limbo foliar da beterraba sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação e diferentes níveis de umidade do solo aos 34 dias (A) após o transplantio e Largura do limbo foliar aos 55 DAT sob diferentes níveis de CE. Letras iguais não diferem entre si, pelo teste Scott-Knott ao nível de 5%. ▲, ■ e ● representam as umidades a 100, 90 e 80% da capacidade de campo respectivamente.

No diâmetro das raízes houve interação significativa entre os fatores condutividade elétrica da água de irrigação e umidade do solo ($p < 0,01$). Destaca-se o decréscimo linear do diâmetro da raiz com o aumento da salinidade na umidade de 90%. Entretanto o tratamento controle de 90% de umidade foi aquele que apresentou os melhores resultados dentre todos os tratamentos observados. Ainda sobre o diâmetro, observa-se máxima estimada para a umidade de 100% aos 4,9 dS m⁻¹ correspondendo a 44,41 mm (Figura 16).

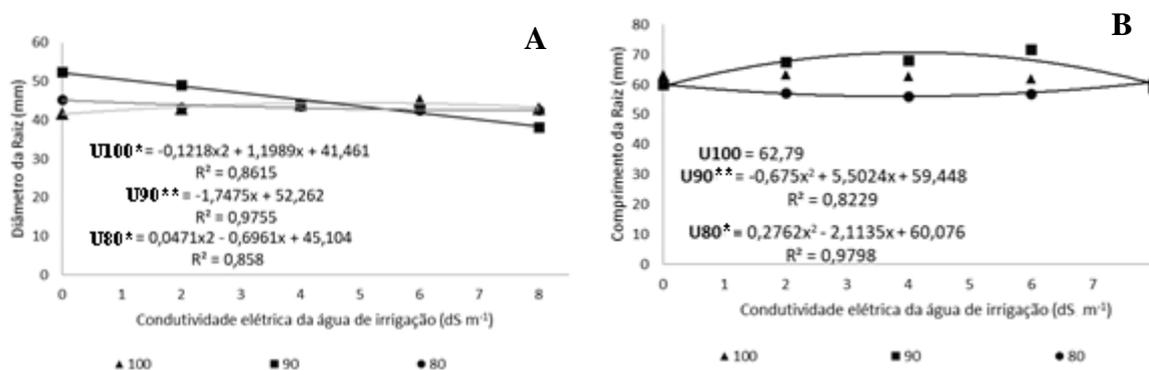


Figura 16. Diâmetro (A) e Comprimento (B) da raiz da beterraba sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação e diferentes níveis de umidade do solo aos 55 dias após o início dos tratamentos. ▲, ■ e ● representam as umidades a 100, 90 e 80% da capacidade de campo respectivamente.

Em relação ao comprimento das raízes houve interação a 5% de probabilidade entre os fatores ($p < 0,05$) e observa-se comportamento inverso entre as umidades de 90 e 80%, sendo máximo comprimento estimado para a umidade de 90% aos $4,1 \text{ dS m}^{-1}$ e mínimo para umidade de 80% aos $3,8 \text{ dS m}^{-1}$, correspondendo estes aos valores de 70,66 e 56,03 mm, respectivamente.

Os aumentos vistos no diâmetro e no comprimento das raízes podem ser justificados pelo efeito benéfico do sódio as plantas natrofílicas, como é o caso da beterraba, incorporando, assim, o Na^+ ao seu processo metabólico quando em concentrações moderadas, devido à substituição parcial do potássio na planta (WAKEEL et al., 2009; 2010).

Entretanto, em umidade mais baixas, a salinidade tende a causar reduções de produção devido ao aumento da concentração de sais no solo, além de possíveis associações de estresses, uma vez que, assim como na natureza, as plantas geralmente são afetadas por mais de um estresse ao mesmo tempo, como é o caso do estresse hídrico e salino, comum em regiões de clima árido e semiárido (WANG et al., 2015; RIBEIRO et al., 2016), sendo este o possível caso das beterrabas cultivadas com a umidade de 80% e com salinidade.

Melhora nos resultados biométricos a níveis moderados de salinidade e umidade, podem ser possíveis em decorrência de estratégias adaptativas da cultura, como observado em vários momentos tanto na umidade de 90%, quanto na salinidade por volta dos 4 dS m^{-1} .

Na produção de massa fresca da parte aérea e raiz houve interação significativa entre os fatores estudados ($p < 0,01$), sendo novamente observado aumentos de produção da parte aérea e raízes da beterraba para umidade de 90% com o acréscimo dos níveis de salino até níveis intermediários, alcançando valores máximos estimados de $102,89 \text{ g planta}^{-1}$ de beterraba para uma CE de $3,6 \text{ dS m}^{-1}$ para a parte aérea e de $76,46 \text{ g}$ para as raízes para uma CE de $2,5 \text{ dS m}^{-1}$. Já para a umidade de 100% houve decréscimo linear na ordem de 10 e 26% para a parte aérea e raízes respectivamente (Figura 17).

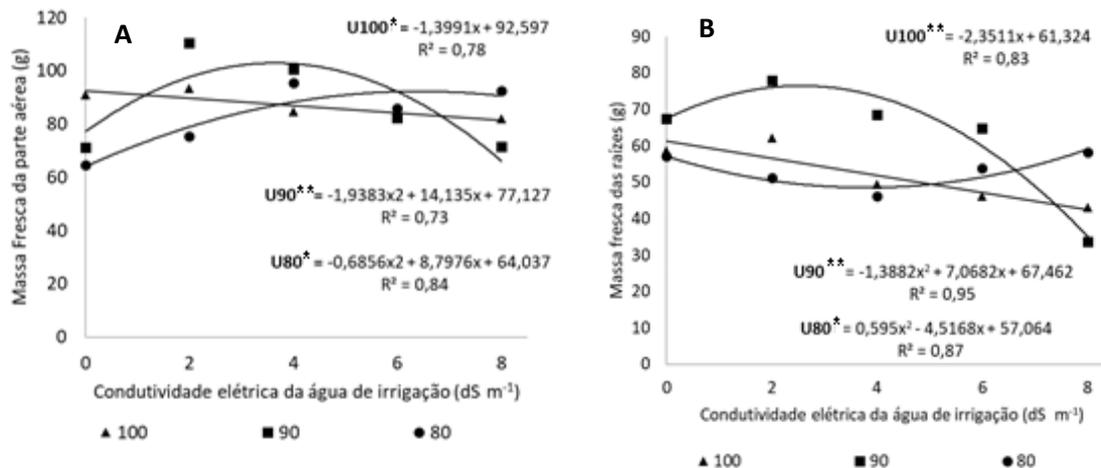


Figura 17. Massa fresca da parte aérea (A) e das raízes (B) da beterraba sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação e diferentes níveis de umidade do solo aos 55 dias após o transplântio. ▲, ■ e ● representam as umidades a 100, 90 e 80% da capacidade de campo respectivamente.

A umidade de 90% apresentou os melhores resultados, indicando que culturas como a beterraba que apresentam melhores condições de desenvolvimento em solos bem drenados e conseqüentemente não encharcados, apresentam maiores resultados de produção (NIWA et al., 2008).

A salinidade do solo afetou significativamente as raízes da planta que a parte aérea, provavelmente um indicativo de estratégia ao estresse, uma vez que a beterraba tende a ajustar os processos bioquímicos atrelados à rizosfera para promover aumentos na absorção de nutrientes, ou seja, ao contrário de outras culturas como a *Suaeda salsa* (halófito) que aumentam a superfície radicular para melhor absorver nutrientes, a beterraba promove alterações de ordem bioquímicas para aumentar a entrada de nutrientes (WANG et al., 2021). Níveis moderados (até 4 dS m⁻¹) de condutividade elétrica da água de irrigação promoveram ganhos de parte aérea e raiz quando associado a 90% de umidade, provavelmente em decorrência da afinidade da cultura ao elemento sódio, que é um elemento benéfico para a cultura.

Para o menor nível de umidade (80% da umidade na capacidade de campo), situação de provável estresse hídrico, o sódio pode ter atuado para atenuar o estresse da planta de modo a ser utilizado no processo de ajustamento osmótico (WAKEEL et al., 2010). Já no caso dos 100% de umidade e juntamente com o sal, o mais provável é que a manutenção da umidade a 100% da capacidade de campo tenha promovido uma redução da aeração do solo acarretando em mais um estresse para a planta, devido à falta de oxigenação na região das raízes e

consequentemente uma redução do crescimento da planta, em especial das próprias raízes (MITCHELL et al., 2013; KARAGÖZ al., 2018; MORAES et al., 2019).

2.5.3. Teor relativo de água, suculência foliar e danos na membrana

Resultado da análise estatística das variáveis de solo, ao que se refere a condutividade elétrica e potencial osmótico do extrato da pasta saturada, bem como as variáveis de relação hídrica, teor relativo de água (TRA), potencial hídrico (Ph) e osmótico de planta (POp) e danos na membrana (DM) (Tabela 5).

Tabela 5. Resumo da análise de variância das variáveis potencial osmótico e condutividade elétrica do solo e as variáveis de relação hídrica da planta.

Fator	CEes	POs	Ph	POp	DM	TRA
θcc	66,64**	114,91**	0,42 ^{ns}	14,86**	0,59 ^{ns}	0,67 ^{ns}
CEa	134,18**	179,29**	86,58**	59,64**	27,5**	7,36**
θcc x CEa	8,14**	17,13**	0,84 ^{ns}	3,42**	0,07 ^{ns}	2,15 ^{ns}
CV(%)	21,1	18,7	13,5	8,0	15,9	2,4

θcc = fator umidade; CEa = Fator condutividade elétrica da água de irrigação; θcc x CEa = interação entre os fatores umidade e Condutividade elétrica da água; CV = coeficiente de variação; CE = Condutividade elétrica do extrato da pasta saturada do solo; POs = potencial osmótico do solo; Ph = potencial hídrico da planta; POp = potencial osmótico da planta; DM = danos na membrana; TRA = teor relativo de água; AO = ajustamento osmótico; ** p< 0,1; * = p<0,05; ^{ns} = não significativo.

Houve diferença significativa apenas para o fator salinidade da água de irrigação no teor relativo de água (TRA), observando-se uma redução da variável a partir do aumento unitário da condutividade elétrica da água de irrigação (Figura 18).

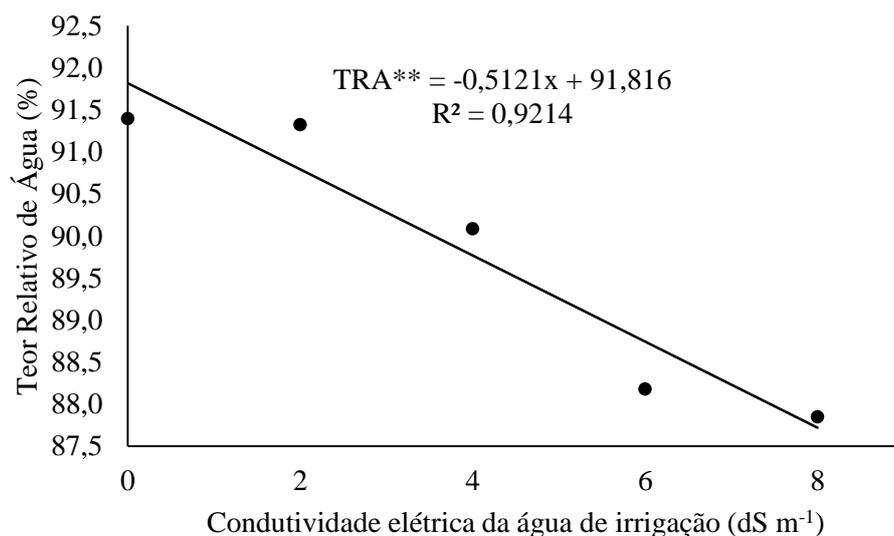


Figura 18. Teor relativo de água da beterraba irrigada com diferentes níveis de salinidade aos 52 dias após o transplântio.

A redução do TRA é comumente observada em plantas glicófitas sob estresse salino, como é o caso do feijoeiro (GUPTA & PANDEY, 2020), pimentão (KAYA et al., 2020), e de hortaliças como espinafre (LEAL et al., 2020) e beterraba açucareira (GHOULAM et al., 2002). Sendo neste último caso, também observado que as maiores reduções do TRA ocorrem nas variedades consideradas menos tolerantes a salinidade, como é o caso da Top, e por sua vez as menores reduções nas mais tolerantes como a Nejma.

Dentre as justificativas para um menor teor relativo de água na planta se observa a menor capacidade da planta de realizar a reposição hídrica em detrimento dos potenciais mais reduzidos, seja o potencial osmótico oriundo do aumento da salinidade e/ou do potencial mátrico em razão da menor umidade do solo. Sendo assim, a menor capacidade da planta em absorver água decorre da menor disponibilidade de água em quantidade e/ou qualidade adequadas para a cultura, acarretando reduções em seus indicadores como é o caso do TRA (ZHANG et al., 2020; HE et al., 2021).

A suculência foliar apresentou interação significativa entre CEa e a umidade do solo ($P < 0,05$). Tendo o tratamento de 80% da capacidade de campo a máxima suculência foliar estimada para CE de 4,3 dSm⁻¹, já os tratamentos com 100 e 90% da umidade na capacidade de campo apresentaram aumento lineares da suculência a partir do incremento dos níveis de condutividade elétrica (Figura 19).

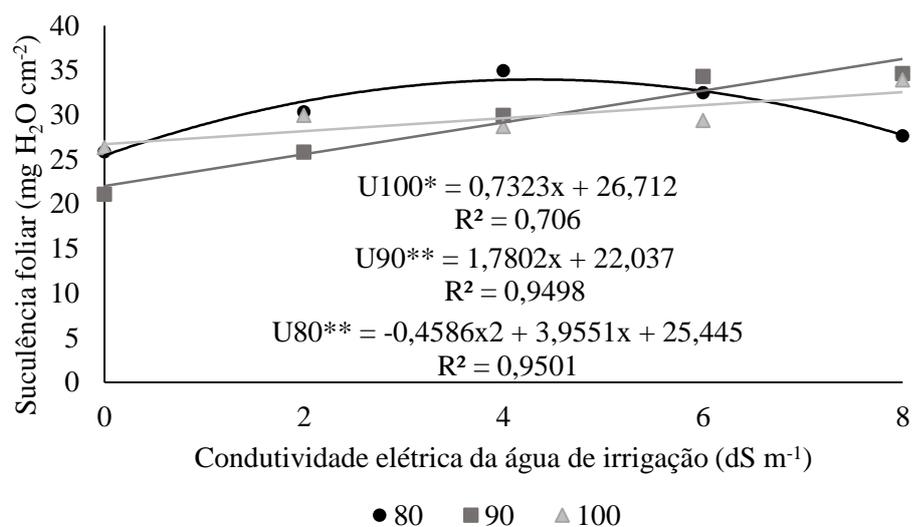


Figura 19. Suculência Foliar da beterraba irrigada com água salobra sob diferentes níveis de umidade aos 52 dias após o transplântio. \blacktriangle , \blacksquare e \bullet representam as umidades a 100, 90 e 80% da capacidade de campo respectivamente.

