

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DAS RESPOSTAS DA
ALFACE À SALINIDADE EM HIDROPONIA E SOLO**

PAULO VITOR SANTA ROSA SILVA

**CRUZ DAS ALMAS – BAHIA
2023**

PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DAS RESPOSTAS DA ALFACE À SALINIDADE EM HIDROPONIA E SOLO

PAULO VITOR SANTA ROSA SILVA

Engenheiro Sanitarista e Ambiental

Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2017

Mestre em Engenharia Civil e Ambiental

Universidade Estadual de Feira de Santana, 2020

Tese apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola (Área de Concentração: Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos).

Orientador: Dr. Tales Miler Soares.

Coorientador: Dr. Mairton Gomes da Silva.

FICHA CATALOGRÁFICA

S586p

Silva, Paulo Vitor Santa Rosa.

Procedimento para obtenção das respostas da alface à salinidade, em hidroponia e solo / Paulo Vitor Santa Rosa Silva. Cruz das Almas, BA, 2023.

155f.; il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Doutorado em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Tales Miler Soares.

Coorientador: Prof. Dr. Mairton Gomes da Silva.

1.Alface – Cultivo – Hortaliça. 2.Alface – Hidroponia.
3.Salinidade – Análise. I.Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas.
II.Título.

CDD: 635

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

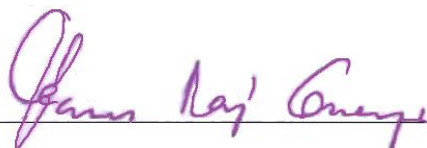
**PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DAS RESPOSTAS DA ALFACE
À SALINIDADE EM HIDROPONIA E SOLO**

Comissão examinadora da defesa de tese de Paulo
Vitor Santa Rosa Silva

Aprovado em: 19 de dezembro de 2023.



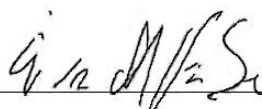
Dr. Tales Miler Soares
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)
(Orientador)



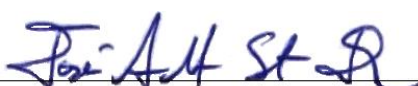
Dr. Hans Raj Gheyi
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)
(Examinador Interno)



Dr. Alexsandro Oliveira da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)
(Examinador Externo)



Dr. Ênio Farias de França e Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
(Examinador Externo)



Dr. José Amilton Santos Júnior
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
(Examinador Externo)

AGRADECIMENTOS

Agradecer primeiramente a Deus, que com suas bênçãos guiou o meu caminho e o iluminou para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço aos amores da minha vida que são meus pais, Erasmo e Ana Paula, ao meu irmão Rafael e a minha “filha pet” Laika, pelo amor incondicional, pelo apoio, paciência e por estarem ao meu lado em todos os momentos, obrigado por serem os meus pilares e sustentação. Essa vitória eu dedico a vocês, que são os protagonistas da minha vida.

Agradeço à minha esposa, Laís, pelo apoio incondicional e por toda paciência nos momentos mais difíceis.

Agradeço a todos os meus familiares, pelo apoio e união, obrigado por tudo e por me acompanharem nesta etapa.

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, o Prof. Dr. Tales Miler Soares, extraordinário tanto em termos humanos quanto profissionais. Agradeço sinceramente por todos os preciosos ensinamentos e pela confiança depositada em mim ao longo deste percurso acadêmico.

A expressão de gratidão ao meu coorientador, Dr. Mairton Gomes, é imensurável. Sua presença ao longo de toda a minha jornada acadêmica foi fundamental, orientando-me e oferecendo as mais acertadas recomendações, as quais foram imprescindíveis para o êxito da minha pesquisa.

Agradeço aos meus colegas de pesquisa, Vânio, Léo, Igor, Francisco, e Boi, vocês contribuíram de maneira significativa para o meu crescimento.

Agradeço aos estagiários Lizandra, José Augusto, Luciana, Amanda, Henrique e Lucas, que voluntariamente, conduziram os experimentos ao meu lado, com muita dedicação e apreço pelo trabalho.

A instituição UFRB e todos que a compõem.

A CAPES, pelo apoio financeiro na concessão da bolsa.

Enfim, um muito obrigado a todos que contribuíram de maneira direta ou indireta para que eu chegasse até aqui.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por guiar e abençoar minha trajetória, e aos meus pais Erasmo e Ana Paula, que sempre estiveram ao meu lado em todas as minhas lutas e sempre foram meus pilares.

“Para os crentes, Deus está no princípio das coisas. Para os cientistas, no final de toda reflexão.”

(Max Planck)

PROCEDIMENTO PARA OBTENÇÃO DAS RESPOSTAS DA ALFACE À SALINIDADE EM HIDROPONIA E SOLO

RESUMO: A escolha do sistema de cultivo deve considerar a cultura e as condições climáticas locais, evitando perdas econômicas e insucessos. Comparar sistemas como hidroponia e solo, utilizando procedimentos adequados, é crucial para avaliar as respostas das culturas à salinidade. Objetivou-se com esse trabalho propor um procedimento que permita obter as respostas produtivas e o rendimento comercial de uma cultura submetida ao estresse salino, no cultivo hidropônico e em solo, sob as mesmas condições ambientais. A pesquisa foi desenvolvida sob ambiente protegido (latitude 12°40'19" S, longitude 39°06'23" O e altitude média de 220 m). O cultivo da alface foi conduzido simultaneamente em sistema hidropônico e em solo, em duas épocas do ano (primavera e outono), ambos com delineamento experimental aleatorizados em blocos e com cinco níveis iniciais de condutividade elétrica (2,0; 3,0; 4,0; 5,0 e 6,0 dS m⁻¹) do meio de cultivo. O sistema hidropônico foi o NFT em canaletas de PVC, já o sistema em solo foi em vasos. Foram analisados o crescimento vegetativo, a produção, o teor de água nas folhas, os teores de solutos inorgânicos (Na⁺, Cl⁻ e K⁺) nos tecidos foliares, o consumo hídrico e a produtividade de água. Para avaliar a tolerância da cultura à salinidade em ambos os sistemas, foram utilizados os modelos propostos por Maas e Hoffman, Steppuhn, platô com queda exponencial e van Straten. Os resultados foram submetidos à análise de variância, mediante teste F, em nível de 0,01 ou 0,05 de probabilidade. Os experimentos realizados nas estações de primavera e outono revelaram que a salinidade teve um impacto significativamente negativo em todos os parâmetros avaliados, exceto para o teor de água nas folhas, eficiência do uso de água e a produtividade de água. No sistema hidropônico, foram observadas maiores médias na primavera, enquanto no outono, o cultivo em solo apresentou uma maior área foliar e produção de alface. Em ambas as estações, o sistema em solo demonstrou uma maior salinidade limiar, destacando-se como mais vantajoso nas condições avaliadas e no contexto da salinidade e uso de águas salobras. As simulações também evidenciaram uma maior tolerância da cultura ao considerar o efeito da temperatura e da variação de umidade ao longo do tempo em comparação com métodos tradicionais. Além disso, a redução da tensão crítica por secamento no cultivo em solo potencializou a tolerância à salinidade, indicando um aprimoramento adaptativo da cultura em condições de estresse. A consideração das práticas de manejo da fertirrigação e a influência sazonal na resposta das plantas à salinidade reforçam a complexidade dessas interações. O estudo conclui que, quando bem controlado, o cultivo em solo pode oferecer uma melhor resposta à salinidade em relação a hidroponia, ressaltando a importância de fatores como a tensão crítica na irrigação e a época de cultivo.

Palavras-chave: águas salobras, cultivo sem solo, rizosfera, contraste, condutividade elétrica do meio de cultivo.

PROCEDURE FOR OBTAINING RESPONSES OF LETTUCE TO SALINITY IN HYDROPONICS AND SOIL

ABSTRACT: The choice of cultivation system should consider the crop and local climatic conditions, avoiding economic losses and failures. Comparing systems such as hydroponics and soil, using appropriate procedures, is crucial to evaluate crop responses to salinity. The aim of this work was to propose a procedure that allows obtaining productive responses and commercial yield of a crop subjected to saline stress, in hydroponic and soil cultivation, under the same environmental conditions. The research was conducted under protected environment (latitude 12°40'19" S, longitude 39°06'23" W, and average altitude of 220 m). Lettuce cultivation was simultaneously conducted in hydroponic and soil systems, during two seasons of the year (spring and autumn), both with randomized block experimental design and five initial levels of electrical conductivity (2.0; 3.0; 4.0; 5.0; and 6.0 dS m⁻¹) of the growing medium. The hydroponic system used was NFT in PVC channels, while the soil system was in pots. Vegetative growth, production, leaf water content, inorganic solute contents (Na⁺, Cl⁻, and K⁺) in leaf tissues, water consumption, and water productivity were analyzed. To assess crop tolerance to salinity in both systems, models proposed by Maas and Hoffman, Steppuhn, plateau with exponential decline, and van Straten were used. The results were subjected to analysis of variance, using the F test, at a level of 0.01 or 0.05 probability. Experiments conducted in spring and autumn seasons revealed that salinity had a significantly negative impact on all evaluated parameters, except for leaf water content, water use efficiency, and water productivity. In the hydroponic system, higher means were observed in spring, while in autumn, soil cultivation showed greater leaf area and lettuce production. In both seasons, the soil system demonstrated a higher threshold salinity, standing out as more advantageous under the evaluated conditions and within the context of salinity and the use of brackish waters. Simulations also showed greater crop tolerance when considering the effect of temperature and humidity variation over time compared to traditional methods. Furthermore, the reduction of critical drying tension in soil cultivation enhanced salinity tolerance, indicating an adaptive improvement of the crop under stress conditions. Considering fertigation management practices and seasonal influence on plant response to salinity reinforces the complexity of these interactions. The study concludes that, when well controlled, soil cultivation may offer a better response to salinity compared to hydroponics, highlighting the importance of factors such as critical irrigation tension and cultivation season.