O aumento da suculência foliar é observado em plantas halófitas como estratégia adaptativa à salinidade, aumentando assim a tolerância das plantas as concentrações de sais, tendo em vista a maior capacidade de diluição dos íons e possibilidade de homeostase iônica, (MALIK & RAVINDRAN, 2020). Além disso, já foi observado resultados semelhantes em plantas de espinafre sob condições de irrigação com água salobra, apresentando inclusive, uma alta correlação entre a salinidade da água de irrigação e a suculência foliar das plantas (LEAL et al., 2020), o que provavelmente possa se tratar de um mecanismo de tolerância de plantas natrofílicas, como o espinafre e a beterraba.

Porém apesar da premissa para a absorção de água na planta ser verdadeira e amplamente difundida na literatura, a redução do conteúdo relativo de água na folha ocorre em sentido contrário ao observado pelo aumento de suculência foliar, ou seja, o aumento da quantidade de água na folha.

O aumento da suculência foliar apesar de ser comumente associado às halófitas, também tem sua ocorrência em plantas glicófitas, sendo uma importante estratégia para as culturas lidarem com o excesso de sais, em especial do íon Na^+ , sendo esse aumento na capacidade de armazenamento da água principalmente atrelado as células parenquimáticas (ZHAO et al., 2020). O aumento da suculência foliar, juntamente com a redução do teor relativo de água na folha é possível, uma vez que, uma das causas para a redução do conteúdo relativo de água se

observa por meio do aumento da capacidade máxima de absorver água a partir do aumento da salinidade da água de irrigação.

As estratégias observadas, redução do TRA e aumento da suculência foliar e do conteúdo de água máximo na folha, corroboram com as estratégias já reportadas na literatura para a cultura da acelga (*Beta vulgaris* var. Cicla), ou seja, a redução do TRA e o aumento significativo do teor de água na saturação (WCS) e o déficit de saturação de água (WSD) quando a mesma está sob estresse salino (HE et al., 2022).

Quanto aos danos na membrana foi significativo apenas para condutividade elétrica da água de irrigação ($p < 0,01$). A beterraba apresentou aumento linear significativo dos danos na membrana em decorrência do aumento da CEa, sendo observado aumento na ordem de 3,9 % para cada aumento unitário da CEa (Figura 20).

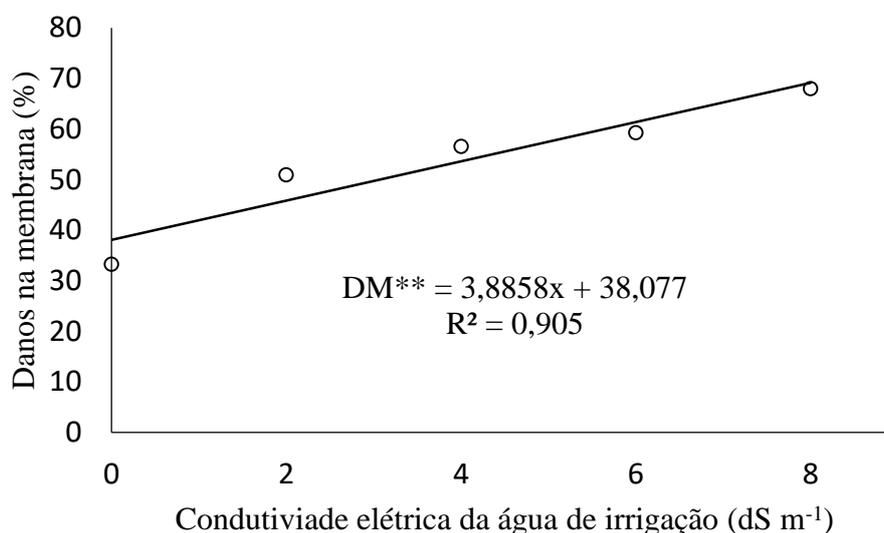


Figura 20. Danos na membrana da beterraba sob diferentes níveis de condutividade elétrica da água de irrigação aos 52 dias após o transplantio.

O aumento de extravasamento de eletrólitos é comumente observado em plantas sob estresse salino, tendo em vista a série de danos que são comumente causados nas plantas em decorrência do excesso de sais no meio, assim, destaca-se entre as possíveis causas de estresses aqueles de ordem oxidativa, ou seja, aqueles oriundo do excesso de espécies reativas de oxigênio, como é o caso da peroxidação lipídica e consequentes lesões na membrana, degradação proteica, inativação enzimática, interrupção de funções metabólicas e perda da integridade celular (PARIHAR et al., 2015).

Tal justificativa é reforçada mediante o fato que o uso exógeno de ácido salicílico, prolina e levedura, promovem aumento de osmólitos e da atividade antioxidante, em plantas

sob estresse salino, de modo a reduzirem entre outros efeitos danosos, o extravasamento dos eletrólitos, por meio da estimulação de defesa da planta ao estresse oxidativo (ABDELAAL et al., 2019; GUO et al., 2022).

2.5.4. Potencial osmótico e Condutividade elétrica do solo

A CE e o potencial osmótico do solo apresentaram interação significativa ao nível de 1% de probabilidade para os fatores estudados, sendo observado aumentos lineares no caso da CE e reduções lineares para o potencial osmótico a partir do aumento da salinidade da água de irrigação para todos os tratamentos de umidade (Figura 21). As maiores reduções do potencial osmótico foram observadas para a umidade de 100% da capacidade de campo, seguida pela de 80 e 90%, sendo de -0,21; -0,11 e -0,9 MPa, respectivamente para cada aumento unitário da condutividade elétrica da água de irrigação.

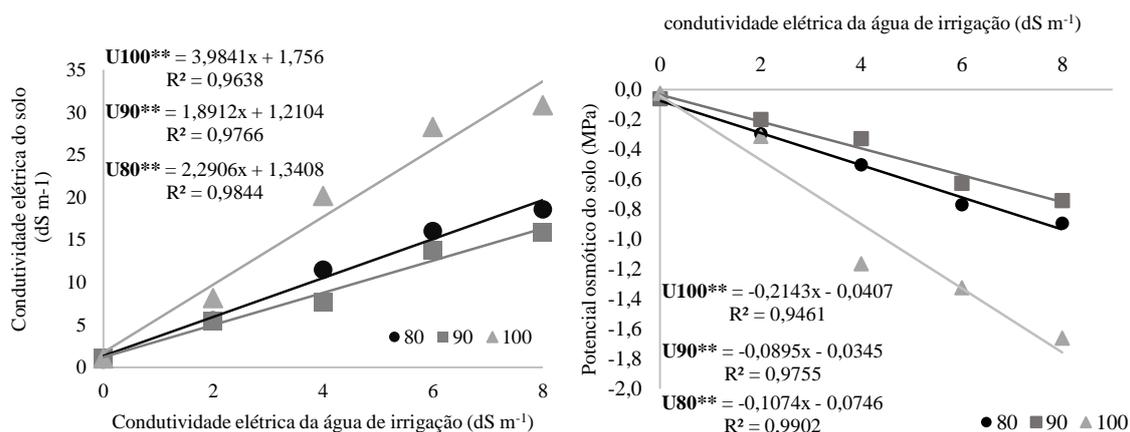


Figura 21. Condutividade elétrica e Potencial osmótico do solo cultivado com beterraba irrigada com diferentes níveis de sais e de umidade do solo aos 52 dias após o transplântio. ▲, ■ e ● representam as umidades a 100, 90 e 80% da capacidade de campo respectivamente.

A irrigação a 100% da capacidade de campo promoveu um aceleração da salinização do solo, sendo quase o dobro em relação ao nível de 90% de umidade (aumento na ordem de 94%), neste caso decorrente do maior fornecimento de água e conseqüentemente do maior fornecimento de cloreto de sódio na água de irrigação. Já para a umidade de 80% observa-se valores próximos ao tratamento de 90% da capacidade de campo (diferença na ordem de 17%), ou seja, o provável motivo deve ser que em 90% as plantas conseguiram melhores condições de desenvolvimento e conseqüentemente conseguiram extrair uma maior quantidade de sais do solo, em relação as plantas cultivadas em 80% da capacidade de campo

As plantas de beterraba tendem a aumentar as concentrações de sódio na folha e raiz, quando cultivada sob condições de salinidade, em especial quando há excesso de sódio, podendo acumular concentrações de sódio equivalentes a de macro elementos como cálcio e potássio (EL-MAGEED et al., 2022). Em condições ideais, como ocorrem na hidroponia, a cultura consegue absorver concentrações de sódio mesmo sob exposição curta aos tratamentos salinos (WU et al., 2019).

Na literatura fatores como o aumento da frequência de irrigação e a manutenção da capacidade de campo, comumente estão associados a um cultivo irrigado sob condições de salinidade, com o intuito da manutenção dos potenciais do solo em valores menos negativos (GHEYI et al., 2016). Visto que plantas de beterraba apresentam melhores resultados de produção em solo bem drenados (NIWA et al., 2008) e por se tratar de um sistema fechado, ou seja, onde não ocorre lixiviação, a irrigação a 100% da capacidade de campo acarretou no aumento da salinização do solo.

2.5.5. Potencial hídrico, osmótico e ajustamento osmótico da planta

No potencial osmótico da planta houve interação significativa entre os fatores CE e Umidade do solo ($p < 0,01$), sendo observado valores superiores aos 2 MPa para a umidade de 80% da capacidade de campo, sendo observado uma redução linear na ordem de -0,14MPa para cada acréscimo unitário da CEa, já os tratamentos de 90 e 100 apresentaram máxima estimada para as CE de 6,7 e 6,9 dS m⁻¹ com os valores de 2,0 e 1,9 MPa (Figura 22).

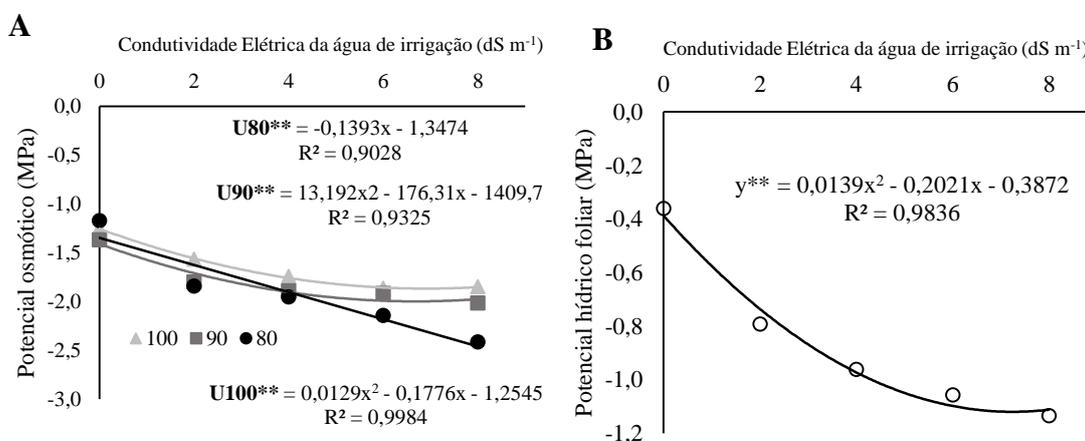


Figura 22. Potencial osmótico (A) e Potencial Hídrico (B) da beterraba irrigada com diferentes níveis de sais e de umidade do solo aos 52 dias após o transplantio. ▲ , ■ e ● representam as umidades a 100, 90 e 80% da capacidade de campo respectivamente.

No potencial hídrico houve diferença significativa apenas para salinidade da água ($p < 0,01$). Deste modo, observa-se um comportamento quadrático, com máxima estimada em $7,2 \text{ dS m}^{-1}$ de $-1,12 \text{ MPa}$. O potencial hídrico ou total da planta reflete o estado energético da parte aérea da cultura, e valores abaixo de -1 MPa geralmente só são relatados por culturas glicófitas com maiores tolerâncias à seca e salinidade. Dentre estas, as plantas que apresentam afinidade com o elemento sódio (classificadas como natrófilicas), possuem uma tolerância elevada à salinidade dentre as glicófitas comumente encontradas, além da presença de outros mecanismos de tolerância como o AO e a SF (BROADLEY et al., 2012; LEAL et al., 2020).

Em diversos genótipos de beterraba quando submetidos à seca, apresentaram valores de potencial osmótico entre $-1,0$ e $-2,0 \text{ MPa}$, com dois genótipos apresentando valores por volta dos $2,5 \text{ MPa}$, ou seja, comportamento semelhante ao observado neste trabalho (WIŚNIEWSKA et al., 2019). Ainda segundo o autor, os genótipos de maior tolerância à seca foram os que apresentaram as maiores reduções de potencial osmótico, além de demonstrarem ganhos de suculência foliar e do peso específico da folha.

Em termos de ajustamento osmótico (AO), a umidade de 90% apresentou os maiores resultados e quando as umidades foram comparadas na CEa de 4 dS m^{-1} , na umidade de 90% se verificou valores de 50 e 29% maiores de AO em relação aos manejos de 100% e 80% da capacidade de campo, respectivamente. Para as umidades estudadas os maiores resultados de AO os valores foram obtidos para a CE 6 dS m^{-1} (Tabela 6).

Tabela 6. Ajustamento osmótico da beterraba irrigada com água salobra e cultivada sob diferentes níveis de umidade do solo aos 52 dias após o transplante.

CE(dSm^{-1})	U80 (MPa)	U90 (MPa)	U100 (MPa)
0	0,06	0,10	-
2	0,07	0,14	0,06
4	0,10	0,18	0,12
6	0,14	0,18	0,15
8	0,04	0,17	0,07

O ajustamento osmótico é uma importante adaptação das culturas à desidratação permitindo, assim, a convivência com a seca e a salinidade, além de desempenhar importante papel no rendimento das culturas a partir da manutenção do turgor, mesmo em condições de estresse - Estratégia amplamente realizada por uma série de plantas halófitas - Para as glicófitas,

essa estratégia adaptativa só é comumente observada nas plantas que apresentam tolerância moderada aos estresses abióticos, como é o caso de culturas como o trigo, milho, sorgo e girassol (BLUM, 2017; PAN et al., 2020).

O sódio desempenha importante papel no ajustamento osmótico e apesar de saber que as plantas também realizam AO por meio dos solutos orgânicos compatíveis, a maior parte do AO pode ser realizada pela presença dos íons Na^+ e Cl^- , correspondendo a valores entre 50 e 65% nas raízes quando submetidas a concentrações externas de 100 mMol e de 90% quando expostos a concentrações de 50 mMol (MUNNS et al., 2020).

2.6. CONCLUSÃO

A umidade do solo recomendada para o cultivo da beterraba sob as condições estudadas é de 90% da umidade do solo na capacidade de campo, pois atrelada a níveis moderados de condutividade elétrica do solo (entre 2 e 4 dS m^{-1}) promove ganhos de produtividade e das variáveis biométricas.

Apesar do excesso de sal na água de irrigação (valores superiores aos 4 dS m^{-1}) promoveram reduções de dados biométricos e produtividade da cultura, o uso em doses baixas (< 4 dS m^{-1}) é benéfico aos diversos parâmetros avaliados, dentre eles se destacam o número de folhas, altura da planta, massa fresca da parte aérea e raiz, além de promover ajustamento osmótico e aumento da suculência foliar da cultura.

O cultivo a 100% da capacidade de campo promove o maior aumento da salinidade do solo, acarretando em reduções mais significativas de produtividade.

A tolerância da cultura da beterraba sob diferentes níveis de umidade e salinidade pode ser aferido por meio dos potenciais energéticos da cultura, AO, TRA, danos na membrana e SF, dentre os quais se destaca o AO, uma vez que comprova que a cultura realiza o AO em ambientes que possuem umidade do solo reduzida (inferiores a 100% da capacidade de campo) e/ou elevada condutividade elétrica (> 2 dS m^{-1}).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELAAL, K. A.; EL-MAGHRABY, L. M.; ELANSARY, H.; HAFEZ, Y. M.; IBRAHIM, E. I.; EL-BANNA, M.; ELKELISH, A. Treatment of sweet pepper with stress tolerance-inducing compounds alleviates salinity stress oxidative damage by mediating the physio-biochemical activities and antioxidant systems. **Agronomy**, v.10, n. 1, p. 26, 2019.
- ALKAHTANI, M. D.; ATTIA, K. A.; HAFEZ, Y. M.; KHAN, N.; EID, A. M.; ALI, M. A.; ABDELAAL, K. A. Chlorophyll fluorescence parameters and antioxidant defense system can display salt tolerance of salt acclimated sweet pepper plants treated with chitosan and plant growth promoting rhizobacteria. **Agronomy**, v. 10, n.8, p. 1180, 2020.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 29, rev. 1, 1985. 160p.
- AZEVEDO NETO, A. D. D.; PEREIRA, P. P. A.; COSTA, D. P.; SANTOS, A. C. C. D. Fluorescência da clorofila como uma ferramenta possível para seleção de tolerância à salinidade em girassol. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 893-897, 2011.
- BAIÃO, D.S.; DA SILVA, D. V.; DEL AGUILA, E. M.; PASCHOALIN, V. M. F. Nutritional, bioactive and physicochemical characteristics of different beetroot formulations. In: KARUNARATNE, D. N.; PAMUNUWA, G. **Food Additives**, 1 ed., Rijeka, Croacia: InTechOpen, 2017. Cap.2 , p. 21–43.
- BLUM, A. Osmotic adjustment and growth of barley genotypes under drought stress. **Crop Science**, v.29, n. 1, p. 230-233, 1989.
- BLUM, A. Osmotic adjustment is a prime drought stress adaptive engine in support of plant production. **Plant, Cell & Environment**, v. 40, n. 1, p. 4-10, 2017.
- BOLHÀR-NORDENKAMPF, H. R.; G. ÖQUIST. Chlorophyll fluorescence as a tool in photosynthesis research. In: HALL, D. O.; SCURLOCK, J. M. O.; BOLHÀR-NORDENKAMPF, H. R.; LEEGOOD, R. C.; LONG, S. P. **Photosynthesis and production in a changing environment: A field and laboratory manual**. 1 ed., Dordrecht: Springer, 1993. Cap. 12, p. 193-206.
- BROADLEY, M.; BROWN, P.; ÇAKMAK, İ.; MA, J. F.; RENGEL, Z.; ZHAO, F. Beneficial elements. In: MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3ed., Academic Press, 2012. Cap. 8, p. 249-269.
- CAVALCANTE, F. J. A.; SANTOS, J. C. P.; PREIRA, J. R.; SILVA, M. C. L. **Recomendação de adubação para o estado de Pernambuco**. Recomendações de Calcário e Fertilizantes. 2a Aproximação. 3 ed., Brasil: Instituto Agrônomo de Pernambuco, 2008. 212p.
- CHAI, Q.; GAN, Y.; ZHAO, C.; XU, H. L.; WASKOM, R. M.; NIU, Y.; SIDDIQUE, K. H. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, n. 3, p. 1-21, 2016.

CHEN, W.; JIN, M.; FERRÉ, T. P.; LIU, Y.; XIAN, Y.; SHAN, T.; PING, X. Spatial distribution of soil moisture, soil salinity, and root density beneath a cotton field under mulched drip irrigation with brackish and fresh water. **Field Crops Research**, v. 215, p. 207-221, 2018.

COLES, N. A.; ESLAMIAN, S. Definition of Drought In: ESLAMIAN, S., ESLAMIAN, F. **Handbook of Drought and Water Scarcity: Principles of Drought and Water Scarcity**. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. 690p.

Companhia Integrada de Serviços Agropecuários - CISAGRO. **Projeto de Irrigação da fazenda Nossa Senhora do Rosário-Pesqueira-PE**. Pernambuco, Brasil, 1991. 230 p.

DE SOUZA, E. R.; DOS SANTOS FREIRE, M. B. G.; DA CUNHA, K. P. V.; DO NASCIMENTO, C. W. A.; RUIZ, H. A.; LINS, C. M. T. Biomass, anatomical changes and osmotic potential in *Atriplex nummularia* Lindl. cultivated in sodic saline soil under water stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 82, p. 20-27, 2012.

DELF, E. M. Transpiration in succulent plants. **Annals Botany**, v. 26, n. 102, p. 409-442, 1912.

EL-KATONY, T. M.; EL-FATAH, A. Genotypic Differences in Photosynthesis and Partitioning of Biomass and Ions in Salinized Faba Bean. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 68, n. 6, p. 1161-1172, 2021.

EL-MAGEED, T. A. A.; MEKIDAD, A. A.; RADY, M. O.; ABDELBAKY, A. S.; SAUDY, H. S.; SHAABAN, A. Physio-biochemical and agronomic changes of two sugar beet cultivars grown in saline soil as influenced by potassium fertilizer. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 3, p. 3636-3654, 2022.

FURLANI, P. R.; SILVEIRA, L. C. P.; BOLONHEZI, D.; FAQUIN, V. **Cultivo hidropônico de plantas**. Boletim técnico, n. 180, Campinas: Instituto Agrônomo, 1999. 53p.

GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicados**, 2.ed. Fortaleza, CE: INCTSal, 2016. 504p.

GHOULAM, C.; FOURSY, A.; FARES, K. Effects of salt stress on growth, inorganic ions and proline accumulation in relation to osmotic adjustment in five sugar beet cultivars. **Environmental and experimental Botany**, v. 47, n. 1, p. 39-50, 2002.

GONDIM, A. **Catálogo Brasileiro de Hortaliças: saiba como plantar e aproveitar 50 das espécies mais comercializadas no país**. 1 ed., Brasília, DF: Embrapa Hortaliças: SEBRAE, 2010, 59p.

GRABOW, G. L.; GHALI, I. E.; HUFFMAN, R. L.; MILLER, G. L.; BOWMAN, D.; VASANTH, A. Water application efficiency and adequacy of ET-based and soil moisture-based irrigation controllers for turfgrass irrigation. **Journal of irrigation and drainage engineering**, v. 139, n. 2, p. 113-123, 2013.

GUO, S.; MA, X.; CAI, W.; WANG, Y.; GAO, X.; FU, B.; LI, S. Exogenous Proline Improves Salt Tolerance of Alfalfa through Modulation of Antioxidant Capacity, Ion Homeostasis, and Proline Metabolism. **Plants**, v. 11, n.21, p. 2994, 2022.

GUPTA, S.; PANDEY, S. Enhanced salinity tolerance in the common bean (*Phaseolus vulgaris*) plants using twin ACC deaminase producing rhizobacterial inoculation. **Rhizosphere**, v. 16, p. 100241, 2020.

HANEKLAUS, S.; BLOEM, E.; SCHNUG, E. Hungry Plants: A short treatise on how to feed crops under stress. **Agriculture**, v. 8, n. 3, p. 43, 2018.

HANSON, B.; MAY, D. **Drip Irrigation Salinity Management for Row Crops, University of California**. Agriculture and Natural Resources, ANR Publication 8447, 2011.13p

HE, H.; ZHOU, W.; LÜ, H.; LIANG, B. Growth, Leaf Morphological and Physiological Adaptability of Leaf Beet (*Beta vulgaris* var. *cicla*) to Salt Stress: A Soil Culture Experiment. **Agronomy**, v. 12, n. 6, p. 1393, 2022.

HE, W.; YAN, K.; ZHANG, Y.; BIAN, L.; MEI, H.; HAN, G. Contrasting photosynthesis, photoinhibition and oxidative damage in honeysuckle (*Lonicera japonica* Thunb.) under iso-osmotic salt and drought stresses. **Environmental and Experimental Botany**, v.182, p. 104313, 2021.

HILLEL, D. **Soil in the Environment: Crucible of Terrestrial Life**.1 ed., Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2007. 320p.

Karagöz, H.; Cakmakci, R.; Hosseinpour, A.; Kodaz, S., 2018. Alleviation of water stress and promotion of the growth of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) plants by multi-traits rhizobacteria. **Applied Ecology and Environmental Research**, 16, 6801-6813.

Kaya, C.; Ashraf, M.; Alyemeni, M. N.; Ahmad, P., 2020. The role of endogenous nitric oxide in salicylic acid-induced up-regulation of ascorbate-glutathione cycle involved in salinity tolerance of pepper (*Capsicum annuum* L.) plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, 147, 10-20.

KIRKHAM, M. B. **Principles of soil and plant water relations**. 2 ed, Elsevier: Academic Press, 2014, 580p.

LEAL, L. Y. C; DE SOUZA, E. R.; JÚNIOR, J. A. S.; DOS SANTOS, M. A. Comparison of soil and hydroponic cultivation systems for spinach irrigated with brackish water. **Scientia Horticulturae**, v. 274, p. 109616, 2020.

LICHTENTHALER, H. K., [34] Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: Packer, L.; DOUCE, R. **Methods in enzymology**, 1 ed., v.148. Academic Press, 1987. Cap. 34, p. 350 -382.

LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C.; KNAPP, M. How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio Rfd of leaves with the PAM fluorometer. **Photosynthetica**, v. 43, p. 379-393, 2005.

MALIK, Z.; RAVINDRAN, K. Bioaccumulation of salts and heavy metals by *Suaeda monoica*: A salt marsh halophyte from paper mill effluent contaminated soil. *International Journal of Scientific & Technology Research*, v. 9, n. 3, p. 7248-7254, 2020.

MARTINS, J. B.; JÚNIOR, J. A. S.; LEAL, L. Y. C.; PAULINO, M. K. S. S.; DE SOUZA, E. R.; GHEYI, H. R. Fluorescence emission and photochemical yield of parsley under saline waters of different cationic nature. *Scientia Horticulturae*, v. 273, p. 109574, 2020.

MITCHELL, J.; CHETH, K.; SENG, V.; LOR, B.; OUK, M.; FUKAI, S. Wet cultivation in lowland rice causing excess water problems for the subsequent non-rice crops in the Mekong region. *Field Crops Research*, v. 152, p. 57-64, 2013.

MONTEIRO, D. R.; MELO, H. F. D.; LINS, C. M.; DOURADO, P. R.; SANTOS, H. R.; SOUZA, E. R. D. Chlorophyll a fluorescence in saccharine sorghum irrigated with saline water. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, p. 673-678, 2018.

MORAES, M. T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; BONETTI, J. D. A.; LEVIEN, R.; SCHNEPF, A.; LEITNER, D. Mechanical and hydric stress effects on maize root system development at different soil compaction levels. *Frontiers in plant science*, v. 10, p.1358, 2019.

MUNNS, R.; JAMES, R. A.; GILLIHAM, M.; FLOWERS, T. J.; COLMER, T. D. Tissue tolerance: an essential but elusive trait for salt-tolerant crops. *Functional Plant Biology*, v. 43, n. 12, p. 1103-1113, 2016.

MUNNS, R.; PASSIOURA, J. B.; COLMER, T. D.; BYRT, C. S. Osmotic adjustment and energy limitations to plant growth in saline soil. *New Phytologist*, v. 225, n. 3, p. 1091-1096, 2020.

NIWA, K.; SEINO, N.; YOKOBORI, J.; KIKUCHI, K.; HONGO, C. Effect of soil type on the time-course of changes in sugar beet (*Beta vulgaris* L.) productivity in Tokachi District, Hokkaido, Japan. *Soil science and plant nutrition*, v. 54, n.6, p. 928-937, 2008.

OLIVEIRA, W. J.; DE SOUZA, E. R.; SANTOS, H. R. B.; DE FRANÇA, Ê. F.; DUARTE, H. H. F.; DE MELO, D. V. M. Fluorescência da clorofila como indicador de estresse salino em feijão caupi. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 12, n. 3, p. 2592, 2018.

PAN, J.; PENG, F.; TEDESCHI, A.; XUE, X.; WANG, T.; LIAO, J.; ZHANG, W.; HUANG, C. Do halophytes and glycophytes differ in their interactions with arbuscular mycorrhizal fungi under salt stress? A meta-analysis. *Botanical studies*, v. 61, p. 1-13, 2020.

PARIHAR, P.; SINGH, S.; SINGH, R.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M. Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 22, p. 4056-4075, 2015.

QI, Z.; FENG, H.; ZHAO, Y.; ZHANG, T.; YANG, A.; ZHANG, Z. Spatial distribution and simulation of soil moisture and salinity under mulched drip irrigation combined with tillage in

an arid saline irrigation district, northwest China. **Agricultural Water Management**, v. 201, p. 219-231, 2018.

RIBEIRO, M. R.; RIBEIRO FILHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T. Origem e classificação dos solos afetados por sais In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. 1ed., Fortaleza, CE: INCTSal, 2016. Cap. 2, p. 10-19.