Keywords: brackish waters, soilless cultivation, rhizosphere, contrast, electrical conductivity of the growing medium.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fator de correção para obtenção da condutividade elétrica à 25°C, em função da temperatura observada (Adaptado de RICHARDS, 1954).	46
Figura 2. Curva de calibração do piranômetro utilizado nos experimentos.	50
Figura 3. Oscilação da temperatura do ar (A), umidade relativa do ar (B) e radiação solar (C) do experimento de primavera, e registro das oscilações de temperatura do ar (D), umidade relativa do ar (E) e radiação solar (F) do experimento de outono, no interior da casa de vegetação.	51
Figura 4. Layout do delineamento experimental.	52
Figura 5. Relação da condutividade elétrica desejada da água com a concentração de cloreto de sódio (NaCl) a adicionar, por volume de água.	53
Figura 6. Relação entre a concentração de sais e a condutividade elétrica do solo na capacidade de campo (A) e a relação entre a condutividade elétrica esperada e a CE observada após a adição dos sais (B).	57
Figura 7. Visão geral da casa de vegetação com as unidades hidropônicas, no experimento de primavera (A) e outono (B).	58
Figura 8. Curva característica de retenção da água do solo do experimento.	61
Figura 9. Visão geral da casa de vegetação (A) com as unidades do cultivo em solo e do gotejador autocompensante utilizado (B), no experimento de primavera.	61
Figura 10. Visão geral da casa de vegetação com as unidades do cultivo em solo, no experimento de outono.	62
Figura 11. Modelo de van Genuchten com linhas tangentes ao ponto de inflexão e ao ponto de murcha permanente, para identificação da interseção (capacidade de campo) (Adaptado de LIANG et al., 2016).	64
Figura 12. Sensor capacitivo da umidade do solo sem revestimento (A) e o sensor com revestimento epóxi (B) usado para o experimento da primavera.	66
Figura 13. Curva de calibração de um dos sensores capacitivos de umidade do solo utilizado no solo do experimento da primavera.	67
Figura 14. Sondas artesanais utilizadas no experimento de outono.	68
Figura 15. Curva de calibração de uma das sondas utilizadas para obtenção do conteúdo volumétrico de água estimado, em função da constante dielétrica medida pela TDR100.	69
Figura 16. Variação dos valores de pH da solução nutritiva do sistema hidropônico (A) e da solução do solo (B) durante o experimento de primavera e do pH da solução nutritiva do sistema hidropônico (C) e da solução do solo (D) durante o experimento de outono, ao longo dos ciclos da alface, em função das condutividades elétricas dos tratamentos.	83
Figura 17. Comportamento da variação de temperatura da solução nutritiva (A) e da rizosfera (B) ao longo do experimento de primavera, e oscilação da temperatura da solução nutritiva (C) e da rizosfera (D) no experimento de outono.	84

Figura 18. Valores da condutividade elétrica da solução nutritiva (CE_{sol}) da hidroponia, compensados para 25°C, durante o experimento de primavera com a alface.	86
Figura 19. Valores estimados de condutividade elétrica da solução nutritiva (CE_{sol}) da hidroponia, com descompensação de temperatura no experimento de primavera. ..	87
Figura 20. Valores de condutividade elétrica da solução do solo na capacidade de campo (CE_{cc}), compensados para 25°C, ao longo do experimento de primavera. ...	88
Figura 21. Oscilação da umidade do solo e da condutividade elétrica da rizosfera, com descompensação de temperatura, ao longo do ciclo da alface no experimento de primavera.	89
Figura 22. Valores da condutividade elétrica da solução nutritiva (CE_{sol}) da hidroponia, compensados para 25°C, durante o experimento de outono com a alface.	91
Figura 23. Valores estimados de condutividade elétrica da solução nutritiva (CE_{sol}) da hidroponia, com descompensação de temperatura ao longo do experimento de outono.	92
Figura 24. Valores de condutividade elétrica da solução do solo na capacidade de campo (CE_{cc}), compensados para 25°C, ao longo do experimento de outono.	92
Figura 25. Oscilação da umidade do solo e da condutividade elétrica da rizosfera, com descompensação de temperatura, ao longo do ciclo da alface no experimento de outono.	93
Figura 26. Sintomas de clorose e necrose nas bordas foliares da alface, no cultivo hidropônico de primavera, aos 5 dias após o transplântio, sob condutividade elétrica média ponderada da solução nutritiva de 5,26 dS m ⁻¹ (A) e 6,37 dS m ⁻¹ (B).	95
Figura 27. Sintomas de clorose e necrose nas bordas foliares da alface, no cultivo hidropônico de outono, aos 8 dias após o transplântio, sob nível mais alto de salinidade (6,14 dS m ⁻¹) da solução nutritiva.....	96
Figura 28. Sintomas de clorose e necrose nas bordas foliares da alface, no cultivo em solo da primavera, aos 12 dias após o transplântio, sob condutividade elétrica ponderada da rizosfera de 5,65 dS m ⁻¹ (A) e 7,64 dS m ⁻¹ (B).	97
Figura 29. Aspecto geral da planta de alface cultivada em solo, no experimento de primavera, com o tratamento mais salino (7,64 dS m ⁻¹), aos 20 dias após o transplântio.....	97
Figura 30. Sintomas de clorose e necrose nas bordas foliares da alface, no cultivo em solo, no período de outono, aos 10 dias após o transplântio, sob nível mais alto de salinidade (6,26 dS m ⁻¹) da rizosfera.....	98
Figura 31. Aspecto visual da alface, aos 25 dias após o transplântio, no experimento de primavera, cultivada em sistema hidropônico (A) e em solo (B), submetida a níveis crescentes de condutividade elétrica do meio de cultivo.....	99
Figura 32. Aspecto visual da alface, aos 25 dias após o transplântio, no experimento de outono, cultivada em sistema hidropônico (A) e em solo (B), submetida a níveis crescentes de condutividade elétrica do meio de cultivo.....	100
Figura 33. A - Altura de planta (AP), B - diâmetro do caule (DC), C - número de folhas (NF), e D - área foliar (AF) das plantas de alface cultivadas no experimento de primavera, e E - Altura de planta (AP), F - diâmetro do caule (DC), G - número de folhas (NF), e H - área foliar (AF) das plantas de alface cultivadas no experimento de	

outono, em sistema hidropônico NFT e em solo, sob diferentes níveis de condutividade elétrica do meio de cultivo. 103

Figura 34. A - Massa de matéria fresca da parte aérea (MFPA), B – massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) e C – teor de água (TA) das plantas de alface cultivadas no experimento de primavera, e D - massa de matéria fresca da parte aérea (MFPA), E – massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) e F – teor de água (TA) das plantas de alface cultivadas no experimento de outono, em hidroponia e solo, sob diferentes níveis de condutividade elétrica do meio de cultivo..... 109

Figura 35. A - Consumo hídrico (CH) e volume evapotranspirado (V_{ET}) e B – eficiência do uso de água (EUA) e produtividade de água (PA) das plantas de alface cultivadas no experimento de primavera, e C - consumo hídrico (CH) e volume evapotranspirado (V_{ET}) e D - eficiência do uso de água (EUA) e produtividade de água (PA) das plantas de alface cultivadas no experimento de outono, em hidroponia e em solo, sob diferentes níveis de condutividade elétrica do meio de cultivo. 114

Figura 36. Consumo hídrico acumulado (A) e volume evapotranspirado acumulado (B), por planta de alface cultivada na primavera, e consumo hídrico acumulado (C) e volume evapotranspirado acumulado (D), por planta de alface cultivada no outono, em hidroponia e em solo, ao longo dos 25 dias após o transplântio, sob diferentes níveis de condutividade elétrica do meio de cultivo. 116

Figura 37. A – Concentração foliar de sódio (Na^+), B - potássio (K^+) e C - cloreto (Cl^-) da alface cultivada na primavera, e D – concentração foliar de sódio (Na^+), E - potássio (K^+) e F - cloreto (Cl^-) da alface cultivada no outono, em hidroponia e em solo, em função da condutividade elétrica do meio de cultivo. 120

Figura 38. Salinidade limiar da cultura da alface durante o experimento de primavera, ajustados para os modelos de Maas e Hoffman (A), platô com queda exponencial (B) e Steppuhn (C) para o sistema hidropônico, e ajuste dos modelos de Maas e Hoffman (D), platô com queda exponencial (E) e Steppuhn (F) para o sistema em solo, em função da produtividade relativa e da condutividade elétrica do meio de cultivo. ... 123

Figura 39. Salinidade limiar da cultura da alface durante o experimento de outono, ajustados para os modelos de Maas e Hoffman (A), platô com queda exponencial (B) e Steppuhn (C) para o sistema hidropônico, e ajuste dos modelos de Maas e Hoffman (D), platô com queda exponencial (E) e Steppuhn (F) para o sistema em solo, em função da produtividade relativa e da condutividade elétrica do meio de cultivo. ... 124

Figura 40. Salinidade limiar da cultura da alface durante o experimento de primavera, ajustados para os modelos de van Straten (A – Maas e Hoffman modificado e B – van Genuchten e Hoffman modificado) para o sistema hidropônico, e ajuste dos modelos de van Straten (C – Maas e Hoffman modificado e D – van Genuchten e Hoffman modificado) para o sistema em solo, em função da produtividade relativa e da condutividade elétrica do meio de cultivo. 128

Figura 41. Salinidade limiar da cultura da alface durante o experimento de outono, ajustados para os modelos de van Straten (A – Maas e Hoffman modificado e B – van Genuchten e Hoffman modificado) para o sistema hidropônico, e ajuste dos modelos de van Straten (C – Maas e Hoffman modificado e D – van Genuchten e Hoffman modificado) para o sistema em solo, em função da produtividade relativa e da condutividade elétrica do meio de cultivo. 129

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantidade de fertilizantes para o preparo de 1 m ³ de solução nutritiva para o cultivo hidropônico de hortaliças, com as respectivas concentrações esperadas de nutrientes (FURLANI, 1998).....	54
Tabela 2. Características físicas do solo utilizado no experimento.....	59
Tabela 3. Características químicas do solo utilizado no experimento, antes e após calagem.....	59
Tabela 4. Recomendação mineral de plantio para a cultura da alface (ALVAREZ; RIBEIRO, 1999).	59
Tabela 5. Parâmetros hidráulicos e da curva de retenção do solo utilizado no experimento.....	60
Tabela 6. Variação percentual da condutividade elétrica do meio de cultivo (D_t) do início ao final do experimento, salinidade média ponderada no tempo (CE_{solp} e CE_p) e variação percentual entre a salinidade inicial e a ponderada (D_p), com descompensação de temperatura, em função dos tratamentos aplicados na cultura alface, no sistema hidropônico e em solo, durante o experimento de primavera e outono.	94
Tabela 7. Resumo da análise de variância para a altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF) e área foliar (AF) das plantas de alface, em hidroponia e em solo, nos experimentos de primavera e outono, em função da condutividade elétrica do meio de cultivo.	102
Tabela 8. Diferença percentual do parâmetro estimado entre o tratamento controle e o nível salino mais alto, para altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF) e área foliar (AF) da cultura da alface, para os experimentos de primavera e outono.	104
Tabela 9. Resumo da análise de variância para a massa de matéria fresca (MFPA) e seca (MSPA) da parte aérea e do teor de água (TA) das plantas de alface, em hidroponia e em solo, nos experimentos de primavera e outono, em função da condutividade elétrica do meio de cultivo.	108
Tabela 10. Diferença percentual do parâmetro estimado entre o tratamento controle e o nível salino mais alto, para massa de matéria fresca (MFPA) e seca (MSPA) da parte aérea da cultura da alface, para os experimentos de primavera e outono.	110
Tabela 11. Resumo da análise de variância para o consumo hídrico (CH), volume evapotranspirado (V_{ET}), eficiência do uso de água (EUA) e produtividade de água (PA) das plantas de alface, em hidroponia e em solo, nos experimentos de primavera e outono, em função da condutividade elétrica do meio de cultivo.	113
Tabela 12. Resumo da análise de variância da concentração de sódio (Na^+), potássio (K^+) e cloreto (Cl^-) nas folhas de alface, cultivadas nos experimentos de primavera e outono, em hidroponia e em solo, em função da condutividade elétrica do meio de cultivo.	119
Tabela 13. Valores de salinidade limiar e redução percentual da alface, obtidos para a hidroponia nos experimentos de primavera e outono, considerando a tolerância real	

e os valores simulados, ajustados para os modelos de Maas e Hoffman, Steppuhn, platô com queda exponencial, van Straten (MH_m e vGH_m). 132