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington, D.C.: United States Salinity Laboratory, United States Department of Agriculture - Handbook, 60, ,1954.160p.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; DOS ANJOS, L. H. C.; DE OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; DE ALMEIDA, J. A.; DE ARAÚJO FILHO, J. C.; DE OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed., Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.

SAVÉ, R.; PEÑUELAS, J.; MARFÁ, O.; SERRANO, L. Changes in leaf osmotic and elastic properties and canopy structure of strawberries under mild water stress. **HortScience**, v. 28, n. 9, p. 925-927, 1993.

SHAH, Z. H.; REHMAN, H. M.; AKHTAR, T.; DAUR, I.; NAWAZ, M. A.; AHMAD, M. Q.; RANA, I. A.; ATIF, R. M.; YANG, S. H.; CHUNG, G. Redox and ionic homeostasis regulations against oxidative, salinity and drought stress in wheat (a systems biology approach). **Frontiers in genetics**, v. 8, p. 141, 2017.

SILVEIRA, J. A. G.; VIÉGAS, R. A.; ROCHA, I. M. A.; MOREIRA, A. C. D. M.; OLIVEIRA, J. T. A. Proline accumulation and glutamine synthetase activity are increased by salt-induced proteolysis in cashew leaves. **Journal of Plant Physiology**, v. 160, n. 2, p. 115-123, 2003.

STAGNARI, F.; GALIENI, A.; SPECA, S.; CAFIERO, G.; PISANTE, M. Effect of light and water supply on morphological and physiological leaf traits of red beet. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 2, p. 459-468, 2014.

SUBBARAO, G. V.; WHEELER, R. M.; LEVINE, L. H.; STUTTE, G. W. Glycine betaine accumulation, ionic and water relations of red-beet at contrasting levels of sodium supply. **Journal of Plant Physiology**, v. 158, n. 6, p. 767-776, 2001.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ed., Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574p.

THOMAS, G. W. Exchangeable cations. In: Page, A. L. **Methods of soil analysis**. Part-2 chemical methods. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p.159-165.

USDA. **Keys to Soil Taxonomy**, 12th ed. United State Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (NRCS), 2014.

VASQUEZ-TELLO, A.; ZUILY-FODIL, Y.; PHAM THI, A. T.; VIEIRA DA DILVA, J. B. Electrolyte and Pi Leakages and Soluble Sugar Content as Physiological Tests for Screening

Resistance to Water Stress in Phaseolus and Vigna Species. **Journal of Experimental Botany**, v. 41, n. 7, p. 827–832, 1990.

YUAN, C.; FENG, S.; HUO, Z.; JI, Q. Effects of deficit irrigation with saline water on soil water-salt distribution and water use efficiency of maize for seed production in arid Northwest China. **Agricultural water management**, v. 212, p. 424-432, 2019.

WAKEEL, A.; ABD-EL-MOTAGALLY, F.; STEFFENS, D.; SCHUBERT, S. Sodium-induced calcium deficiency in sugar beet during substitution of potassium by sodium. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 2, p. 254-260, 2009.

WAKEEL, A.; STEFFENS, D.; SCHUBERT, S. Potassium substitution by sodium in sugar beet (*Beta vulgaris*) nutrition on K-fixing soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 173, n. 1, p. 127-134, 2010.

WANG, J.; YANG, Y.; HUANG, J.; ADHIKARI, B. Adaptive irrigation measures in response to extreme weather events: empirical evidence from the North China plain. **Regional environmental change**, v. 19, p. 1009-1022, 2019.

WANG, S.; ZHAO, Z.; GE, S.; PENG, B.; ZHANG, K.; HU, M.; MAI, W.; TIAN, C. Root Morphology and Rhizosphere Characteristics Are Related to Salt Tolerance of *Suaeda salsa* and *Beta vulgaris* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 1193, 2021.

WANG, X.; YANG, J.; LIU, G.; YAO, R.; YU, S. Impact of irrigation volume and water salinity on winter wheat productivity and soil salinity distribution. **Agricultural Water Management**, v. 149, p. 44-54, 2015.

WILLADINO, L.; CAMARA, T. R. Tolerância das plantas à salinidade: Aspectos fisiológicos e bioquímicos. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, n.11, p.1-23, 2010.

WIŚNIEWSKA, A.; ANDRYKA-DUDEK, P.; CZERWIŃSKI, M.; CHOŁUJ, D. Fodder beet is a reservoir of drought tolerance alleles for sugar beet breeding. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 145, p. 120-131, 2019.

WU, G. Q.; LIN, L. Y.; JIAO, Q.; LI, S. J. Tetraploid exhibits more tolerant to salinity than diploid in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, p. 1-17, 2019.

ZHANG, F.; ZHU, K.; WANG, Y. Q.; ZHANG, Z. P.; LU, F.; YU, H. Q.; ZOU, J. Q. Changes in photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics of sorghum under drought and waterlogging stress. **Photosynthetica**, v. 57, n. 4, p. 1156-1164, 2019.

ZHANG, M.; DONG, B.; QIAO, Y.; YANG, H.; WANG, Y.; LIU, M. Effects of sub-soil plastic film mulch on soil water and salt content and water utilization by winter wheat under different soil salinities. **Field Crops Research**, v. 225, p. 130-140, 2018.

ZHANG, W. J.; ZHANG, X. J.; LANG, D. Y.; LI, M.; LIU, H.; ZHANG, X. H. Silicon alleviates salt and drought stress of *Glycyrrhiza uralensis* plants by improving photosynthesis and water status. **Biologia Plantarum**, v. 64, p. 302-313, 2020.

ZHAO, C.; ZHANG, H.; SONG, C.; ZHU, J. K.; SHABALA, S. Mechanisms of plant responses and adaptation to soil salinity. **The innovation**, v. 1, n.1, p. 100017, 2020.

CAPÍTULO III

CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE EM SOLO SALINIZADO SOB CULTIVO IRRIGADO COM ÁGUA SALOBRA

RESUMO

O monitoramento da umidade do solo é crucial para otimizar a produção agrícola e, também, para evitar o desperdício de água e energia na agricultura irrigada. Dessa forma, o acesso a meios para o rápido e preciso monitoramento do conteúdo de água é imprescindível, assim como é proposto pelos sensores de umidade do solo. Entretanto, estas ferramentas possuem um custo elevado e são de difícil acesso para a maioria dos produtores, especialmente em solos afetados por sais, uma vez que a salinidade pode afetar as leituras de sensores de umidade no solo. Objetivou-se investigar a atuação de sensores com princípios de funcionamento distintos: resistivo de baixo custo (YL-69) e tensiômetro em uma classe de solo com representatividade para a agricultura irrigada de Pernambuco e sob diferentes níveis de condutividade elétrica (CEa). Para tanto, foram realizados 2 experimentos, em arranjo fatorial 5x2, sendo cinco níveis de CEa e dois tipos de sensores de umidade no solo. No primeiro experimento foi realizado o ensaio em solos salinizados por meio da saturação por capilaridade com água salobra nos níveis de 0, 2, 4, 8 e 16 dS m⁻¹ e no segundo experimento a salinização ocorreu por meio da irrigação com água salobra durante o cultivo da beterraba, utilizando os níveis de CEa de 0, 2, 4, 6 e 8 dS m⁻¹. Os sensores apresentaram alto coeficiente de determinação entre as leituras e a umidade obtida pelo método padrão, sendo maior que 0,97 e 0,94 para os tensiômetros e YL-69 respectivamente. A salinidade do solo, não afetou de maneira significativa as leituras dos tensiômetros causando interferências na ordem de 0,03 m³ m⁻³, porém no caso do YL-69 houve redução da resistência elétrica medida com o aumento da salinidade do solo o que causou variação máxima de 0,16 e 0,11 m³ m⁻³ para o primeiro e segundo experimento respectivamente caso não fosse utilizada a equação recomendada para cada nível de salinidade. A salinidade do solo afeta significativamente o sensor YL-69, porém não reduz sua capacidade de calibração para os níveis de salinidade testados. O uso de sensores de baixo custo é possível mesmo em condições de salinidade, desde que haja calibração para o nível de salinidade ao qual estará submetido.

Palavras-chave: sensor resistivo; resistência elétrica; tensiômetro; salinidade; condutividade elétrica; conteúdo de água no solo.

ABSTRACT

Soil moisture monitoring is crucial to optimize agricultural production and also to avoid wasting water and energy in irrigated agriculture. Thus, access to means for fast and accurate monitoring of water content is essential, as is proposed by soil moisture sensors. However, these tools are expensive and difficult to access for most growers, especially in salt-affected soils, as salinity can affect soil moisture sensor readings. The objective was to investigate the performance of sensors with different operating principles: low-cost resistive (YL-69) and tensiometer in a soil class with representativeness for irrigated agriculture in Pernambuco and under different levels of electrical conductivity (EC_w). For that, 2 experiments were carried out, in a 5x2 factorial arrangement, with five EC_w levels and two types of soil moisture sensors. In the first experiment, the test was carried out in salinized soils through capillary saturation with brackish water at the levels of 0, 2, 4, 8 and 16 dSm⁻¹ and in the second experiment, salinization occurred through irrigation with brackish water during the beetroot cultivation, using EC_w of 0, 2, 4, 6 and 8 dSm⁻¹. The sensors showed a high coefficient of determination between the readings and the soil moisture obtained by the standard method being greater than 0.97 and 0.94 for the tensiometers and YL-69 respectively. Soil salinity did not significantly affect the readings of the tensiometers, causing interference in the order of 0.03 m³m⁻³, but in the case of the YL-69 there was a reduction in the electrical resistance measured with the increase in soil salinity, which caused maximum variation of 0.16 and 0.11 m³m⁻³ for the first and second experiment respectively if the recommended equation for each salinity level was not used. Soil salinity significantly affects the YL-69 sensor, but does not reduce its calibration capability for the tested salinity levels. The use of low-cost sensors is possible even in salinity conditions, as long as there is calibration for the salinity level to which it will be subjected.

Keywords: resistive sensor; electrical resistance; tensiometer; salinity; electric conductivity; soil water content.

3.1. INTRODUÇÃO

A umidade do solo é de grande relevância para diversos aspectos da engenharia, agronomia e biologia do solo, tendo destaque inclusive na agricultura irrigada, sendo uma das principais formas de determinar a demanda hídrica e a lâmina a ser aplicada, ou seja, imprescindível para uso eficiente dos recursos hídricos e energéticos. Apesar de tão importante, cada técnica utilizada na estimativa da umidade do solo é afetada de maneira distinta pelo meio. As principais causas de interferências são oriundas dos fatores físicos, químicos e mineralógicos do solo e dentre os fatores químicos pode se destacar a salinidade do SOLO (HALEY & DUKES, 2012; SU et al., 2014).

Os solos afetados por sais são comumente encontrados em regiões de clima árido e semiárido e estima-se que no mundo, cerca de 1 bilhão de hectares já fazem parte desta problemática (FAO, 2020). No Brasil, a ocorrência de solos afetados por sais é relatada principalmente no nordeste brasileiro, em especial na região semiárida, estando também localizada nos perímetros irrigados, seja em decorrência de características edafoclimáticas ou por meio de ações antrópicas consequentes de um manejo inadequado da irrigação e/ ou fertilização do solo (PESSOA et al., 2022).

Uma das principais formas de avaliar a eficácia da irrigação ocorre justamente pelo monitoramento da umidade do solo. Entretanto, os métodos padrões de determinação levam tempo e ocorrem de maneira destrutiva, a partir da coleta de amostras do solo (TEIXEIRA et al., 2017). Por outro lado, o uso de sensores permite um monitoramento rápido, constante e consequentemente um melhor acompanhamento temporal e espacial da água no solo (KC et al., 2021). Os sensores apresentam grandes vantagens no monitoramento da água no solo, sendo o custo dos sensores e dos equipamentos que realizam suas respectivas leituras considerados obstáculos para a difusão do método.

Apesar dos benefícios do uso de sensores há a necessidade de calibração para as diversas condições de solo para que apresentem valores precisos. Além disso, a salinidade é um dos fatores químicos que causam interferência nas leituras, aliado ao custo de aquisição dos equipamentos que precisa ser levado em consideração, uma vez que se tratam de equipamentos de alto custo. Entretanto, existem alternativas de custo reduzido e adaptadas as condições anteriormente descritas que favorecem o uso pela agricultura familiar e devem ser melhor investigados (SU et al., 2014; TAN et al., 2019; DENG et al., 2020; PLACIDI et al., 2020).

O estudo de sensores em ambientes com moderada e alta salinidade do solo é pouco abordado, ainda mais quando associadas a sensores de baixo custo, mesmo estes apresentando resultados comparáveis a sensores de uso profissional (Jiménez et al., 2019). Adicionalmente, existem diversos modelos de sensores no mercado, como os resistivos, capacitivos e os de reflectometria no domínio da frequência (TDR) e cada um deles apresenta respostas distintas a um meio afetado por sais (ZAZUETA & XIN, 1994; SZYPŁOWSKA et al., 2019; ZEMNI et al., 2019). Por meio desta pesquisa, objetivou-se investigar a atuação de sensores com princípios de funcionamento distintos, sendo eles: resistivo e tensiômetro, de modo a comparar suas respectivas performances em uma classe de solo (Neossolo Flúvico) com representatividade para a agricultura irrigada de Pernambuco e sob diferentes níveis de salinidade variando entre 0 e 16 dS m⁻¹ no primeiro experimento e de 0 a 8 dS m⁻¹ no segundo experimento.

3.2. MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Caracterização do ambiente experimental

Os experimentos foram conduzidos em ambiente protegido, na estufa de experimentação do Centro de Pesquisa Vegetais (CEPEVE) na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Campus Recife, Localizado a 8° 01' 01" de latitude sul, 34° 56' 41" de longitude oeste, e altitude de 6,5 m.

A estrutura era composta lateralmente por tela anti-afídeo e com cobertura com filme plástico difusor com 150 micras, sendo suas dimensões internas 11 x 6 m, totalizando 66m², na qual se realizou os experimentos (Figura 1).



Figura 1. Composição de fotos das atividades realizadas nos experimentos.

3.2.2. Coleta do solo

A coleta do solo foi realizada na camada do solo entre as profundidades de 0 a 30 cm na Fazenda Nossa Senhora do Rosário (Coordenadas geográficas 8° 34' 11" latitude sul, 37° 48' 54" longitude oeste e 630m de altitude acima do nível do mar) (CISAGRO, 1991), no município de Pesqueira – PE, região Agreste e semiárida do Nordeste do Brasil. Segundo classificação de Köppen o clima da região é BSh que, por sua vez, indica se tratar de um clima extremamente quente e semiárido, tendo uma precipitação total média anual de 730 mm e uma evapotranspiração de referência média anual de 1683 mm (USDA, 2014). Segundo Sistema Brasileiro de Classificação do Solo, o solo é classificado como Neossolo Flúvico (SANTOS et al., 2018).

O solo foi coletado e transportado até a Universidade Federal Rural de Pernambuco e colocado em uma lona em ambiente protegido, para secar ao ar. Posteriormente, o solo foi destorroado e passado em peneira de malha de 4 mm com intuito de manter a microagregação do solo e aumentar a representatividade de campo durante os experimentos.

3.2.3. Caracterização inicial de solo

Para caracterização física do solo realizou-se o procedimento de preparo da amostra, tornando-a terra fina seca ao ar (TFSA) e nela determinou-se granulometria e argila dispersa em água pelo método do densímetro, densidade do solo pelo método do anel volumétrico e de partículas pelo balão volumétrico (TEIXEIRA et al., 2017). (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização física inicial do Neossolo Flúvico utilizado nos experimentos.

Variável	Valor	Unidade
Areia Total	200	g kg ⁻¹
Silte	560	g kg ⁻¹
Argila	240	g kg ⁻¹
Classe textural	Franco-Siltoso	
Ds	1,34	g cm ⁻³
Dp	2,60	g cm ⁻³
ADA	101,60	g kg ⁻¹
PT	48,68	%

GF	58,36	%
GD	41,64	%

Ds = Densidade do solo; Dp = Densidade de partículas; ADA = Argila dispersa em água; PT = Porosidade total; GF = Grau de flocculação; GD = Grau de dispersão.

Para caracterização química determinou-se os cátions Na^+ e K^+ trocáveis, extraídos por acetato de amônio 1 mol L^{-1} (THOMAS, 1982). Os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foram extraídos por cloreto de potássio 1 mol L^{-1} , o fósforo disponível foi extraído em Mehlich⁻¹ e o carbono orgânico por oxidação por dicromato de potássio (TEIXEIRA et al., 2017). O extrato de saturação foi obtido por meio do preparo da pasta de saturação (RICHARDS, 1954) e determinou-se a condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) e o pH em água no extrato 1:2,5 (TEIXEIRA et al., 2017) (Tabela 2).

Tabela 2. Caracterização química inicial do Neossolo Flúvico utilizado durante os experimentos.

Variáveis	Valores
Extrato de saturação	
CEes (dS m^{-1})	1,39
Complexo de troca	
pH (1:2,5)	5,76
Na^+ (cmolc.dm^{-3})	0,57
K^+ (cmolc.dm^{-3})	0,40
Ca^{2+} (cmolc.dm^{-3})	11,68
Mg^{2+} (cmolc.dm^{-3})	3,90
P (mg.dm^{-3})	120,51
SB (cmolc.dm^{-3})	16,54
Al^{3+} (cmolc.dm^{-3})	0,00
$\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ (cmolc.dm^{-3})	3,07
CTC Efetiva (cmolc.dm^{-3})	16,54
T (cmolc.dm^{-3})	19,61
V (%)	84,33
CO (g.kg^{-1})	18,17
PST (%)	2,89

P = fósforo disponível; SB = Soma de bases; $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ = Acidez potencial; CTC Efetiva = capacidade de troca de cátions efetiva; T = CTC Total; V = Saturação por base; CO = Carbono Orgânico; CEes = Condutividade elétrica; PST = porcentagem de sódio trocável.

3.2.4. Delineamento experimental e tratamentos

Foram realizados dois experimentos com o intuito de aumentar a representatividade das avaliações dos sensores (YL-69 e tensiômetros) quanto ao Neossolo Flúvico salinizado. Em um

primeiro momento foi montado um experimento em colunas de solo que foram salinizadas por meio da saturação com água salobra, ou seja, ocorrendo uma salinização “forçada” do solo, já no segundo experimento foi utilizado um solo já salinizado durante o cultivo da beterraba, uma vez que esta tinha sido irrigada com diferentes níveis de salinidade durante um total de 50 dias de irrigação com água salobra.

A principal diferença que se tentou abordar é que o segundo experimento simula uma condição com maior representatividade em relação as condições de campo, no qual o solo termina se acomodando durante os ciclos de irrigação, bem como é um solo utilizado durante o cultivo de uma espécie moderadamente tolerante à salinidade, logo, tornando-o mais próximo das condições de campo, mas ainda possibilitando um monitoramento preciso dos dados.

Já no primeiro momento a busca era por uma salinização rápida e verificação efetiva da capacidade dos sensores às situações propostas, possibilitando inclusive uma possível proposta de metodologia para calibração de sensores.

3.2.5. Primeiro experimento

O experimento foi realizado em um delineamento em blocos casualizados com 4 repetições em arranjo fatorial 5 x 2, sendo 5(cinco) níveis de condutividade elétrica e 2 (dois) sensores de umidade no solo, sendo representados pelo resistivo Y1-69 e pelos tensiômetros, totalizando 40 unidades experimentais.

As unidades experimentais foram representadas por colunas de solo, contendo 1,81kg de solo seco, diâmetro aproximado de 100 mm e altura de 20 cm e preenchidas com solo até a altura de 15 cm.

Fisicamente o solo utilizado no preenchimento das colunas passou pelo preparo de amostra até obtenção do solo peneirado em malha de 4 mm seco ao ar.

As unidades experimentais possuíam sistema de drenagem, composta por furos de 4mm e tecido sintético no fundo. As colunas com solo foram postas para saturar por capilaridade em soluções de cloreto de sódio, previamente determinadas com os níveis de condutividade elétrica de 0 (controle), 2; 4; 8 e 16 dS m⁻¹.

O sensor YL-69 foi instalado até a profundidade recomendada, ou seja, até a inserção completa dos eletrodos no solo (Figura 2).



Figura 2. Coluna de solo com sensor YL-69 instalado.

Os tensiômetros foram instalados com auxílio de um trado tipo rosca e foram inseridos a uma profundidade total 9 cm, de modo que a cápsula porosa estivesse inserida no meio da coluna e com uma distância de 7,5 cm entre o centro da cápsula e a superfície do solo (Figura 3).



Figura 3. Colunas de solo com tensiômetros instalados.

3.2.6. Segundo experimento

Assim como o primeiro, foi realizado em um delineamento em blocos casualizados com 4 repetições, em arranjo fatorial 5 x 2, sendo 5(cinco) níveis de condutividade elétrica e 2 (dois) sensores de umidade no solo, sendo representados pelo resistivo Y1-69 e pelos tensiômetros, totalizando 40 unidades experimentais.

As unidades experimentais foram representadas por vasos de polietileno com capacidade para 15L, com diâmetro de 30 cm e volume útil preenchido por solo de 11L e uma massa de solo seco de 17,6 kg, obtendo assim uma densidade de aproximadamente 1,6 g/cm³.

Os níveis de condutividade elétrica foram representados pelos vasos previamente irrigados durante o cultivo da beterraba com um ciclo de irrigação de 50 dias com águas salobras com os níveis de 0, 2, 4, 6 e 8 dS m⁻¹.

O sistema que realizou esta irrigação era composto por uma motobomba, microcontrolador, válvulas solenoides, emissores com gotejadores de 4L/h autocompensantes e diariamente o sistema estava ligado para que todas as unidades fossem repostas aos níveis de umidade correspondentes (Figura 4).

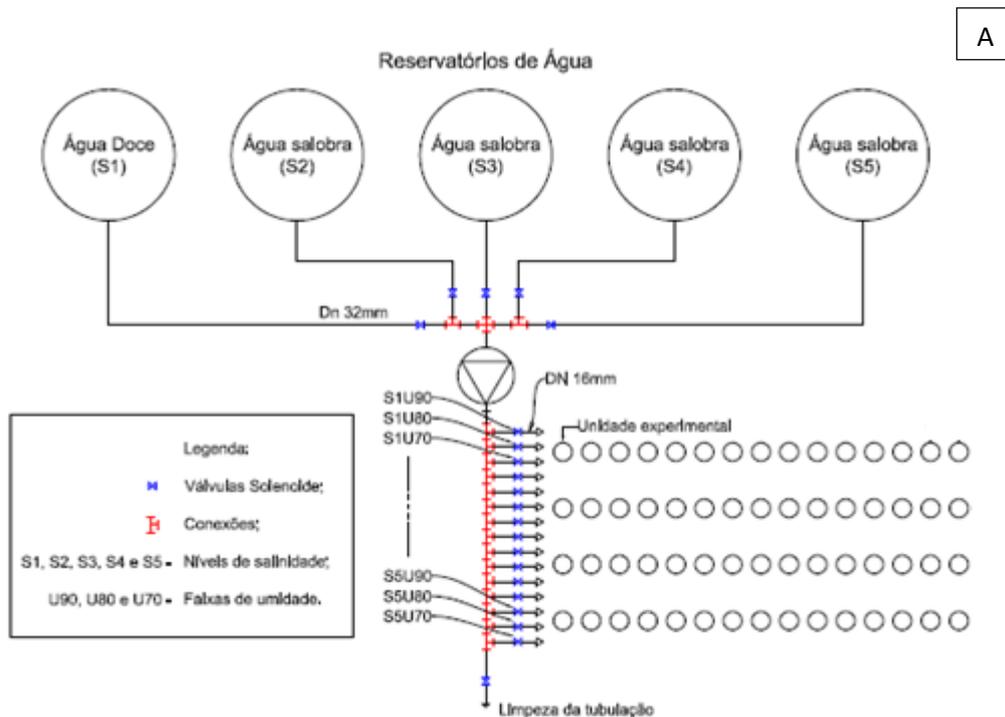




Figura 4. Esquema experimental e do sistema de irrigação (A) e composição de fotos do sistema de irrigação (B).

3.2.7. Preparo das águas

Durante a condução dos experimentos foram confeccionadas águas com cinco níveis distintos de condutividade elétrica (CE). Os níveis de salinidade foram obtidos a partir do incremento de cloreto de sódio (NaCl) na água de abastecimento local (controle), até a obtenção dos respectivos níveis de CE: 0 (água de abastecimento público sem incremento de cloreto de sódio com $CE < 0,1 \text{ dS m}^{-1}$), 2, 4, 8 e 16 dS m^{-1} no caso do primeiro experimento e no caso do segundo os níveis utilizados foram 0, 2, 4, 6 e 8 dS m^{-1} .

3.2.8. Determinação da umidade do solo

A umidade do solo foi determinada de duas maneiras, uma por meio da pesagem do conjunto (vaso, solo e sensor) que ocorreu diariamente no final de cada dia. Já a determinação da umidade via estufa, contou com a coleta de amostras de solo de aproximadamente 20g de solo úmido submetidas ao processo de secagem em estufa a 105°C por 48h (Equação 1).

$$U(\text{g}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{m_{su} - m_{ss}}{m_{ss}} \quad \text{Equação 1}$$

U = Umidade gravimétrica ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$);

m_{su} = Massa de solo úmido (g);

m_{ss} = Massa de solo seco (g).

3.2.9. Condução do experimento

Antes de iniciar o experimento nos vasos, que anteriormente foram cultivados com beterraba, os mesmos foram saturados e postos para drenar e foi monitorado a umidade do solo ao longo de todo o processo de secagem.

Para determinação da umidade diária as unidades eram pesadas para obtenção da umidade gravimétrica que posteriormente foi convertida em umidade volumétrica utilizando a densidade do solo. No mesmo momento que se realizou as pesagens das unidades, também foram feitas as leituras dos sensores.

A leitura do sensor resistivo YL-69 ocorreu por meio de um microcontrolador por intermédio de um ads de 10bits e os tensiômetros com o auxílio de um tensímetro digital de punção. Os sensores YL-69 foram lidos até a umidade do solo apresentar valores constantes e os tensiômetros até o rompimento da coluna de água ($\approx 750 \text{ mbar}$).

3.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Após obtenção dos dados foram realizadas análises de regressão para relacionar o conteúdo volumétrico de água calculado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e o conteúdo de água estimado pelos sensores, após aplicação da equação que converte a variação de corrente em conteúdo de água. No caso do tensiômetro, foi feita uma correlação direta entre as pressões determinadas via tensímetro de punção e o conteúdo de água calculado com base nas pesagens dos vasos, tendo em vista que são considerados mecanismo padrão para determinação, uma vez que são menos influenciados por fatores externos como salinidade e/ou interferências eletromagnéticas.

As avaliações dos modelos de estimativa da umidade do solo pelos métodos indiretos (sensores e tensiômetro), foram baseadas nos seguintes índices estatísticos: coeficiente de determinação (R^2), Erro absoluto médio (*mean bias error*, MBE), erro relativo médio (*mean relative errors*, MRE) e a raiz quadrada do erro quadrático médio (“root mean square error”, RMSE). Sendo a interpretação do RMSE e dos coeficientes de regressão com base nos parâmetros de qualidade propostos em manuais de sensores (DECAGON DEVICES, 2012;

CAMPBELL SCIENTIFIC, 2015), bem como na literatura (FARES et al., 2011; NOLZ et al., 2013; VAZ et al., 2013; NOLZ & KAMMERER, 2017).

Outro índice que foi utilizado durante a avaliação foi o de concordância de Willmott (d), se tratando de um índice adimensional que originalmente varia entre 0 e 1, sendo 0 sem concordância e 1 significando um ajuste perfeito (WILLMOTT, 1981).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [(P_i - \bar{O}) - (O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n [|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|]^2} \quad \text{Equação 2}$$

No qual, P_i significa o ponto estimado, O_i o ponto observado e \bar{O} a média dos pontos observados.

Por fim o índice de Willmott foi utilizado para determinar também o índice de confiança (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997) por meio da equação 3:

$$c = r \times d \quad \text{Equação 3}$$

No qual, “ r ” é o índice de precisão e “ d ” o índice de concordância. Para a interpretação dos resultados deste índice utilizou-se a classificação proposta pelos mesmos autores anteriormente citados.

3.4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Observa-se nas curvas de secagem do solo uma menor redução da umidade em solos mais salinos ao longo dos dias (Figura 5).

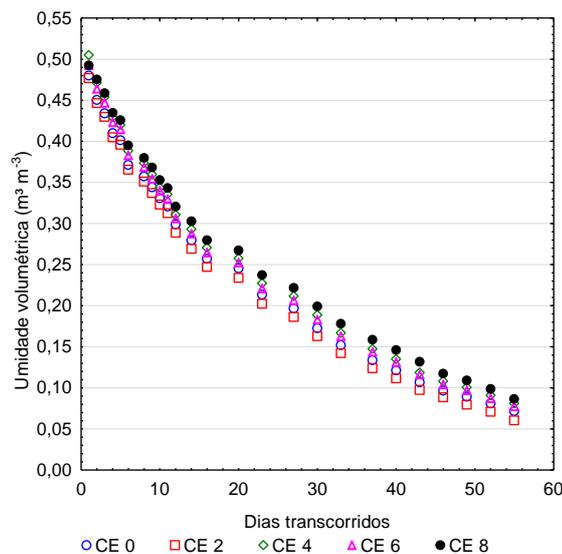


Figura 5. Curvas de secagem para os diferentes níveis de salinidade.