Tabela 14. Valores de salinidade limiar e redução percentual da alface, obtidos para o sistema em solo na primavera e outono, considerando a tolerância real e os valores simulados, ajustados para os modelos de Maas e Hoffman, Steppuhn, platô com queda exponencial, van Straten (MH_m e vGH_m). 133

Tabela 15. Valores das diferenças entre a tolerância real e simulada, para o sistema em solo nos experimentos de primavera e outono, obtidos pelos modelos de Maas e Hoffman, Steppuhn, platô com queda exponencial, van Straten (MH_m e vGH_m). 134

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CE	Condutividade elétrica
CH	Consumo hídrico
CTC	Capacidade de troca de cátions
CV	Coeficiente de variação
DC	Diâmetro do caule
DN	Diâmetro nominal
EUA	Eficiência do uso de água
exp	Exponencial
FL	Fração de lixiviação
FV	Fonte de variação
GL	Grau de liberdade
MAP	Fosfato monoamônico
MFPA	Massa de matéria fresca da parte aérea
MO	Matéria orgânica
MQO	Mínimos quadrados ordinários
MSPA	Massa de matéria seca da parte aérea
NEAS	Núcleo de Engenharia de Água e Solo
NF	Número de folhas
NFT	<i>Nutrient film technique</i>
NI	Necessidade de irrigação
PA	Produtividade de água no solo
PELBD	Polietileno linear de baixa densidade
pH	Potencial hidrogeniônico
PPGEA	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
PVC	Policloreto de vinila
RP	Redução percentual
SB	Soma de bases
SDT	Sólidos dissolvidos totais
SH	Simulação hidroponia
SL	Salinidade limiar
SN	Solução nutritiva
SS	Simulação solo

TA	Teor de água nas folhas
TDR	<i>Time domain reflectometry</i>
UFRB	Universidade Federal do Recôncavo da Bahia

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Parâmetro empírico da curva de retenção de água no solo
α_i	Redução linear relativa da variável i por acréscimo unitário da CE
$\Delta\theta$	Variação da umidade do solo
ΔCE	Variação da condutividade elétrica
ΔT	Intervalo de tempo
ε	Porosidade total do solo
θ	Umidade volumétrica do solo
θ_c	Umidade crítica do solo
θ_{cc}	Umidade do solo a capacidade de campo
θ_{inf}	Umidade do solo no ponto de inflexão
θ_{pmp}	Umidade no ponto de murcha permanente
θ_{RES}	Umidade residual
θ_{SAT}	Umidade do solo saturado
λ	Parâmetro hidráulico empírico
Ψ_{cc}	Tensão da água no solo na capacidade de campo
Ψ_{inf}	Tensão da água no solo no ponto de inflexão
Ψ_m	Potencial matricial do solo
Ψ_{os}	Potencial osmótico
Ψ_{pmp}	Tensão da água no solo no ponto de murcha permanente
Ψ_T	Potencial de total
Ψ_{TE}	Potencial de temperatura
Al	Alumínio
b	Diminuição do rendimento por aumento unitário
C	Concentração de soluto
C_1	Concentração de sais na solução a ser preparada
C_2	Concentração de sais na solução padrão
Ca^{2+}	Cálcio
$CaCl_2$	Cloreto de cálcio
CE_{50}	Nível de salinidade correspondente a 50% do rendimento
CE_{90}	Nível de salinidade correspondente a 90% do rendimento
CE_a	Condutividade elétrica da água
CE_{ap}	Condutividade elétrica aparente

CE_c	Condutividade elétrica na umidade crítica
CE_{cc}	Condutividade elétrica na capacidade de campo
CE_{es}	Condutividade elétrica do extrato de saturação
CE_{real}	Condutividade elétrica real
CE_s	Condutividade elétrica da solução
CE_{sol}	Condutividade elétrica da solução nutritiva
CE_{soli}	Condutividade elétrica inicial da solução nutritiva
CE_{solp}	Condutividade elétrica ponderada da solução nutritiva
C_f	Concentração final de sais na solução
C_s	Concentração de sais
CE_{25}	Condutividade elétrica a 25°C
CE_a	Condutividade elétrica atual do solo
CE_c	Condutividade elétrica de correção para se atingir a CE_{esd}
CE_{esd}	Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo desejada
CE_i	Condutividade elétrica da solução na i-ésima leitura
$CE_{inicial}$	Média da salinidade medida ao início do ciclo
CE_{final}	Média da salinidade medida ao final do ciclo
CE_{nn}	Condutividade elétrica associada ao rendimento desejado
CE_o	Menor valor da condutividade elétrica da solução nutritiva
CE_p	Média ponderada da salinidade
C_i	Concentração de sais, com base na curva de salinização
Cl^-	Cloreto
CO_2	Dióxido de carbono
D	Diâmetro interno do reservatório
D_t	Variação percentual da salinidade
d_p	Densidade de partículas
D_p	Afastamento entre as salinidades médias ponderadas e inicial
d_s	Densidade do solo
E_a	Eficiência de aplicação
ET_o	Evapotranspiração de referência
f	Fator de disponibilidade de água no solo
f_{nn}	Constante do modelo de tolerância à salinidade de van Straten
F_i	Fator de correção para uma dada temperatura
g_{nn}	Constante do modelo de tolerância à salinidade de van Straten

H + Al	Acidez potencial
i	Número de leituras
k	Constante expressa na unidade inversa a da CE_{sol}
K	Potássio
K ₂ O	Óxido de potássio
K _a	Constante dielétrica
K _s	Condutividade hidráulica saturada do solo
L _e	Leitura do sensor capacitivo
L _f	Leitura final do nível da água no reservatório
L _i	Leitura inicial do nível da água no reservatório
m	Coeficiente angular da equação ajustada para a variável i
m	Parâmetro empírico da curva de retenção de água no solo
Mg ²⁺	Magnésio
MH _m	Modelo de Maas e Hoffman modificado
n	Número de plantas no perfil no intervalo de tempo ΔT
n	Parâmetro empírico da curva de retenção de água no solo
nn	Porcentagem desejada do rendimento
Na ⁺	Sódio
NaCl	Cloreto de sódio
p	Constante empírica do modelo de van Genuchten e Hoffman
P	Fósforo
P ₁	Massa atual do conjunto tubo-solo-sonda-tela
P ₂	Massa seca do conjunto tubo-solo-sonda-tela
P ₂ O ₅	Pentóxido de difósforo
q	Coeficiente linear da equação ajustada para a variável i
q _i	Vazão do gotejador
®	Marca registrada
R	Constante universal dos gases
S	Diminuição do rendimento por aumento unitário da CE_{sol}
S _{inf}	Inclinação da reta tangente no ponto de inflexão
S _{pmp}	Inclinação da reta tangente no ponto de murcha permanente
ST-Index	Índice de tolerância à salinidade
T	Temperatura
Ti	Tempo de irrigação

U_{cc}	Umidade do solo a base de peso na capacidade de campo
U_s	Umidade a base de peso na correção da pasta saturada
V	Saturação por bases
V_1	100 mL da solução a ser preparada
V_2	Volume necessário, em mL, da solução padrão
V_a	Volume atual de água armazenado no solo
V_a	Volume de água presente no solo na saturação
$V_{\text{água}}$	Volume de água a adicionar para o preparo de 100 mL de solução
V_{cc}	Volume de água armazenado no solo a capacidade de campo
V_{ET}	Volume evapotranspirado
vGH_m	Modelo de van Genuchten e Hoffman modificado
V_r	Volume de água no solo para se atingir a capacidade de campo
V_s	Volume de solo no vaso
Y_i	Valor inferior da produtividade relativa (platô inferior)
Y_l	Valor médio da produtividade relativa até a CE_L (platô superior)
Y_r	Produtividade relativa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. HIPÓTESES	28
3. OBJETIVO	29
3.1 Objetivo geral	29
3.2 Objetivos específicos	29
4. REVISÃO DE LITERATURA	30
4.1 Características e usos das águas salobras em regiões semiáridas	30
4.2 Efeitos dos sais nas plantas	31
4.3 Cultivo hidropônico	34
4.4 Tolerância das culturas à salinidade	36
4.5 Estudos comparando o cultivo hidropônico com o solo	38
4.6 Principais parâmetros dos cultivos hidropônico e do solo em meio salino	39
4.6.1 Capacidade de tamponamento	39
4.6.2 Umidade do solo	40
4.6.3 Condutividade elétrica	41
4.6.4 Potencial da água	44
4.6.5 Temperatura	45
4.7 Cultura da alface	46
5. MATERIAL E MÉTODOS	49
5.1 Localização e descrição da área experimental	49
5.2 Monitoramento das condições ambientais na casa de vegetação	49
5.3 Delineamento experimental e tratamentos	51
5.4 Caracterização dos sistemas de cultivo	57
5.5 Condução da cultura	62
5.6 Tratos culturais	63
5.7 Manejo da fertirrigação	63
5.8 Avaliação da uniformidade de distribuição dos sistemas de irrigação	70
5.9 Manejo e monitoramento da CE, pH e temperatura do meio de cultivo	71
5.10 Controle da salinidade nos sistemas	73
5.11 Análise visual de sintomas	74
5.12 Análises biométricas da planta	74
5.12.1 Crescimento vegetativo	74
5.12.2 Variáveis de produção	75

5.13	Teor de água nas folhas.....	76
5.14	Consumo hídrico e volume evapotranspirado	76
5.15	Eficiência do uso de água e produtividade de água.....	76
5.16	Análise de solutos inorgânicos.....	77
5.17	Tolerância da cultura à salinidade.....	77
5.17.1	Modelo de Maas e Hoffman	78
5.17.2	Modelo de Steppuhn	78
5.17.3	Modelo de platô com queda exponencial	79
5.17.4	Modelo de van Straten	79
5.17.5	Ajustes dos dados para os modelos de tolerância à salinidade	80
5.17.6	Simulação da tolerância à salinidade em diferentes abordagens.....	80
5.18	Análise estatística	81
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
6.1	pH, temperatura e condutividade elétrica do meio de cultivo	83
6.2	Aspecto visual	94
6.3	Crescimento vegetativo.....	101
6.4	Produção e teor de água nas folhas	107
6.5	Consumo hídrico, volume evapotranspirado, eficiência do uso de água e produtividade de água	113
6.6	Solutos inorgânicos.....	118
6.7	Tolerância à salinidade	122
6.7.1	Simulações da tolerância à salinidade.....	132
7.	CONCLUSÕES.....	136
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	138

1. INTRODUÇÃO

Mesmo após décadas de avanços na ciência, nos sistemas de produção agrícola, no manejo da água no solo, no melhoramento genético das plantas e nas práticas fitossanitárias, os valores de salinidade limiar encontrados na literatura especializada quase sempre se baseiam nos celebrados trabalhos de Maas e Hooffman (1977) e sua respectiva classificação da tolerância baseada em Maas (1984). No entanto, os trabalhos de Maas e Hoffman (1977) são uma compilação de estudos de diferentes autores, com pesquisas realizadas em diferentes condições de contorno até a década de 70 no século XX. Tomando como exemplo a alface (*Lactuca sativa* L.), os valores encontrados em Maas e Hoffman (1977) são uma compilação de três estudos, quais sejam: Ayers *et al.* (1951), Osawa (1965) e Bernstein *et al.* (1974).