A salinidade causa alterações físicas e químicas do solo, dentre as quais quimicamente se destaca o potencial osmótico, a condutividade elétrica e o pH do solo. Solos salinos apresentam um potencial osmótico mais baixo devido as altas concentrações de sais no solo. Tais características podem promover uma maior retenção de água no solo em decorrência de uma menor diferença de potencial entre o solo e a atmosfera, favorecendo assim a manutenção da umidade (OLIVEIRA et al., 2016).

O excesso de sódio no solo (sodicidade) é um problema que acarreta alterações na estrutura do solo, que vão desde modificações da densidade até entupimento dos poros em decorrência da dispersão de partículas finas, que por sua vez, prejudicam o processo de movimentação de água no solo, favorecendo o encharcamento, a manutenção da água e o acúmulo de sais na superfície, com consequente drenagem deficitária do solo (ALEXANDRE et al., 2018; RENGASAMY et al., 2022; SHAYGAN & BAUMGARTL, 2022).

Neste experimento observou-se que os maiores níveis de umidade estavam presentes nos maiores níveis de CE do solo isso levando-se em consideração o mesmo tempo decorrido, salienta-se que neste caso a CE máxima era a de 8 dS m^{-1} , correspondente ao nível mais alto utilizado durante o cultivo da beterraba.

Em termos de sensores de umidade do solo, houve alta correlação entre a umidade do solo e o potencial mátrico do solo para os tensiômetros para todos os níveis de salinidade do solo, alcançando valores superiores aos 0,94 de coeficiente de determinação (R^2). Apesar das altas correlações em todos os tratamentos estudados os tensiômetros resultaram em menores variações entre as equações propostas para ambos os experimentos (Figura 6).

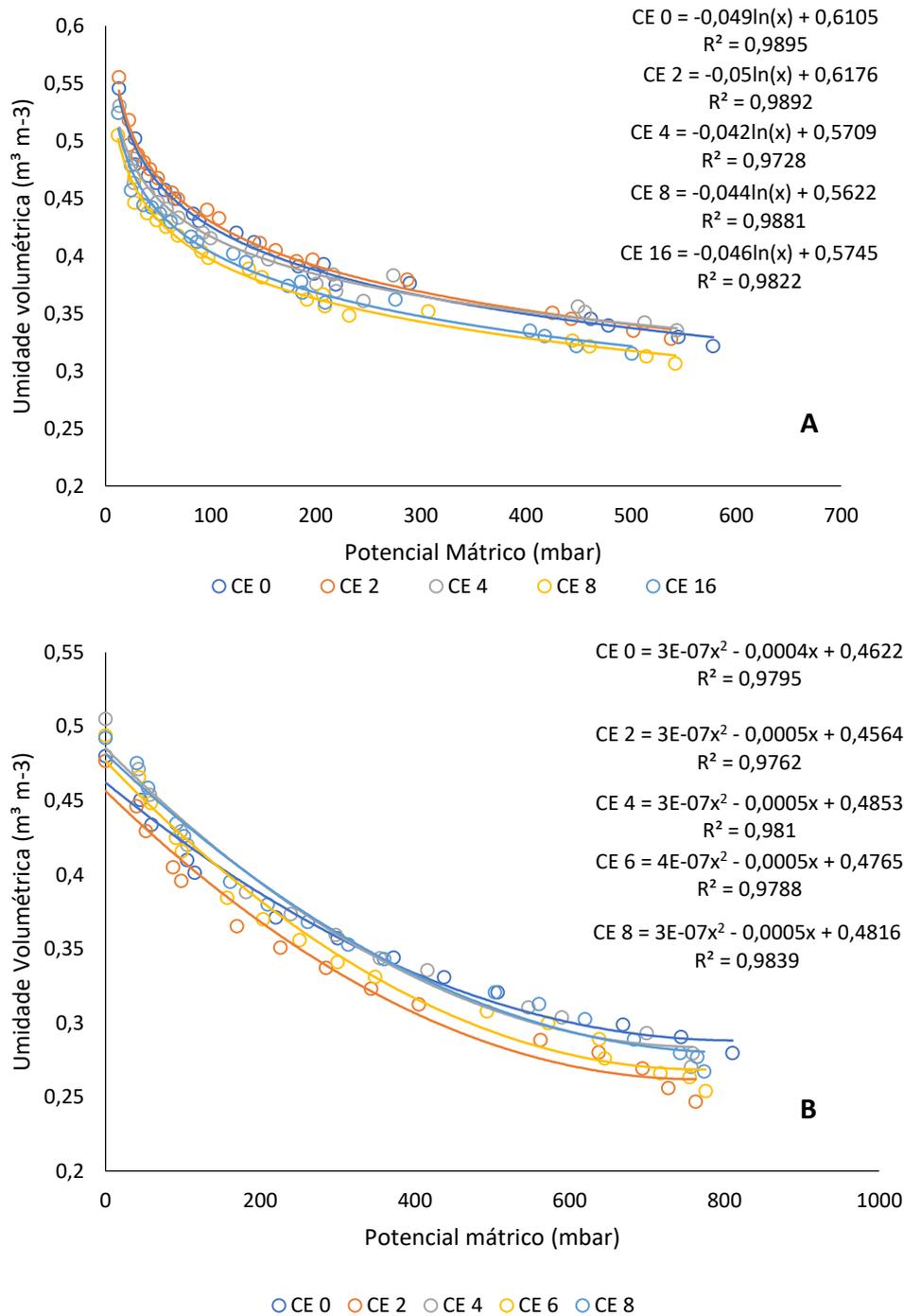


Figura 6. Curvas características de retenção de água em solo salinizado por saturação com água salobra (A) e em solo salinizado por meio da irrigação com água salobra durante o cultivo de um ciclo da beterraba (B).

Enquanto no experimento com saturação do solo com níveis de CE entre 0 e 16 dS m^{-1} os tratamentos de 8 e 16 dS m^{-1} (maiores níveis de salinidade) apresentaram comportamento próximo e ao mesmo tempo diferiram dos demais níveis de salinidade. No experimento salinizado por irrigação a CE de 8 dS m^{-1} (maior valor de salinidade do 2º experimento)

novamente se verificou comportamento que difere dos níveis mais baixos, porém ocorreu proximidade ao tratamento de 2 dS m⁻¹.

Devido ao princípio de funcionamento e a estrutura dos tensiômetros, composta por uma cápsula porosa e um tubo para armazenamento de água, os tensiômetros são simples e possuem a vantagem de não serem afetados por sais, além de serem o método mais conhecido na literatura (RICHARDS & GARDNER, 1936; RICHARDS, 1938; VAN GENUCHTEN, 1980; BITTELLI, 2010). A provável alteração entre as curvas deve ser oriunda unicamente das alterações físicas do solo influenciadas pela salinidade da água utilizada.

As leituras dos sensores resistivos YL-69 demonstraram diferença entre as curvas de calibração propostas, pois observa-se redução da resistência elétrica do solo para uma mesma umidade, a partir do incremento da salinidade do solo, indicando forte influência do sal na variável em questão (Figura 7).

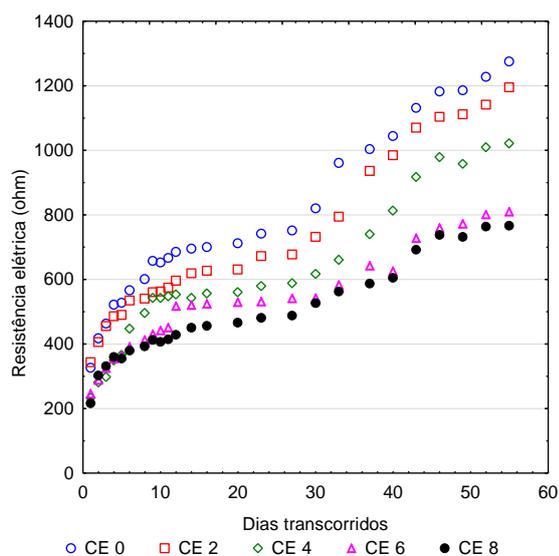


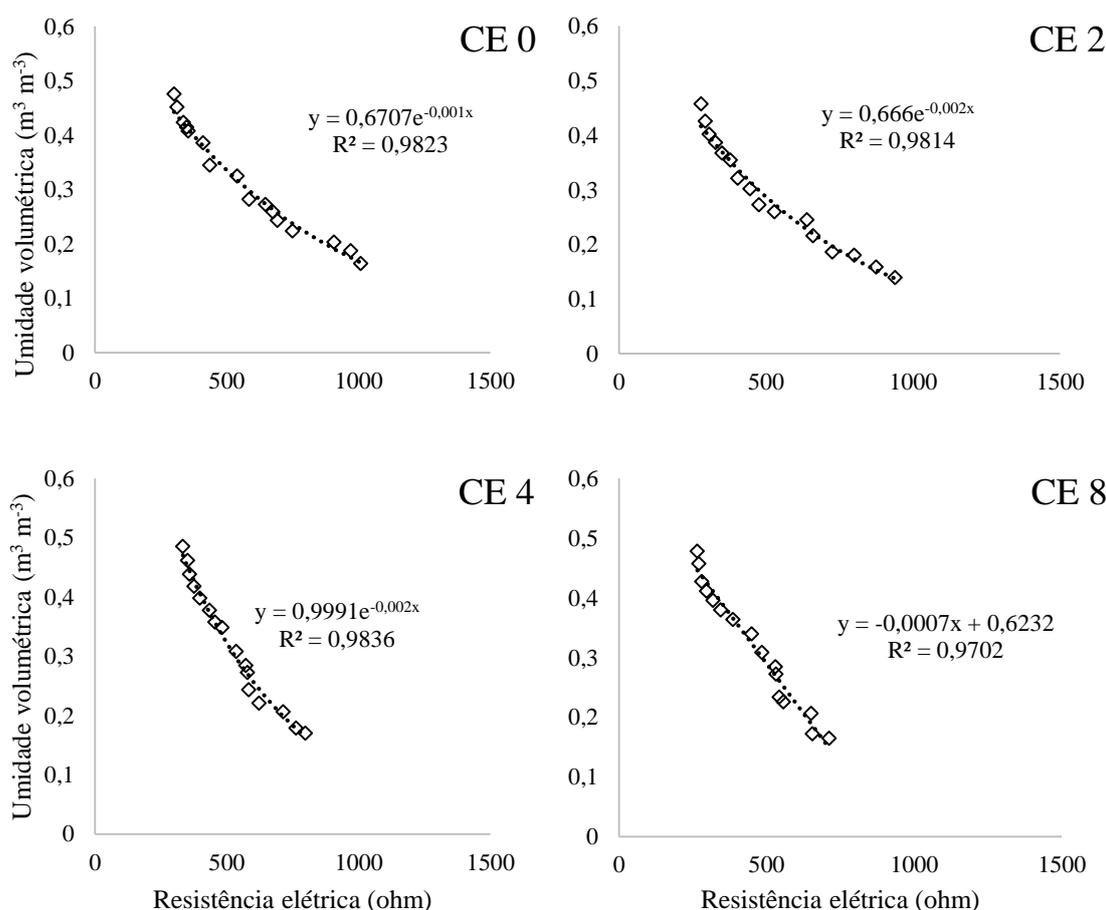
Figura 7. Resistência elétrica do solo em relação aos dias transcorridos em solos irrigados com água salobra durante o cultivo da beterraba. As siglas CE 0, CE 2, CE 4 e CE 8 correspondem aos níveis de salinidade de 0, 2, 4, 6 e 8 dSm⁻¹ da água de irrigação.

Muitos sensores de umidade são afetados pela salinidade, entretanto o princípio de funcionamento é uma das principais características que os tornam susceptíveis ou não a este fator (ZAZUETA & XIN, 1994). A influência da salinidade nas leituras de sensores de umidade no solo, fazem com que a maioria dos sensores apresentem faixas ideais de atuação, ou seja, possuem restrições quanto ao uso em ambiente salino, como é o caso do modelo EC-5 e o

TEROS 10 da decagon que possuem limite de atuação até 8 dS m⁻¹ no extrato de saturação (DECAGON DEVICES, 2012, 2022).

Diante a robustez dos sensores e a capacidade de lidar com a salinidade, pode-se destacar sensores que possuem como princípio de funcionamento a reflectometria no domínio do tempo (TDR), uma vez que a alta frequência utilizada na leitura reduz a interferência da salinidade no solo, mais precisamente frequências superiores aos 250 MHz (SZYPLÓWSKA et al., 2019).

Observa-se comportamento de redução dos valores de resistência elétrica do solo medidos pelo YL-69 com aumento da salinidade do solo, entretanto, para um solo salinizado artificialmente com um nível de condutividade elétrica de até 16 dS m⁻¹, foi possível propor equações de calibração com altos coeficientes de determinação ($R^2 \geq 0,96$), indicando que é possível calibrar sensores para as condições propostas (Figura 8).



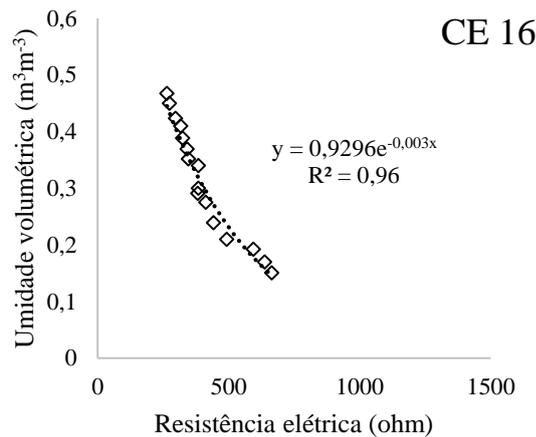


Figura 8. Curvas de leitura do YL-69 na unidade de resistência elétrica em relação a umidade do solo medida pelo método padrão. As siglas CE 0, CE 2, CE 4, CE 8 e CE 16 correspondem aos níveis de condutividade elétrica de 0, 2, 4, 8 e 16 dS m⁻¹ utilizados na saturação das colunas de solo.

Assim como ocorreu para o solo saturado com água salobra, observa-se que o YL-69 novamente apresentou leituras com reduções da resistência elétrica do solo associadas ao aumento da salinidade do solo, efeito que é observado em níveis mais baixos de umidade do solo (umidade volumétrica próximas de 0,1 m³ m⁻³), entretanto novamente foi possível elaborar equações de calibração com altos coeficientes de regressão ($R^2 > 0,96$) para solos irrigados com até 8 dSm⁻¹ durante o cultivo da beterraba (Figura 9).

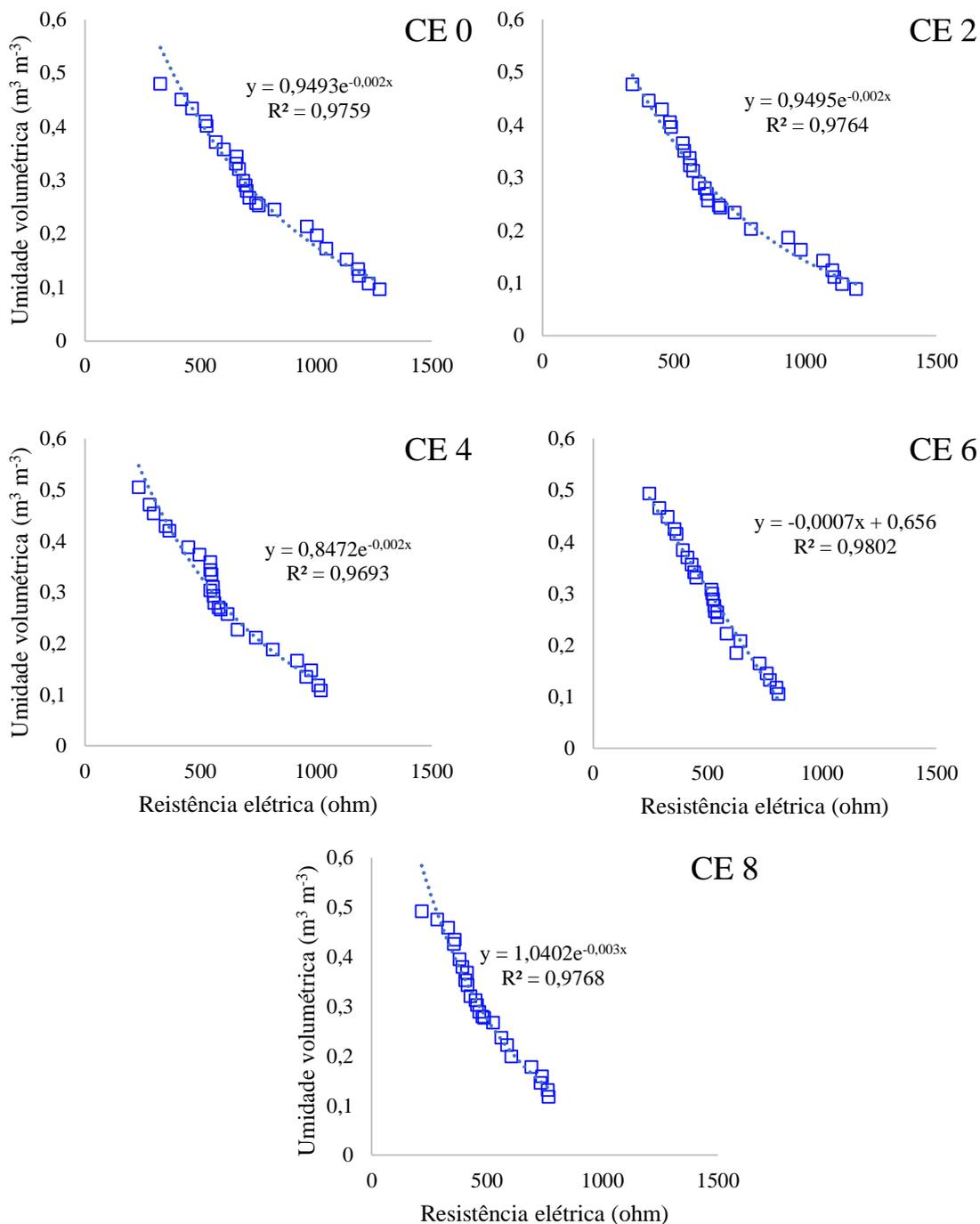


Figura 9. Curvas de leitura do YL-69 na unidade de resistência elétrica em relação a umidade do solo medida pelo método padrão. As siglas CE 0, CE 2, CE 4, CE 6 e CE 8 correspondem aos níveis de condutividade elétrica de 0, 2, 4, 6 e 8 dS m⁻¹ das águas de irrigação utilizadas durante o cultivo da beterraba.

Em se tratando da redução observado sob os valores de resistência elétrica do solo quando o solo possui maiores níveis de salinidade, é provável que se deva ao aumento na concentração de íons na solução do solo, permitindo assim a facilidade da passagem da corrente elétrica. Tal informação é possível de ser observada por meio do aumento da condutividade

elétrica da pasta de saturação, ou seja, temos um aumento da condutividade elétrica do solo e consequentemente uma redução da resistividade, uma vez que são variáveis inversamente proporcionais e, consequentemente, acarreta numa menor resistência elétrica do solo (Figura 10).

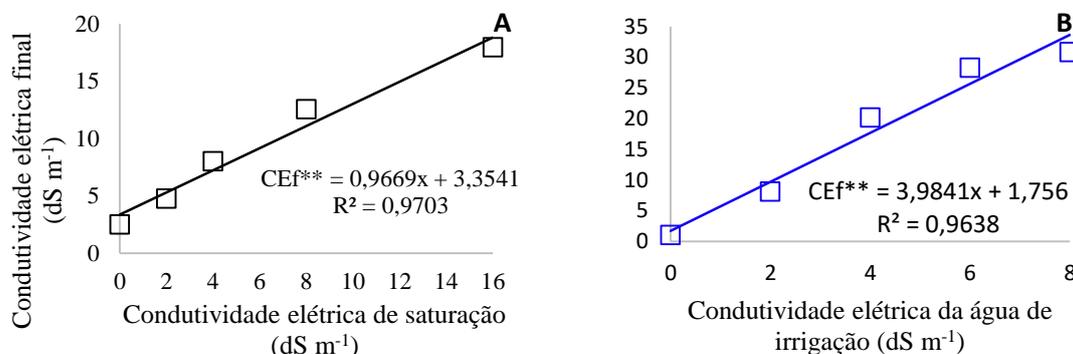


Figura 10. Condutividade elétrica das colunas de solo (A) e dos vasos irrigados com diferentes níveis de água salobra durante o cultivo da beterraba (B).

A irrigação com água salobra promove o aumento acelerado da salinidade do solo, especialmente em sistemas em que não é realizado o processo de lixiviação de sais, podendo alcançar valores superiores ao dobro do nível de salinidade utilizado na irrigação (LEAL et al., 2020). A saturação do solo com níveis de água salobra para obtenção de solos salinizados artificialmente é comum para avaliações de desempenho de diversos tipos de sensores de umidade do solo (MATULA et al., 2016; SZYPLÓWSKA et al., 2019; ADLA et al., 2020).

Apesar da influência da salinidade na variável resposta do YL-69 - o que não foi observado nos tensiômetros - é possível comprovar a precisão de ambos os sensores por meio de outros índices estatísticos, sendo eles, a raiz quadrada do erro médio (RMSE), o índice de concordância (d) e pelo índice de desempenho (c) (CAMARGO & SENTELHA, 1997; WILLMOTT et al., 2012;) (Tabela 3).

Tabela 3. Estatística das calibrações do tensiômetro e YL-69 em solo salinizado por saturação e em solo salinizado por irrigação durante o cultivo da beterraba.

	Colunas de solo saturados						Vasos irrigados					
	RMSE		Willmott(d)		Desempenho(c)		RMSE		Willmott(d)		Desempenho(c)	
	Tens	YL	Tens	YL	Tens	YL	Tens	YL	Tens	YL	Tens	YL
S0	0,01	0,01	1,00	1,0	0,99	0,99	0,02	0,02	0,98	0,99	0,97	0,98
S1	0,01	0,02	1,00	0,99	0,99	0,98	0,01	0,02	0,99	0,99	0,98	0,98
S2	0,01	0,03	0,99	0,98	0,98	0,97	0,01	0,03	1,00	0,98	0,99	0,97
S3	0,01	0,02	1,00	0,99	0,99	0,98	0,03	0,02	0,95	0,99	0,94	0,98
S4	0,01	0,02	1,00	0,99	0,99	0,97	0,01	0,02	1,00	0,99	0,99	0,98

S0, S1, S2 e S4 equivalem as CE de 0, 2, 4, 8 e 16 dS m⁻¹ no experimento com colunas de solo e 0, 2, 4, 6 e 8 dS m⁻¹ para o experimento com os vasos irrigados com água salobra.

Para o RMSE os tensiômetros apresentaram os resultados mais baixos e consequentemente mais precisos, com exceção do tratamento CE de 6 dS m^{-1} do experimento com vasos irrigados, pois apresentou um valor de 0,03. No caso do YL-69 variou entre o valor de 0,03 que ocorreu para CE de 4 dS m^{-1} para os experimentos de coluna e vasos irrigados e 0,01 para o experimento com colunas sem adição de sais. Entretanto, para todos os tratamentos estes valores são considerados de precisão regular (FARES et al., 2011).

Precisão “regular” não necessariamente é indicativo de baixa precisão, pois o RMSE é considerado um índice sensível e amplamente utilizado para determinação da precisão de sensores, sendo possível encontrar calibrações para sensores como o TDR sob condições com e sem salinidade com valores de RMSE entre 0,01 e 0,05 ou até maiores dependendo da proposta de calibração (DYER et al., 2021; PENG et al., 2022; KOJIMA et al., 2023).

Quando observado o índice de concordância (d) a correlação é considerada altíssima, tendo em vista valores próximos ou igual a 1, ao qual se considera a correlação “perfeita”. A única exceção fica a cargo novamente do tratamento de 6 dS m^{-1} , para os tensiômetros dos vasos irrigados, com valor de 0,95 e de 0,98 para o YL-69 para o experimento com vasos irrigados e colunas ambos na salinidade de 4 dS m^{-1} , ou seja, comportamento semelhante ao observado para o RMSE (WILLMOTT et al., 2012). Por fim, o desempenho (c) dos sensores obtiveram valores considerados ótimos ($>0,85$), tendo em vista que todos os valores encontrados foram maiores que 0,93.

Novamente fica evidenciado a precisão das equações de calibração para os níveis de salinidade de até 16 e 8 dS m^{-1} , em solo salinizado artificialmente e em solo salinizado a partir da irrigação com água salobra respectivamente.

Quanto à tendência das equações de calibração dos sensores de umidade YL-69 é possível constatar que o modelo exponencial apresentou os melhores ajustes para quase todos os tratamentos, com exceção do tratamento de CE 8 dS m^{-1} no experimento com colunas de solo, no qual se observou maior coeficiente de determinação para o modelo linear. Já no segundo experimento, o uso da regressão linear ocorreu apenas na CE de 6 dS m^{-1} .

Em termos de comparativo, o sensor YL-69 já apresentou precisão equivalente a sensores mais robustos como 5TE e EC5 para diversas classes de solo, sendo elas: Argissolo Vermelho Amarelo, Epodossolo Humilúvico, Latossolo Amarelo e Neossolo Regolítico, isso após a calibração específica do modelo para cada classe de solo, sendo algumas no modelo exponencial como foi o caso do Neossolo e do Latossolo (JIMÉNEZ et al., 2019). Lembrando

que neste caso tanto os sensores 5Te, EC5 e o próprio YL-69, foram calibrados para solos sem problemas de sais, ou seja, com $CE < 4 \text{ dS m}^{-1}$.

Apesar dos tensiômetros não serem diretamente afetados pela salinidade, a estrutura do solo pode ser alterada mediante o excesso de sódio ($PST > 15\%$) ou da salinidade ($CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$), conforme pode ser observado por meio das Curvas Características de Retenção de Água no Solo (CCRAS) que indicam tensões mais altas para uma mesma umidade do solo a medida que ocorre aumento da CE (AYERS & WESTCOT, 1985).

Não se observa alteração significativa das curvas dos tensiômetros quando construídas em solos salinizados artificialmente, ou quando foram irrigados com a água salobra durante o cultivo da beterraba, ou seja, a única advertência é quanto ao nível de umidade a se trabalhar uma vez que fica limitado a questão da tensão de borbulhamento na qual ocorre o rompimento da coluna de água ($\approx 750 \text{ mba}$). O provável motivo da não alteração das Curvas pode estar atrelado a classe dos Neossolos Flúvicos, caracterizada por solos pouco estruturados e com predisposição a se tornarem salinos (CASTRO & SANTOS, 2020; ARAÚJO FILHO et al., 2021).

Equações de calibração e a umidade na capacidade de campo

Afim de comparar as equações de calibração e verificar a sua margem de erro, propõe-se um comparativo entre as equações para um dos valores de umidade de maior importância para a irrigação, que neste caso é o valor da umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), representada pelo potencial mátrico de 100cca. Levando-se a em consideração este valor, estimou-se a θ_{cc} para todas as equações de calibração propostas (Tabela 4).

Tabela 4. Estimativa da umidade volumétrica na capacidade de campo para todos os tratamentos salinos.

Níveis de CE (dS m^{-1})	Experimento 1	Experimento 2
	----- $\theta_{cc} \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ -----	
S0	0,4267	0,4229
S1	0,4311	0,4099
S2	0,4179	0,4375
S3	0,3981	0,4269
S4	0,4046	0,4361
Média	0,4157	0,4266

S0, S1, S2, S3 e S4, representam os níveis de salinidade de 0, 2, 4, 8 e 16 dS m^{-1} para o primeiro experimento e de 0, 2, 4, 6 e 8 dS m^{-1} para o 2 experimento.

Observa-se para os tensiômetros que, independente da curva de calibração utilizada dentre os 5 níveis de CE, o erro máximo na estimativa da umidade na capacidade de campo seria de $0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o 1º e 2º experimento, o que representaria um erro máximo na ordem de 7%. Entretanto, a curva de calibração do tratamento sem salinidade ($\text{CE } 0 \text{ dS m}^{-1}$) do sensor YL-69 se utilizada para estimar a umidade na capacidade de campo do tratamento de maior salinidade (16 para coluna de solo e 8 dS m^{-1} para os vasos irrigados), o erro seria de 0,16 e $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para os solos salinizados por saturação e para o solo salinizado por meio da irrigação respectivamente, ou seja, no caso dos sensores YL-69 é um erro na ordem de 40% e 26% para o 1 e 2º experimento respectivamente.