Logo, no caso particular da alface, o uso desses valores de salinidade limiar podem superestimar ou subestimar a produtividade, já que Ayers *et al.* (1951), Bernstein *et al.* (1974) e Osawa (1965) trabalharam com a alface em condições específicas de solo e clima (céu aberto em campo na Califórnia, Estados Unidos), com a irrigação (aspersão ou superfície) sendo realizada sempre que o canteiro e o leito dos sulcos estavam secos.

Ao se excluir as condições edafoclimáticas, a tolerância das culturas à salinidade pode ser redefinida, aumentando o nível de tolerância para algumas e diminuindo para outras. Portanto, observa-se que as informações sobre a tolerância relativa entre as diferentes culturas devem ser tomadas com cautela no planejamento agrícola, quando baseados nos valores de Maas e Hoffman (1977) (SOARES, 2007).

Maas e Hoffman (1977) obtiveram os valores de salinidade limiar pela condutividade elétrica no extrato de saturação do solo, sendo determinados desde o estágio inicial de desenvolvimento da cultura até sua maturação (AYERS; WESTCOT, 1999). Tomando como base esses valores, ao se indicar que a salinidade limiar da alface é de $1,3 \text{ dS m}^{-1}$, os autores informam que se mantendo uma salinidade do solo equivalente à condutividade elétrica no extrato de saturação até $1,3 \text{ dS m}^{-1}$ a cultura não sofrerá depreciação na produção, e a partir desse valor haverá perdas produtivas. Esses valores foram obtidos irrigando-se o solo até se atingir essa salinidade, ou seja, uma salinização gradativa e não constante.

A aplicação gradual de águas salobras, aumentando progressivamente a salinidade até se atingir a concentração final desejada, ou seja, uma salinização gradativa e não constante, é o ideal para se obter a salinidade limiar de uma cultura e expressar sua tolerância à salinidade? Segundo Soares *et al.* (2016a), o processo de incrementar a concentração da água salobra é uma forma de aclimatação das plantas, evitando o choque osmótico, porém, tal processo pode extrapolar e levar a uma maior tolerância à salinidade. Tomando como exemplificação a cultura da alface, no tratamento mais salino (9.550 mg L^{-1}) utilizado por Ayers *et al.* (1951), foram gastos cerca de 12 dias até atingir esse valor, já que informam terem usado incrementos de 3.000 mg L^{-1} em intervalos de quatro dias, e como a cultura geralmente possui um ciclo curto (30 dias), esse processo representa um tempo considerável para tolerância da cultura.

Além disso, os valores de salinidade limiar expostos por Maas e Hoffman (1977) foram expressos com base na condutividade elétrica no extrato de saturação, sendo que o mesmo não representa as condições reais da salinidade na rizosfera, uma vez que, nas condições de cultivo, o solo não é mantido na condição de saturação, e sim, idealmente, na capacidade de campo, sendo que na saturação o grau de diluição dos sais é superior ao da umidade na capacidade de campo.

A metodologia utilizada para obtenção da condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{es}) é a proposta por Richards (1954), sendo tomada de forma arbitrária por critérios subjetivos, tais como: adiciona-se água na amostra de solo considerando-se que o ponto ideal da pasta seja quando a mesma desliza lentamente sobre a espátula inclinada, deixando-a limpa e apresentando superfície brilhosa.

Uma recomendação conveniente para trabalhos com salinidade seria padronizar a condutividade elétrica do extrato de saturação a partir da umidade na saturação, ou seja, a quantidade de água a ser adicionada sobre um volume de solo, para obtenção do extrato saturado, deve ser o equivalente a porcentagem da porosidade total daquele solo, garantindo que todos os poros estejam preenchidos com água.

Vale ressaltar que a condutividade elétrica no extrato de saturação do solo pode ser mantida em diferentes valores de condutividade elétrica à umidade atual em várias disponibilidades hídricas do solo. Por exemplo, em diferentes manejos da irrigação, turnos de rega e tensões críticas do solo, pode-se obter distintos valores de

condutividade elétrica da solução do solo ao longo do tempo, apesar de poder representar um mesmo valor de condutividade elétrica no extrato de saturação.

Devido a esses motivos, diferentes valores de salinidade limiar podem ser obtidos para uma mesma cultura quando se variam as condições de manejo da água. Isso porque o efeito final mensurado abrange o efeito osmótico ocasionado pelos diferentes teores de água no solo, bem como o potencial matricial, dentre outros fatores que associam a umidade com a fertilidade do solo ao longo do ciclo. Logo, para se utilizar um valor de salinidade limiar para uma determinada cultura, deve-se garantir que as condições de contorno utilizadas para sua determinação devem ser semelhantes às aplicadas na prática (SOARES, 2007).

Considerando que a tolerância de uma cultura à salinidade pode variar dependendo do sistema de irrigação no solo, é razoável inferir que essa diferença também pode se manifestar no cultivo hidropônico, quando comparado com o cultivo tradicional em solo. Além disso, cultivos em ambiente protegido podem levar a valores de tolerância à salinidade diferentes de cultivos a céu aberto, especialmente pela redução da demanda evaporativa, que condiciona o nível de água livre no meio de cultivo.

A curva característica que relaciona o rendimento relativo com a salinidade do meio tende a apresentar uma maior tolerância das culturas à salinidade nos sistemas hidropônicos. Porém, tal análise só pode ser válida se em ambos os sistemas de produção forem empregados as mesmas condições de contorno e de tempo, ou seja, concomitantemente, o que não é encontrado na literatura especializada experimentos com águas salobras conduzidos desta forma.

Quando se contrasta o comportamento das culturas em sistema de cultivo em solo com o hidropônico, surge uma grande dificuldade técnica em se comparar essas respostas fisiológicas ao estresse salino em sistemas de cultivos tão distintos, tornando-se difícil para o usuário que detém os resultados científicos extrapolar dados da hidroponia para o solo e do solo para hidroponia.

Na tomada de decisão para implantação de empreendimentos agrícolas, em estudos de viabilidade econômica, a qualidade e atualidade da informação são fundamentais. Dever-se-á recorrer à análise de pesquisas distintas para se obter respostas fisiológicas de uma determinada cultura submetida ao estresse salino, de

forma a se evitar modelagens equivocadas de cenários otimistas na escolha e implantação de projetos (sistema hidropônico ou em solo), que podem levar ao insucesso.

Para fins metodológicos e de aplicação científica, para comparação dos sistemas hidropônicos e em solo, necessita-se padronizar os seguintes parâmetros de ambos os sistemas de cultivo: capacidade de tamponamento, umidade, condutividade elétrica, potencial da água e temperatura.

Na irrigação com águas salobras, a hipótese básica de que as respostas das culturas na hidroponia proporcionem melhor rendimento que no solo dependem da metodologia aplicada na pesquisa, devendo a salinidade do solo comparado estar equilibrada com seu poder tampão. Do contrário, pode ocorrer supressão da salinidade devido a neutralização de íons, promovendo uma melhor resposta das plantas à salinidade do solo quando comparado com a hidroponia. Logo, para evitar subestimativas ou superestimativas na comparação das respostas das culturas, somente seriam válidos estudos com a prévia correção dos solos (saturação do complexo catiônico por calagem e adubação de base), como é recomendado pelos princípios básicos da fertirrigação, tornando equivalente os níveis de fertilidade da hidroponia e do solo (SOARES *et al.*, 2016a).

No solo a planta experimenta as oscilações físico-químicas em sua rizosfera. Então, partindo-se de uma condição ideal de umidade, ou seja, a capacidade de campo, à medida que o solo seca, a condutividade elétrica aumenta proporcionalmente com o aumento da demanda evapotranspirativa e com o tempo até a próxima chuva ou irrigação. Logo, a condutividade elétrica ótima estaria associada a umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), enquanto a condutividade elétrica máxima experimentada pela cultura na rizosfera seria associada a umidade crítica (θ_c). Portanto, a máxima salinidade de um solo tolerada por uma cultura deveria estar associada a θ_c e não a θ_{cc} e nem a umidade na saturação (θ_{sat}).

Então, se o interesse de um estudo for comparar o cultivo tradicional em solo versus o cultivo hidropônico, não se deve utilizar a CE_{es} do solo para contrastar com a condutividade elétrica da solução nutritiva (CE_{sol}), pois, como argumentado anteriormente, a CE_{es} não representa as condições reais de salinidade na rizosfera durante o cultivo.

A condutividade elétrica real (CE_{real}) experimentada pelo sistema radicular de uma cultura em sistemas irrigados é a CE variável entre a θ_{cc} e a θ_c . Já a CE_{real} em cultivos hidropônicos seria a CE relativamente constante da solução nutritiva (CE_{sol}). Então, para se comparar de forma direta respostas fisiológicas à salinidade em hidroponia e solo, o mais adequado seria comparar CE_{sol} da hidroponia com a CE_{real} ($\Delta\theta$; umidade na capacidade de campo|umidade crítica) do solo, ambos associados às variações de temperatura ao longo do tempo.

Evidentemente que a salinidade limiar de uma cultura na hidroponia será maior ou igual à condutividade elétrica equivalente aos nutrientes na mínima concentração que promova o máximo desenvolvimento vegetativo. Considerando a solução nutritiva proposta por Furlani *et al.* (1998), por exemplo, obter-se-á uma salinidade mínima de $2,0 \text{ dS m}^{-1}$ para hortaliças folhosas em cultivos hidropônicos, uma vez que esse valor representa a salinidade mínima para proporcionar o desenvolvimento da cultura (SOARES, 2007). Logo, para comparar a resposta das culturas à salinidade em cultivo hidropônico e em solo, o solo deve ser previamente corrigido, e a mínima salinidade do solo na capacidade de campo ocasionada pelos nutrientes deve ser aquela que garanta uma concentração de nutrientes mínima e adequada a máxima produção.

Para comparar dados de estudos sobre tolerância à salinidade, nas análises estatísticas o ideal é que a variável independente (salinidade; CE) tenha variações mínimas ao longo do tempo, garantindo a precisão e qualidade da regressão. Rhoades (1972) definiu o conceito de salinidade média integrada da solução do solo, ao longo do ciclo de irrigação, para considerar as variações da salinidade ao longo do tempo.

Logo, o conveniente seria utilizar a salinidade do meio de cultivo (CE_{real}) ponderada ao longo do tempo em uma profundidade (ROBINET *et al.*, 2018), além de integrar o efeito da variação de umidade sobre a condutividade elétrica. Na hidroponia, a CE_{real} seria equivalente a condutividade elétrica da solução nutritiva (CE_{sol}) ponderada no tempo.

Então, havendo disponibilidade de dados da condutividade elétrica e da umidade atual no solo, a CE_{sol} da hidroponia deve ser comparada com a CE_{real} do solo (ΔCE ; CE da umidade na capacidade de campo|CE na umidade crítica) ponderada no tempo.

Porém, na ausência de dados da condutividade elétrica da solução do solo e umidade ao longo do tempo, uma opção seria estimar a CE_{real} pela média da CE_{cc} com a CE_c , ambas com o mesmo fator de ponderação.

Para esses casos, pode-se assumir a aplicação da equação clássica de diluição, considerando-se também que haja linearidade na resposta da condutividade elétrica relacionada a concentração e volume de água, no intervalo entre a θ_{cc} e a θ_c . Logo, considerando que o volume da solução do solo seja o produto do volume do solo pela umidade volumétrica e que a condutividade elétrica representa a concentração, pode-se considerar que o produto da umidade do solo na capacidade de campo pela condutividade elétrica na capacidade de campo é equivalente ao produto da umidade crítica pela condutividade elétrica do solo no limite crítico.

Considerando-se uma mínima salinidade para proporcionar o desenvolvimento de uma hortaliça folhosa na hidroponia, com uma solução nutritiva de condutividade elétrica de aproximadamente 2 dS m^{-1} (FURLANI, 1998), por exemplo, esse sistema torna-se comparável com o solo, desde que, o solo seja corrigido para superar o poder tampão do mesmo e apresente uma CE_{cc} de 2 dS m^{-1} , garantindo que todos os nutrientes incrementados pela fertirrigação da solução nutritiva recomendada por Furlani (1998) estejam disponíveis para a cultura.

Porém, vale ressaltar que, apesar de aplicadas soluções de mesma condutividade elétrica em ambos sistemas de cultivo, os potenciais da água nos sistemas não serão equivalentes devido às particularidades intrínsecas de cada sistema.

Ainda tomando como exemplo a solução nutritiva recomendada por Furlani (1998) para hortaliças folhosas, na hidroponia o potencial da água seria igual a aproximadamente 72 kPa . Já em um solo com Ψ_m na capacidade de campo equivalente a aproximadamente 10 kPa , por exemplo, o potencial da água nesse sistema corresponderá a aproximadamente 82 kPa .

Apesar de apresentarem potenciais diferentes, as respostas das culturas em ambos sistemas de cultivo são comparáveis, uma vez que ambos foram submetidos a mesma condição, ou seja, a mesma água de irrigação ($CE \approx 2 \text{ dS m}^{-1}$) e mesmas condições ambientais. O fato de apresentarem potenciais totais diferentes, para

mesma concentração de íons, é devido à presença do potencial matricial, particularidade do sistema em solo.

A realidade da rizosfera e da solução nutritiva tornam inseparáveis a relação salinidade e temperatura. No solo, o que a planta experimenta independe de compensações de temperatura, sendo fundamental levar em consideração a variação da temperatura sobre a salinidade da zona radicular.

Portanto, na comparação de sistemas hidropônicos com sistemas de cultivo em solo, conduzidos concomitantemente, sob as mesmas condições ambientais de radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, seria um equívoco utilizar medidas de condutividade elétrica compensadas para uma temperatura de 25°C. Esse equívoco deve-se ao fato de que os distintos sistemas possuem particularidades intrínsecas, como por exemplo, os materiais que compõem cada sistema e suas respectivas refletividades e refletâncias, além das diferenças na absorção térmica do solo quando comparadas com a da solução nutritiva da hidroponia, que elevam a temperatura para distintos valores, mesmo que ambos os sistemas estejam submetidos às mesmas condições ambientais.

Logo, a condutividade elétrica do meio de cultivo ao longo de um dia pode variar para diversos valores, e a máxima salinidade experimentada por uma cultura, em estudos de tolerância, estaria associada a máxima temperatura do meio de cultivo obtida ao longo do dia, e não a 25°C.

Foi diante desse contexto, da ausência de um procedimento que equilibre e parametrize as disparidades dos parâmetros associados a salinidade em cultivo hidropônico e em solo, além da ausência de estudos contrastando as respostas das culturas ao estresse salino sob as mesmas condições ambientais e de tempo, sob uma base comum de comparação (condutividade elétrica real do meio de cultivo), que se motivou e se propôs essa pesquisa.

2. HIPÓTESES

- Na hidroponia, espera-se que a tolerância e produção das culturas à salinidade sejam maiores que no solo, em virtude da ausência do potencial matricial;
- No solo, aumentando-se a tensão crítica, aumenta-se o estresse por secamento, o que deve diminuir a tolerância da cultura à salinidade;
- A oscilação de umidade do solo altera o nível de concentração de sais da rizosfera, e mesmo quando esta oscilação se der nos limites críticos do manejo da irrigação, haverá uma condição subótima da concentração de sais em relação ao cultivo hidropônico sob as mesmas condições de salinidade inicial;
- Na ponderação da condutividade elétrica da rizosfera ao longo do tempo, ao se considerar a variação da condutividade elétrica em função da variação de umidade do solo, juntamente com os efeitos da temperatura sobre a salinidade, as culturas apresentam uma maior salinidade limiar com relação ao sistema hidropônico e aos valores referenciados na literatura.

3. OBJETIVO

3.1 Objetivo geral

Propor um procedimento para obtenção das respostas da alface (*Lactuca sativa* L.) à salinidade, em sistema hidropônico e em solo, e avaliar o comportamento quanto à tolerância e ao desenvolvimento vegetativo entre os sistemas avaliados.

3.2 Objetivos específicos

- Elaborar um procedimento que permita obter a resposta da cultura à salinidade, em sistema hidropônico e em cultivos em solo;
- Comparar ambos os sistemas, hidroponia e solo, quanto à resposta das plantas à salinidade, em termos de qualidade, desenvolvimento vegetativo e produção;
- Obter as concentrações de solutos inorgânicos nos tecidos foliares da cultura nos diferentes tratamentos e sistemas de cultivo;
- Estimar o consumo hídrico e a produtividade de água, em hidroponia e em solo, para a cultura da alface;
- Estabelecer a salinidade limiar da cultura, considerando os sistemas em solo e hidropônico, contrastados mediante um indicador comum, a condutividade elétrica do meio de cultivo;
- Avaliar o impacto do procedimento proposto sobre a salinidade limiar da cultura comparada às metodologias tradicionais.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Características e usos das águas salobras em regiões semiáridas

Nas regiões semiáridas, a escassez de águas superficiais são um fator limitante para o desenvolvimento, afetando gravemente a população, a produção agrícola, e ocasionando diversas perdas sociais e econômicas, aumentando a pobreza (ALVES *et al.*, 2011).

Nessas regiões semiáridas brasileiras, devido à geologia, há uma predominância de embasamento cristalino de rochas impermeáveis, e juntamente com as baixas e irregulares pluviosidades aliadas as altas taxas evapotranspirativas, é comum se obter águas salobras no subsolo (SOARES *et al.*, 2010). Acredita-se que, nas comunidades remotas na região do semiárido brasileiro, há formação de rochas cristalinas em 80% do território (SILVA; SHARQAWY, 2019).

O uso dessas reservas subterrâneas de água pode melhorar o convívio das populações do Semiárido com os períodos de seca, apesar de muitos dos poços encontrados apresentarem baixa vazão e elevada concentração de sais dissolvidos (SANTOS *et al.*, 2010). Quando usadas para irrigação, essas águas aumentam a disponibilidade dos recursos hídricos de melhor qualidade para fins mais nobres, como o consumo humano.

Portanto, nessa região onde os recursos hídricos são limitados e pelas dificuldades técnicas e orçamentárias para se recalcar águas superficiais até as comunidades rurais (ALVES *et al.*, 2011), as águas salobras surgem como uma fonte alternativa razoável de suprimento de água para a agricultura irrigada, compensando a escassez de água doce (ZHANG *et al.*, 2021).

As águas salobras são águas superficiais ou subterrâneas que apresentam concentrações de sólidos dissolvidos totais na faixa de 1 a 10 g L⁻¹, sendo sua salinidade maior que a água doce (< 1 g L⁻¹) e menor do que a água do mar (10 a 60 g L⁻¹) (GREENLEE *et al.*, 2009).

Em termo de condutividade elétrica, Cassaniti *et al.* (2013), modificado de Paranychianakis e Chartzoulaki (2005), propuseram a seguinte classificação: água doce com valores de condutividade elétrica mais baixo que 0,6 dS m⁻¹; água ligeiramente salobra para condutividade elétrica que varia de 0,6 a 1,5 dS m⁻¹; água

salobra de 1,5 a 3,0 dS m⁻¹; água moderadamente salina de 3,0 a 8,0 dS m⁻¹; água salina de 8,0 a 15,0 dS m⁻¹; e água altamente salina de 15,0 a 45,0 dS m⁻¹.

No mundo, as águas superficiais possuem um teor máximo de sais de 28,0 g L⁻¹, com salinidade média de 6,8 g L⁻¹, enquanto as águas subterrâneas possuem um teor máximo de sais de 21,3 g L⁻¹, com salinidade média de 3,3 g L⁻¹. As águas superficiais com um teor de sais menor que 10,0 mg L⁻¹ são responsáveis por 76% da água salobra superficial no mundo, enquanto que as subterrâneas menores que 10,0 mg L⁻¹ representam em torno de 94% de toda a água salobra subterrânea. No geral, as águas salobras com concentrações menores que 10,0 g L⁻¹ representam mais de 85% da água salobra no mundo (DU *et al.*, 2020).

Nas regiões semiáridas, por vezes, águas de baixa qualidade, como as águas salobras, são comumente aproveitadas na irrigação por serem a única fonte disponível (LEAL *et al.*, 2020), e como alternativa tecnológica específica para situações de baixa disponibilidade e/ou qualidade, os sistemas de cultivo sem solo têm sido recomendados (BIONE *et al.*, 2021) devido aos efeitos que o uso prolongado de águas salobras podem ocasionar no solo, como a salinização, fazendo com que as plantas se desenvolvam de forma anormal (ALVES *et al.*, 2011; DU *et al.*, 2020).

4.2 Efeitos dos sais nas plantas

A salinidade não traz prejuízos apenas para a estrutura dos solos, mas para as plantas também, sendo um dos fatores de estresse abióticos mais complexos no ambiente agrícola. No entanto, a salinidade atinge a produtividade de uma planta de forma variável, sendo que cada cultura pode responder ao estresse salino de acordo com sua fisiologia, tipo de solo, conteúdo de água, estado de nutrientes, espécie vegetal e os íons de sais presentes no solo (BUTCHER *et al.*, 2016).