Erros de umidade na ordem de 0,16 e $0,11 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (40 e 26%) em termos de potencial mátrico/tensiômetro seria um erro grande ao ponto de considerar o solo saturado ($\approx 0 \text{ mbar}$), mas se a calibração fosse invertida, ou seja, a calibração dos níveis mais altos de salinidade (16 e 8 dS m^{-1}) fossem utilizadas para estimar solos não salinos o inverso aconteceria, o erro passaria a ser de 17 e $13 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ na ordem de 39 e 31% e a umidade lida pelos sensores YL-69 seriam o equivalente a mais de 750 mbar (fora da curva dos tensiômetros, lembrando que o valor correto deveria ser da θ_{cc}).

O uso da calibração correta é imprescindível para obtenção de resultados de umidade mais precisos conforme observado para os diversos sensores de umidade, pois sem a devida calibração é comum que haja a subestimativa ou superestimativa dos valores de umidade para determinadas faixas, em especial quando comparado aos resultados obtidos por meio de calibrações de fábrica (DOMÍNGUEZ-NIÑO, 2019; DONG et al., 2020).

Houve diferença significativa entre as calibrações propostas para o primeiro e segundo experimento, sendo menos representativas no caso dos tensiômetros e mais significativa no caso do YL-69, porém é comum na literatura observar que a calibração proposta em laboratório, ou em condições de ambiente mais controlado, pode apresentar variações dos resultados em relação as condições de campo (CALDWELL et al., 2018; GONZÁLEZ-TERUEL et al., 2019).

O uso dos sensores de umidade no solo para a irrigação pode ser fundamental para tomada de decisão, economia de água e energia elétrica (IŞIK et al., 2017), porém pesquisas que comparem o uso de sensores de baixo custo e com métodos distintos é imprescindível para dar acesso a toda a população, em especial aquela que compõe a agricultura familiar que representa 76,8% dos estabelecimentos agropecuários do Brasil (IBGE, 2017). O uso destes aparelhos pode possibilitar uma agricultura sustentável e de maior acesso a população.

3.5. CONCLUSÃO

O emprego de sensores de baixo custo YL-69 e os tensiômetros é possível em condições de condutividade elétrica de até 16 dS m^{-1} para solos salinizados artificialmente e de 8 dS m^{-1} para solos irrigados com águas salobras. A salinidade afeta significativamente os sensores YL-69, porém por meio da calibração específica para cada nível de salinidade são possíveis de serem utilizados sem que haja perda da precisão. No que se refere a curva de calibração dos tensiômetros, independentemente do nível de salinidade é possível, desde que as condições físicas do solo se mantenham as mesmas, sem que haja perda significativa de precisão. Em caso de alteração significativa da salinidade do solo, recomenda-se que uma nova calibração seja realizada para os sensores YL-69.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLA, S.; RAI, N. K.; KARUMANCHI, S. H.; TRIPATHI, S.; DISSE, M.; PANDE, S. Laboratory calibration and performance evaluation of low-cost capacitive and very low-cost resistive soil moisture sensors. **Sensors**, v. 20, n. 2, p. 363, 2020.

ALEXANDRE, C.; BORRALHO, T.; DURÃO, A. Evaluation of salinization and sodification in irrigated areas with limited soil data: Case study in southern Portugal. **Spanish Journal of Soil Science**, v. 8, p. 102-120, 2018.

ARAÚJO FILHO, R. N.; HOLANDA, F. S. R.; CUNHA FILHO, M.; PISCOYA, V. C.; MELO NETO, J. D. O.; GUIMARÃES, D. V. Relationship between physical and chemical properties of Entisols-Fluvents and erosion in the São Francisco river. **Revista Caatinga**, v. 34, p. 422-431, 2021.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **Water quality for agriculture**. rev. 1, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 29, 1985. 160p.

BITTELLI, M. Measuring soil water potential for water management in agriculture: A review. **Sustainability**, v. 2, n.5, p. 1226-1251, 2010.

CALDWELL, T. G.; BONGIOVANNI, T.; COSH, M. H.; HALLEY, C.; YOUNG, M. H. Field and laboratory evaluation of the CS655 soil water content sensor. **Vadose Zone Journal**, v. 17, n. 1, p.1-16, 2018.

CAMARGO, A. P., SENTELHAS P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMPBELL SCIENTIFIC. **Instruction Manual: TDR100**, 2015 48p. Disponível em: <<https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/tdr100.pdf>>; Visto em: 30/10/2022.

CASTRO, F. C.; SANTOS, A. M. D. Salinidade do solo e risco de desertificação na região semiárida. **Mercator**, v. 19, p. e19002, 2020.

COMPANHIA INTEGRADA DE SERVIÇOS AGROPECUÁRIOS – CISAGRO. **Projeto de Irrigação da fazenda Nossa Senhora do Rosário-Pesqueira-PE**. 1 ed., Pernambuco, Brasil, 1991. 230 p.

DECAGON DEVICES. **EC-5 Soil Moisture Sensor - User's Manual**. v.2, 2012. 24p.

DECAGON DEVICES. **TEROS 10**. 2022. 23p.

DENG, X.; GU, H.; YANG, L.; LYU, H.; CHENG, Y.; PAN, L.; FU, Z.; CUI, L.; ZHANG, L. A method of electrical conductivity compensation in a low-cost soil moisture sensing measurement based on capacitance. **Measurement**, v. 150, p. 107052, 2020.

- DOMÍNGUEZ-NIÑO, J. M.; BOGENA, H. R.; HUISMAN, J. A.; SCHILLING, B.; CASADESÚS, J. On the accuracy of factory-calibrated low-cost soil water content sensors. **Sensors**, v. 19, n.14, p. 3101, 2019.
- DONG, Y.; MILLER, S.; KELLEY, L. Performance evaluation of soil moisture sensors in coarse-and fine-textured Michigan agricultural soils. **Agriculture**, v. 10, n.12, p. 598, 2020.
- DYER, W.; BREMER, D.; ROSSINI, P.; STONE, M.; PATRIGNANI, A. Laboratory Calibration of the Spectrum Field Scout TDR 300. **Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports**, v. 7, n.4, p.8, 2021.
- FAO. **The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2020. 210p.
- FARES, A.; ABBAS, F.; MARIA, D.; MAIR, A. Improved Calibration Functions of Three Capacitance Probes for the Measurement of Soil Moisture in Tropical Soils. **Sensors**, v. 11, n. 5, p. 4858-4874, 2011.
- GONZÁLEZ-TERUEL, J. D.; TORRES-SÁNCHEZ, R.; BLAYA-ROS, P. J.; TOLEDO-MOREO, A. B.; JIMÉNEZ-BUENDÍA, M.; SOTO-VALLES, F. Design and calibration of a low-cost SDI-12 soil moisture sensor. **Sensors**, v. 19, n.3, p. 491, 2019.
- HALEY, M. B., DUKES, M. D. Validation of landscape irrigation reduction with soil moisture sensor irrigation controllers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 138, n. 2, p. 135-144, 2012.
- IBGE, 2017. **Atlas do espaço Rural Brasileiro: Agricultura Familiar**. 2 ed., Rio de Janeiro: 2017. Cap. , p. 292-295.
- IŞIK, M. F.; SÖNMEZ, Y.; YILMAZ, C.; ÖZDEMİR, V.; YILMAZ, E. N. Precision irrigation system (PIS) using sensor network technology integrated with IOS/Android application. **Applied Sciences**, v. 7, n. 9, p. 891, 2017.
- JIMÉNEZ, A. L. Á. C., DE ALMEIDA, C. D. G. C., SANTOS JÚNIOR, J. A., DE MORAIS, J. E. F., DE ALMEIDA, B. G., DE ANDRADE, F. H. N. Accuracy of capacitive sensors for estimating soil moisture in northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104413, 2019.
- KC, B.; CHAU, H. W.; MOHSEN, M.; CAMERON, K.; SAFA, M.; MCINDOE, I.; RUTTER, H.; DARK, A.; LEE, M.; PANDEV, V. P.; SCHULTZ, B.; PRASAD, K. Assessment of spatial and temporal variability in soil moisture using multi-length TDR probes to calibrate Aquaflex sensors. **Irrigation Science**, v. 39, p. 703-713, 2021.
- KOJIMA, Y.; OKUMURA, K.; AOKI, S.; NOBORIO, K.; KAMIYA, K.; HORTON, R. A four-parameter-based thermo-TDR approach to estimate water and NAPL contents of soil liquid. **Geoderma**, v. 429, p. 116263, 2023.
- LEAL, L. Y. C; DE SOUZA, E. R.; JÚNIOR, J. A. S.; DOS SANTOS, M. A. Comparison of soil and hydroponic cultivation systems for spinach irrigated with brackish water. **Scientia Horticulturae**, v. 274, p. 109616, 2020.

MATULA, S.; BÁŤKOVÁ, K.; LEGESE, W. L. Laboratory performance of five selected soil moisture sensors applying factory and own calibration equations for two soil media of different bulk density and salinity levels. **Sensors**, v. 16, n.11, p. 1912, 2016.

NOLZ, R., KAMMERER, G. Evaluating a sensor setup with respect to near-surface soil water monitoring and determination of in-situ water retention functions, **Journal of Hydrology**, v. 549, p. 301-312, 2017.

NOLZ, R., KAMMERER, G., CEPUDER, P. Calibrating soil water potential sensors integrated into a wireless monitoring network. **Agricultural Water Management**, v. 116, p. 12–20, 2013.

OLIVEIRA, W. J. D.; SOUZA, E. R. D.; ALMEIDA, B. G. D.; SILVA, Ê. F. D. F.; MELO, H. F. D.; LEAL, L. Y. Soil water energetic status and cowpea beans irrigated with saline water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 685-691, 2016.

PENG, W.; LU, Y.; WANG, M.; REN, T.; HORTON, R. Determining water content and bulk density: The heat-pulse method outperforms the thermo-TDR method in high-salinity soils. **Geoderma**, v. 407, p. 115564, 2022.

PESSOA, L. G.; FREIRE, M. B. D. S.; GREEN, C. H.; MIRANDA, M. F.; JOSÉ FILHO, C. D. A.; PESSOA, W. R. Assessment of soil salinity status under different land-use conditions in the semiarid region of Northeastern Brazil. **Ecological Indicators**, v. 141, p. 109139, 2022.

PLACIDI, P.; GASPERINI, L.; GRASSI, A.; CECCONI, M.; SCORZONI, A. Characterization of low-cost capacitive soil moisture sensors for IoT networks. **Sensors**, v. 20, n.12, p. 3585, 2020.

RENGASAMY, P.; DE LACERDA, C. F.; GHEYI, H. R. Salinity, sodicity and alkalinity. In *Subsoil Constraints for Crop Production*. In: OLIVEIRA, T. S.; BELL, R. W. **Subsoil Constraints for crop production**, 1 ed., Springer Cham, 2022. Cap. 4, 83-107.

RICHARDS, L. A.; GARDNER, W. Tensiometers for Measuring the Capillary Tension of Soil Water. **Agronomy Journal**, v. 28, n. 5, p. 352-358, 1936

RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington, D.C.: United States Salinity Laboratory, United States Department of Agriculture - Handbook, 60, ,1954.160p.

RICHARDS, S. J. Soil moisture content calculations from capillary tension records. **Soil Science Society of America Journal**, v. 3, p. 57-64, 1938.

SANTOS, H. G., JACOMINE, P. K. T., DOS ANJOS, L. H. C., DE OLIVEIRA, V. A., LUMBREAS, J. F., COELHO, M. R., DE ALMEIDA, J. A., DE ARAÚJO FILHO, J. C., DE OLIVEIRA, J. B., CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed., Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.

SHAYGAN, M.; BAUMGARTL, T. Reclamation of salt-affected land: A review. **Soil Systems**, v. 6, n. 3, p. 61, 2022.

SU, S. L.; SINGH, D.N.; BAGHINI, M. S. A. Critical review of soil moisture measurement, **Measurement**, v. 54, p. 92-105, 2014.

SZYPŁOWSKA, A.; LEWANDOWSKI, A.; JONES, S. B.; SABOUROUX, P.; SZEREMENT, J.; KAFARSKI, M.; WILCZEK, A.; SKIERUCHA, W. Impact of soil salinity, texture and measurement frequency on the relations between soil moisture and 20 MHz–3 GHz dielectric permittivity spectrum for soils of medium texture. **Journal of Hydrology**, v. 579, p. 124155, 2019.

TAN, W. Y.; THEN, Y. L.; LEW, Y. L.; TAY, F. S. Newly calibrated analytical models for soil moisture content and pH value by low-cost YL-69 hygrometer sensor. **Measurement**, v. 134, p. 166-178, 2019.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3ed., Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574p.

THOMAS, G. W. Exchangeable cations. In: Page, A. L. **Methods of soil analysis**. Part-2 chemical methods. Madison: American Society of Agronomy, 1982. p.159-165.

USDA. **Keys to Soil Taxonomy**, 12 ed. United State Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (NRCS), 2014.

VAN GENUCHTEN, M. T. A. Closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, n.5, p. 892-898, 1980.

VAZ, C. M. P., JONES, S., MEDING, M., TULLER, M. Evaluation of standard calibration functions for eight electromagnetic soil moisture sensors. **Vadose Zone Journal**, v. 12., n. 2, p. 1-16, 2013.

WILLMOTT, C. J.; ROBESON, S. M.; MATSUURA K. A refined index of model performance. **Int J Climatol** v. 32, n.13, p. 2088–2094, 2012.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical geography**, v. 2, n.2, p. 184-194, 1981.

ZAZUETA, F. S.; XIN, J. Soil moisture sensors. **Soil Sci**, v. 73, p. 391-401, 1994.

ZEMNI, N.; BOUKSILA, F.; PERSSON, M.; SLAMA, F.; BERNDTSSON, R.; BOUHLILA, R. Laboratory calibration and field validation of soil water content and salinity measurements using the 5TE sensor. **Sensors**, v. 19, n.23, p. 5272, 2019.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A umidade e salinidade do solo afetam de maneira distinta a cultura da beterraba, porém faixas adequadas tanto de umidade quanto de salinidade promovem melhores no desenvolvimento da cultura. A beterraba por se tratar de uma cultura com afinidade ao elemento sódio, possuem ganhos significativos em suas características, como por exemplo o aumento de suculência e a melhor capacidade de ajustamento osmótico, ou seja, novas pesquisas deverão ser realizadas a fim de compreender os mecanismos que envolve os processos de tolerância desta e de outras natrofilicas.

O uso de sensores de baixo custo como o YL-69 e o tensiômetro mesmo em condições de salinidade, poderá ser benéfico para a agricultura irrigada a fim de garantir uma irrigação precisa, promovendo a eficiência hídrica e energética dos recursos além de ganhos de produção decorrentes do maior controle da umidade do solo, entretanto é imprescindível que haja a devida calibração dos sensores antes do uso, bem como uma avaliação a longa prazo uma vez que os sensores YL-69 podem apresentar desgastes ao longo do tempo.