A resposta das culturas à presença de sais na solução de um meio de cultivo está associada ao potencial da água ocasionado pela presença desses sais, ou seja, os potenciais responsáveis por reduzir a energia livre da água, que são as componentes matriciais e osmótica, que reduzem a disponibilidade de água para as plantas, afetando o consumo hídrico, que conseqüentemente afeta o desenvolvimento da cultura (CARVAJAL *et al.*, 1999).

Dos diversos efeitos causados pelo estresse salino, os mais comuns são: inibição da germinação de sementes, do crescimento, do desenvolvimento e do

rendimento da planta (TAIZ *et al.*, 2017). Além disso, o estresse salino dificulta a maquinaria fotossintética, a transpiração e as trocas gasosas por diminuir os teores de clorofila, reduzindo a condutância estomática (PAN *et al.*, 2020).

O acúmulo de sais na rizosfera pode provocar estresse osmótico, o que interrompe a homeostase dos íons celulares, inibindo a absorção de nutrientes como K^+ , Ca^{2+} e NO_3^- e levar ao acúmulo de íons tóxicos como o Na^+ e o Cl^- . Como reflexo dessas modificações e disfunções metabólicas, ocorre redução na divisão e no alongamento celular, o que conseqüentemente afeta o crescimento e a produção da cultura (PARANYCHIANAKIS; CHARTZOULAKI, 2005).

As concentrações de sais e água em diferentes tecidos são sintetizadas para manterem as funções celulares ideais. A água percorre pelas células da raiz até chegar ao xilema. Uma vez no xilema, a água é transportada para cima pela pressão negativa da transpiração presente na superfície da folha e pela ação capilar. A primeira fase da captação de água depende de um gradiente osmótico, e a água entra na planta como resultado do menor potencial osmótico dentro da raiz em comparação com o solo ao redor. Em condições salinas, esse gradiente osmótico é reduzido ou revertido e a água não se move para as raízes tão facilmente, e a incapacidade de extrair e absorver água pelas raízes induz um estado de seca, dificultando a osmorregulação (TAIZ *et al.*, 2017).

Esse é o primeiro estágio de resposta à salinidade do solo, definido como estresse osmótico. O segundo estágio envolve a toxicidade ocasionada pelos íons dos constituintes dos sais (BUTCHER *et al.*, 2016).

O estresse osmótico se deve ao aumento da concentração de sais no solo, que diminui o potencial osmótico e do fluxo de água no sentido solo-planta-atmosfera, tornando-o mais negativo, aumentando as forças de retenção sobre a água. Com o aumento da pressão osmótica devido ao excesso de sais solúveis, pode-se chegar a um nível em que a planta não terá força de sucção suficiente para superar essa pressão, que apesar da presença da água no solo, não estará totalmente disponível, reduzindo a absorção e seu consumo hídrico (CARDOSO, 2022; SALMAN *et al.*, 2023).

Em um nível celular, isso pode levar ao dobramento incorreto das proteínas, pois muitas proteínas exigem uma camada de hidratação para se dobrar e funcionar

adequadamente. Considerando toda a estrutura da planta, a incapacidade de absorver água também é um inconveniente, sendo necessária para a manutenção da integridade estrutural. Em condições ideais, o vacúolo de uma célula vegetal é preenchido com água, e o inchaço da organela exerce uma pressão positiva contra a parede celular, uma força conhecida como pressão de turgor. Quando os níveis de água dentro da planta diminuem, o fluido é perdido do vacúolo, ocorrendo o murchamento. Condições semelhantes à seca induzem vias de sinalização que fazem com que as plantas acumulem sais para reajustar o gradiente osmótico e atrair água para o interior das células. Logo, a alta concentração intracelular de solutos incompatíveis, como sais, é um inconveniente, pois eles podem interagir de forma anormal com as proteínas e seu acúmulo pode levar à toxicidade (LITALIEN; ZEEB, 2020).

O estresse iônico tem como principal consequência a toxicidade ocasionada pelos sais, que causam interferência nos processos fisiológicos. Isso ocorre quando as plantas absorvem, juntamente com a água, os sais do solo. Como consequência, há o desbalanceamento e danos ao citoplasma, ocasionando danos na bordadura e no ápice das folhas, a partir de onde a planta perde água por transpiração (ARIF *et al.*, 2020).

A acumulação do cloreto nas folhas causa queima nos tecidos foliares podendo chegar até as bordas e promover sua queda prematura. Já para o sódio, os sintomas aparecem na forma de queimaduras ou necrose, ao longo das bordas (CASSANITI *et al.*, 2013; LITALIEN; ZEEB, 2020).

Os sais de sódio tendem a restringir a taxa de mineralização do nitrogênio, já que seu aumento no solo causa redução da mineralização do nitrogênio orgânico, afetando o crescimento da planta, pela redução do nitrogênio disponível e não pelo excesso de sódio. Portanto, a presença de um íon em excesso pode provocar deficiência ou inibir a absorção de outro (ARIF *et al.*, 2020).

Uma das respostas das plantas à salinidade mais fáceis de mensurar é a diminuição da taxa de assimilação de CO₂, devido ao acúmulo de sais nos tecidos dos mesófilos fotossinteticamente ativos. Isso está associado às limitações que a salinidade causa aos processos fotossintéticos nos cloroplastos, reduzindo a abertura estomática e conseqüentemente as trocas gasosas de dentro para fora das folhas.

Além disso, um acúmulo de Na^+ no citosol e no estroma do cloroplasto ocasiona implicações para fotoquímica foliar (PAN *et al.*, 2020).

Diante dos prejuízos ocasionados pelo excesso de sais no solo para as plantas, e considerando que as tecnologias existentes para recuperação de solos salinos e/ou sódicos são laboriosas, dispendiosas, que requerem lâminas de lavagem, o que gera custos ambientais, custos de oportunidade da água e corretivos empregados, deve-se considerar utilizar as águas salobras em sistemas de produção intensivos, que busquem maior produção vegetal, menor impacto ambiental e ocupação do solo, como a hidroponia (SOARES, 2007), além de apresentar uma maior eficiência do uso da água (COSTA *et al.*, 2020).

4.3 Cultivo hidropônico

A hidroponia é definida como uma técnica de cultivo de plantas sem solo, com as raízes das plantas imersas em água com nutrientes dissolvidos. Essa técnica apresenta vantagens como rápido crescimento, maior produtividade, fácil gerenciamento e segurança ambiental (SANTOS *et al.*, 2013).

No contexto da salinidade e suas consequências para os solos e para as plantas, a hidroponia torna-se uma estratégia eficaz na utilização de águas salobras, que é condizente com os aspectos qualitativos e quantitativos disponíveis na zona Semiárida (ALVES *et al.*, 2011).

Além disso, aumentar a produção agrícola em regiões de clima quente e seco requer sistemas eficientes e programação eficaz da irrigação, que reduzam as perdas por percolação e evaporação, atendendo às demandas das culturas com segurança e operando com águas salobras ao invés de suprimentos reduzidos de água doce (LIMA *et al.*, 2021).

Soares *et al.* (2010) afirmam que o aproveitamento de água salobra na hidroponia pode ser menos prejudicial quando utilizada exclusivamente para a reposição da evapotranspiração em culturas de ciclo curto, em relação a quando utilizada somente para o preparo da solução nutritiva, o que se deve ao fato de que, quando mantida desde o início do ciclo, a salinização gradual seria menos deletéria do que a salinização constante.

Dentre os sistemas hidropônicos, destacam-se o sistema de pávio, leito flutuante, subirrigação, gotejamento, aeropônico e o NFT, sendo o último o mais

conhecido. Esses podem ser classificados em sistemas abertos e fechados, sendo que no primeiro caso a solução nutritiva é aplicada uma única vez às plantas, não sendo reutilizada, normalmente aplicado em cultivo com substratos. Já no sistema fechado, o excesso de solução nutritiva é recuperado e recirculado, sendo normalmente utilizado no sistema hidropônico tipo NFT e o aeropônico (TAIZ *et al.*, 2017).

Uma das técnicas de cultivo hidropônico, o NFT (técnica do fluxo laminar de nutrientes), tem as seguintes vantagens: melhor aproveitamento da área; eficiência do uso da água e de nutrientes; aumento da produtividade e maior controle no descarte do rejeito, reduzindo os riscos sobre o meio ambiente (SANTOS *et al.*, 2010).

Estruturas hidropônicas convencionais são consideradas estratégias eficientes, que podem produzir com uma taxa de crescimento de 30 a 40% mais rápido, e que exigem menos espaço quando comparados com cultivos convencionais em solo (SUPRAJA *et al.*, 2020).

Uma das principais características dos sistemas hidropônicos é a facilidade de se controlar a condutividade elétrica e a temperatura da solução nutritiva, e conseqüentemente do sistema radicular. Para a temperatura, o controle pode ser feito por meio de aquecedores ou espirais de resfriamento (COMETTI *et al.*, 2013).

Entretanto, apesar desses sistemas de cultivo sem solo fornecerem maior eficiência e vegetais com melhor qualidade, com menor uso de inseticidas e pesticidas por serem cultivados em ambiente protegido, o alto custo de investimento de capital, os custos operacionais e de manutenção podem dificultar sua difusão no campo (SUPRAJA *et al.*, 2020).

Além disso, apesar de não existir na hidroponia a interface água-ar entre as partículas sólidas e o potencial matricial ser minimizado, predomina-se o estresse osmótico, sendo os sais da solução nutritiva mais facilmente disponíveis para serem absorvidos pelas raízes das plantas, havendo risco de toxicidade (SOARES *et al.*, 2007). Já no solo, a planta responde aos estresses por secamento e osmótico, retendo água e reduzindo a disponibilidade e o consumo de água pelas culturas (SOARES, 2007).

Os cultivos em sistemas hidropônicos são amplamente utilizados para estudos sobre aspectos morfofisiológicos das culturas sob estresse salino, dando pouca

atenção para aplicação da técnica para produção comercial. Logo, as culturas a serem investigadas devem corresponder ao investimento, que é maior que o sistema de cultivo em solo, possuindo potencial de mercado e alta lucratividade (BIONE *et al.*, 2021).

4.4 Tolerância das culturas à salinidade

A tolerância das plantas à salinidade geralmente é considerada pela capacidade inerente da planta em suportar a presença de elevadas concentrações de sais na zona radicular ou nas folhas, sem efeitos adversos significativos (SHANNON; GRIEVE, 1998).

O conhecimento da tolerância de uma cultura à salinidade permite a criação de diretrizes técnicas para interpretação da qualidade da água de irrigação, além de ser útil para comparação e seleção de culturas apropriadas para uma determinada área. Diversos fatores influenciam a tolerância de uma cultura à salinidade, tais como: espécie e cultivar (VELOSO *et al.*, 2018), tempo de exposição à salinidade (ABBAS *et al.*, 2015), tipo e concentração dos sais (AHMADI; SOURI, 2018), condições ambientais como temperatura, umidade relativa do ar e intensidade luminosa (HASANUZZAMAN *et al.*, 2013), estágio de desenvolvimento, tipos de substratos e o sistema de produção (AYERS; WESTCOT, 1999).

Lunin *et al.* (1963), em seus estudos precursores e base para muitos estudos das décadas seguintes sobre tolerância à salinidade, propuseram regras básicas para determinação da tolerância real de uma cultura, considerando que a salinidade limiar de uma cultura deve variar de acordo com estágios de crescimento em que a salinização é iniciada e o nível final de salinidade alcançado.

As plantas podem ser classificadas, com relação a tolerância à salinidade, como halófitas, que são plantas tolerantes e que se desenvolvem em ambiente com alta concentração de sais, e glicófitas, que são plantas sensíveis à salinidade e não toleram altas concentrações de sais (ARIF *et al.*, 2020). Também podem ser classificadas em sensíveis, quando sobrevivem em ambientes com concentração de sais de até 2 dS m⁻¹, moderadamente tolerante (até 6 dS m⁻¹) e altamente tolerante (até 10 dS m⁻¹) (SINGH, 2021).

A tolerância das culturas à salinidade geralmente é medida com base na salinidade limiar, que equivale à condutividade elétrica que cause redução inicial no

rendimento máximo, provocando declínio da produtividade, que corresponde a porcentagem do rendimento que se espera que seja reduzida para cada aumento unitário acrescido acima do valor limiar (SHANNON; GRIEVE, 1998). Vale ressaltar que os valores de tolerância das culturas à salinidade devem levar em consideração as partes comerciáveis das plantas (LUNIN *et al.*, 1963).

A salinidade limiar e a tolerância são considerados valores relativos e não absolutos, uma vez que esses valores variam com o clima, genótipos, estágio de desenvolvimento, textura do solo, época de colheita, constituintes iônicos da salinidade do solo e manejo da irrigação (MINHAS, 1996; MUNNS, 2002; DIAS *et al.*, 2016). Ecologicamente, os rendimentos das culturas, em ambientes salinos, também variam sua resposta/tolerância de acordo com a densidade de plantio (STEPPUHN, 1997). Sonneveld (2004) afirma que a tolerância de uma cultura à salinidade também pode variar em função do sombreamento artificial ou sob diferentes estações do ano em cultivo a céu aberto.

Com relação ao tempo de exposição de uma cultura à salinidade, é comum nas pesquisas, atrasar a salinização das zonas radiculares até o momento em que a cultura tenha se estabelecido (MAAS; GRATTAN, 1999).

No campo, os solos desenvolvem diferentes padrões de distribuição de sais, que são específicos de acordo com o tipo de solo e irrigação. Essa distribuição variável é devido ao movimento da água por ação gravitacional e capilar, oriundo da extração de água das raízes e evaporação no solo. Na irrigação por aspersão, a salinidade aumenta com a profundidade do solo, já no sulco e gotejamento, aumenta-se horizontalmente em direção ao fluxo de água, além de aumentar em direção a profundidade (HOPMANS *et al.*, 2021). Os mesmos autores ainda afirmam que, em solos sódicos, a tolerância das culturas pode ser influenciada pelas mudanças causadas na estrutura.

A irrigação de alta frequência, quando comparada com os métodos de irrigação convencional, aumentam a tolerância das culturas à salinidade (RAWLINS; RAATS, 1975). A zona molhada da rizosfera é tipicamente menor na irrigação por superfície de baixa frequência, já na irrigação por gotejamento de alta frequência, a salinidade próxima ao gotejador é próxima à da água de irrigação com concentração de sais próxima a capacidade de campo. Logo, a zona radicular é submetida a uma salinidade do solo inferior ao do manejo da irrigação convencional (HOPMANS *et al.*, 2021).

Logo, uma cultura pode apresentar um número ilimitado de diferentes valores de salinidade limiar, em função das diferentes variações das condições de contorno que ditam a resposta das plantas ao estresse salino. Grieve *et al.* (2011) afirmam que, apesar de controlar a salinidade e minimizar todos os outros estresses que podem afetar o crescimento da cultura, os erros padrão associados aos valores de “limiar” podem estar na faixa de 50 a 100%. Logo, devido a esses altos valores percentuais, o que leva a incertezas consideráveis, Steppuhn *et al.* (2005b) sugerem que não existam valores limiares verdadeiros.

4.5 Estudos comparando o cultivo hidropônico com o solo

Apesar da adoção da hidroponia na prática agrícola ainda se encontrar em fase inicial nos países em desenvolvimento, e embora algumas pesquisas mostrarem o melhor desempenho das culturas em cultivos hidropônicos em relação ao cultivo em solo, até agora poucas pesquisas fizeram comparações entre os dois distintos sistemas de cultivo (MAJID *et al.*, 2020).

Dos estudos comparativos conhecidos, com diferentes metodologias e análises comparativas entre cultivo em solo com o hidropônico, pode-se citar: efeito das diferentes épocas do ano sobre o crescimento e produção em hidroponia e solo (FELTRIM *et al.*, 2005); comparação dos sistemas com insumos convencionais – condições não salinas (LIMA *et al.*, 2008; SILVA, 2009; SILVA *et al.*, 2011; MAJID *et al.*, 2020; LEI; ENGESETH, 2021); influência do cultivo hidropônico e do solo na qualidade e vida de prateleira (MANZOCCO *et al.*, 2011); sustentabilidade e eficiência energética dos sistemas de cultivo (BARBOSA *et al.*, 2015); e estudo econômico da rentabilidade (MAESTRE-VALERO *et al.*, 2018).

Dois estudos propuseram contrastar o cultivo hidropônico com o solo em meio salino, foram eles: Tavakkoli *et al.* (2010), que cultivaram cevada (*Hordeum vulgare* L.) em estufa climatizada, em sistema hidropônico DFT (*deep film technique*) e cultivo em vaso com solo; e Leal *et al.* (2020), que avaliaram o desenvolvimento da cultura do espinafre (*Spinacea oleracea* L.), cv. ‘Viroflay’, em sistema hidropônico DFT e em cultivo convencional em vaso com solo (com e sem cobertura). Leal *et al.* (2020) utilizaram concentrações distintas de nutrientes aplicados em cada sistema, o que pode ter favorecido um sistema e desfavorecido o outro, além da irrigação ter sido realizada diariamente com frequência fixa, ou seja, independente do solo ter atingido o limite crítico ou não. Tanto Tavakkoli *et al.* (2010) quanto Leal *et al.* (2020) utilizaram

a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo para representar a salinidade do solo.

4.6 Principais parâmetros dos cultivos hidropônico e do solo em meio salino

O sistema hidropônico e o solo são complexos meios de cultivo que influenciam de formas variadas as respostas das culturas, possuindo propriedades intrínsecas quanto ao manejo e o uso da água. Além das particularidades de cada sistema, ambos apresentam parâmetros comuns e triviais de todo sistema de irrigação, estando intimamente ligados ao uso de águas salobras e sua relação com as culturas, são eles: a capacidade de tamponamento, a umidade, a condutividade elétrica do meio, o potencial total da água e a temperatura do meio de cultivo.

4.6.1 Capacidade de tamponamento

No solo, a condutividade elétrica oscila em função da oscilação de umidade, já na hidroponia não se tem uma perda da condição inicial de umidade, que é a saturação. No entanto, na hidroponia a condutividade elétrica pode aumentar devido ao aumento da concentração de sais, que ocorre quando o consumo de água pela cultura não é acompanhado pela reposição instantânea da água no reservatório. Porém, essa condição de rebaixamento do nível da água no reservatório e aumento da concentração de sais é pouco usual na experimentação e na produção comercial.

Essa rápida resposta na condutividade elétrica devido ao consumo de nutrientes pelas plantas e/ou a incorporação de sais pelas águas salobras está associada ao baixo poder tampão da solução nutritiva da hidroponia, quando comparado com o solo, onde no último a interface com a fase sólida amortiza as variações químicas (SOARES *et al.*, 2016a).

Já em solos com baixa capacidade de tamponamento, para se manter esses solos férteis, é preciso haver em sua solução um alto nível de salinidade ocasionada pelos nutrientes. Já em solos com alta capacidade de tamponamento, mesmo com baixa concentração dos nutrientes da sua solução, o solo pode manter-se fértil para as plantas, o que é contrabalanceado pelo fornecimento constante de íons trocáveis. Portanto, solos com menor capacidade de tamponamento seriam mais responsivos à salinidade devido ao aumento de íons essenciais, gerando valores de salinidade limiar maiores (ALVARENGA *et al.*, 2004).

Do contrário, solos com maior capacidade de tamponamento podem requerer uma maior quantidade de fertilizantes para nutrir as plantas, uma vez que parte dos íons seriam mobilizados para o complexo de trocas de cátions, gerando respostas positivas a planta para o crescimento nesse solo com o aumento da salinidade ocasionada pelos fertilizantes (SOARES, 2007).

Essas características têm implicações no momento de inicialização de cultivos experimentais (solo atingiu ou não seu equilíbrio) e também na frequência de correção do nível nutricional do solo ao longo do experimento.

4.6.2 Umidade do solo

Dentre os métodos empregados para estimar a salinidade do meio de cultivo, a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CE_{es}) se constitui como um dos métodos mais usuais e práticos. Para avaliação da salinidade do solo essa condição de saturação foi aceita como padrão (RICHARDS, 1954; MEDEIROS *et al.*, 2016) devido aos extratos fornecerem uma salinidade consistente e repetível (STEPPUHN *et al.*, 2005a), afinal, para avaliar diferentes solos ou condições de manejo quanto à salinidade, caso a umidade das amostras fosse variável, haveria uma série de erros de diagnóstico e classificação.

Além disso, a United States Salinity Laboratory Staff (1954) adotou a condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{es}) como padrão devido à química do extrato saturado do solo ser próximo ao da água do solo, sendo que, a química pode variar devido à dissolução de minerais de sulfato e carbonato, caso seja considerado uma maior diluição da água no solo (HOPMANS *et al.*, 2021).

Porém, nas condições ideais em relação à exploração agrícola, os solos irrigados não são mantidos na saturação, mas sob umidade à capacidade de campo, uma vez que as condições de saturação no solo trazem diversos prejuízos para as culturas, tais como: reduzem o crescimento vegetal devido à aeração restrita, o que diminui o oxigênio dissolvido, aumentando ainda as concentrações de dióxido de carbono e metano; aumento do pH do solo à medida que o carbonato e bicarbonato se dissolvem; alteração na comunidade microbiana e deterioração da estrutura do solo (FAY *et al.*, 2016).

No manejo da irrigação nas condições de campo, a saturação só é admitida nas camadas mais superficiais do solo e por um período curto de tempo, período esse

necessário apenas para a redistribuição da água na camada referente a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura. Ou seja, na irrigação de qualidade, não se espera atingir valores de condutividade elétrica nas condições de saturação do solo.

Nas condições de laboratório, quando o solo é saturado para análise, alguns sais, que antes não estavam dissolvidos nas condições de umidade da rizosfera, podem se dissolver nas condições saturadas e contribuir para salinidade, extrapolando a condutividade elétrica real. Esse fenômeno pode ocorrer em solos ricos em sais de baixa solubilidade, e pode não ocorrer para solos ricos em sais de alta solubilidade, que não estariam precipitados a umidade atual na coleta da amostra.

Isso reflete diretamente na salinidade da rizosfera, uma vez que a condutividade elétrica é inversamente proporcional à umidade do solo, ou seja, a condutividade elétrica de um solo na condição saturada é menor que a condutividade desse mesmo solo na condição da capacidade de campo. No solo, quanto mais dissolvido um sal, menor é sua capacidade de conduzir corrente elétrica e menores serão os efeitos para as culturas. Logo, à medida que o teor de água no solo diminui, maior a salinidade do meio (FERREIRA *et al.*, 2016; FU *et al.*, 2021).

4.6.3 Condutividade elétrica

A salinidade do solo pode ser expressa em termos de sólidos dissolvidos totais ou pela condutividade elétrica da pasta saturada do solo, sendo o último o parâmetro mais utilizado e mede a capacidade de um sistema em conduzir corrente elétrica, sendo proporcional à concentração de íons dissolvidos (CORWIN; YEMOTO, 2020; PAZ *et al.*, 2019; SHAKIR *et al.*, 2017), tratando-se de um conceito contrário ao da resistência elétrica, que mede a dificuldade gerada para passagem de corrente elétrica, portanto, a condutividade elétrica pode ser tomada como o inverso da resistência elétrica (VANELLA *et al.*, 2022).

Outro método, bastante difundido para obtenção da salinidade do solo é o de extratos solo-água. Geralmente, os extratos solo:água são preparados nas proporções de 1:1, 1:2, 1:5 e até 1:10 (FREIRE *et al.*, 2016).

Quanto maior a proporção de água, menos concentrado será os sais da solução do solo, reduzindo a correlação da salinidade com as reais condições em que as plantas estão submetidas nas condições de campo. Além disso, a aplicação do

método de extratos solo-água está imposta a erros procedentes dos processos de peptização, hidrólise, dissolução mineral e troca de cátions (RHOADES, 1982).

A condutividade elétrica de uma solução é proporcional à sua concentração iônica, sendo uma medida exclusiva dos íons, logo, um soluto só contribui para condutividade elétrica se estiver na forma iônica, ou seja, se produzir íons dissociados (FERREIRA *et al.*, 2016).

A condutividade elétrica, normalmente medida em decisiemens por metro (dS m^{-1}) e a 25°C para evitar a influência da temperatura nos resultados, é a medida da concentração de todos os sais solúveis (DALIAKOPOULOS *et al.*, 2016), e geralmente em um espaçamento de eletrodo de 10 mm (STEPPUHN *et al.*, 2005a). A condutividade elétrica é amplamente utilizada para estimar a salinidade da água de irrigação, da água de drenagem, das soluções de fertirrigação e do meio de cultivo, e pode ser facilmente medida por aparelhos denominados condutivímetros, aparelhos estes de fácil operação e que podem ter custo relativamente baixo.

Tanto para produção comercial quanto para experimentação, é desejável que a condutividade elétrica do meio de cultivo se mantenha o mais constante possível, ao longo do ciclo de uma cultura. Alguns métodos conhecidos podem garantir que a condutividade elétrica de uma solução seja mantida relativamente constante ao longo do tempo, tais como: monitoramento constante, manutenção da umidade do solo, manutenção da temperatura do meio de cultivo, controle do excesso de sais mediante fração de lixiviação, reposição de sais e nutrientes consumidos pela cultura, substituição da solução de cultivo, e etc. (SILVA, 2002; DIAS, 2004).

Um fato importante é que nem todo soluto presente no solo contribui para a salinidade. Diversas espécies de solutos na fase líquida podem estar apenas em suspensão, podendo decantar e não contribuir para condutividade elétrica. Além disso, existe o limite de solubilidade dos sais, que pode fazer com que alguns sais se precipitem devido, por exemplo, ao aumento da concentração ocasionado pela redução da umidade do solo. Ainda, a presença de um sal pode afetar a solubilidade de outro sal. Nas soluções complexas, ao adicionar-se sais de íons comuns, a solubilidade desses sais irá diminuir. Por outro lado, ao adicionar sais de íons diferentes resultará no aumento de solubilidade do sal menos solúvel (BRESLER *et al.*, 1982).

Nos cultivos em solo, a condutividade elétrica real instantânea é mais difícil de se obter uma vez que os condutímetro comuns só realizam medidas em solução aquosa, não podendo realizar leituras diretamente no solo. Uma alternativa seria a utilização de extratores de solução, porém, esses têm a dificuldade de extração à medida que a umidade decresce entre um evento de chuva/irrigação. A principal vantagem do uso de extratores é que o mesmo permite que a solução do solo seja extraída sem a destruição da unidade experimental (LIMA, 2009).

Entretanto, a qualidade da solução extraída tem sido questionada devido a fatores como a intensidade do vácuo aplicado, zona de influência da cápsula e a liberação ou adsorção de íons. A sucção promovida pelo vácuo gera um gradiente de potencial no solo em torno da cápsula, ou seja, quanto maior o vácuo aplicado maior a zona de influência da sucção da cápsula (GROSSMANN; UDLUFT, 1991).

Na literatura especializada, não existe uma padronização quanto a pressão a ser aplicada para futura coleta da solução do solo, nem quanto ao tempo de aplicação do vácuo após a irrigação e o tempo de coleta após aplicação da pressão (LIMA, 2009), podendo ser observado uma gama de valores em diferentes estudos, podendo-se citar: 1) Pressão negativa aplicada – 60 kPa (FOLONI *et al.*, 2006; FRANCISCO, 2014), 70 kPa (GOMES, 2005; MOTA *et al.*, 2006; CASARINI *et al.*, 2007; NASCIMENTO, 2018), 76 kPa (SOUSA NETO, 2017), 80 kPa (ELOI, 2007; MAURI, 2016) e 90 kPa (VALERO, 2006); 2) Tempo de aplicação do vácuo após a irrigação para que haja equilíbrio entre a solução aplicada e a solução do solo – 1 h (NASCIMENTO, 2018), 2 h (FRANCISCO, 2014), 6 h (MEDEIROS, 2007) e 12 h (DIAS *et al.*, 2005; SOUZA, 2006; MAURI, 2016) e 48 h (BLANCO, 2004); e 3) Tempo de coleta da solução após aplicação do vácuo – 2 h (SILVA *et al.*, 2005), 4 h (SILVA *et al.*, 2003), 12 h (MAURI, 2016; SOUSA NETO, 2017), 14 h (MOTA *et al.*, 2006) e 24 h (GOMES, 2005; SOUZA, 2006; FRANCISCO, 2014).

Outra alternativa seria a utilização de sensores que medem a condutividade elétrica diretamente no solo, porém, esses medem a condutividade sob a influência das fases líquidas e gasosas, ou seja, a condutividade elétrica aparente do solo (CE_{ap}), que é menor do que a real, já que as fases líquidas e gasosas aumentam a resistência elétrica. Além disso, as medições por esses sensores são demoradas, onerosas e sujeitas a erros analíticos (MARTÍNEZ *et al.*, 2021; BUGHICI *et al.*, 2022).

Diante disso, sensores capacitivos têm sido aplicados como alternativa para obtenção da umidade do solo e estimativa da condutividade elétrica real. Estudos recentes descrevem, testam e validam o uso do sensor capacitivo de umidade no solo, apresentando resultados significativos da leitura da umidade em relação a leituras obtidas pelo método gravimétrico (NAGAHAGE *et al.*, 2019; PLACIDI *et al.*, 2020; PLACIDI *et al.*, 2021).

No contexto do manejo da irrigação sob condições salinas, nos cultivos hidropônicos, é recomendado que as experimentações se iniciem com exposição à salinidade com a concentração de nutrientes em que se obtenha o máximo desenvolvimento da cultura. Já nos modelos apresentados por Maas e Hoffman não é considerada a salinidade gerada pelos nutrientes, uma vez que o modelo possui uma salinidade igual a zero associada à produtividade máxima, dado que o modelo proposto por esses autores foi direcionado para sistemas de cultivos convencionais em solo (SONNEVELD, 2004).

Nos cultivos hidropônicos, a salinidade da solução nutritiva é majoritariamente ocasionada pelos nutrientes, já no solo os nutrientes pouco afetam a condutividade elétrica, e quando afetam é por curto período de tempo. Vale ressaltar que as soluções nutritivas na hidroponia possuem uma maior concentração do que na solução do solo. No solo, o parâmetro amplamente utilizado para definir a salinidade limiar de uma cultura é a condutividade elétrica do extrato de saturação, já na hidroponia utiliza-se a condutividade elétrica da solução nutritiva (SONNEVELD, 2004).

4.6.4 Potencial da água

Nos sistemas hidropônicos, o potencial matricial (Ψ_m) sobre a energia livre da água é minimizado, assim como a resistência ao movimento de água. Logo, o potencial total (Ψ_T) da água no sistema hidropônico é representado apenas pelo componente osmótico (Ψ_{os}) (TAVAKKOLI *et al.*, 2010). Já nos cultivos em solo, tanto o acúmulo de sais (componente osmótica) quanto a presença do componente matricial reduzem a disponibilidade de água para as plantas (DUARTE; SOUZA, 2016).

As Equações 1 e 2 representam, respectivamente, os potenciais totais da água (kPa) no sistema hidropônico e em cultivos em solo (DIAS *et al.*, 2016; FREIRE *et al.*, 2016; REICHARDT; TIMM, 2022).

$$\Psi_T = \Psi_{os} \approx -36. CE \approx -5,6. 10^{-2}. SDT \quad (1)$$

$$\Psi_T = \Psi_m + \Psi_{os} \quad (2)$$

Em que:

SDT – sólidos dissolvidos totais (mg L^{-1}).

4.6.5 Temperatura

Outro fator que afeta a salinidade é a temperatura. Quanto maior a temperatura, maior a solubilidade dos sais e a velocidade cinética e agitação dos íons, portanto, mais rapidamente íons dissociados passam à solução e maior será a salinidade do meio (PARIENTE *et al.*, 2001; FERREIRA *et al.*, 2016).

Vale ressaltar que o potencial de temperatura (Ψ_{TE}), que diz respeito à variação da temperatura do sistema considerado e a temperatura do estado tomado como padrão, possui efeito complexo sobre o potencial químico de um sistema (LIBARDI, 2005), normalmente não sendo considerado em pesquisas que envolvem a energia livre da água, sendo assumido, na maioria das vezes, que os sistemas são aproximadamente isotérmicos, desprezando-se o efeito da temperatura.

A equação de van't Hoff é uma equação empírica que utiliza conceitos da termodinâmica de gases para estimar o potencial osmótico de soluções diluídas, tendo como uma das variáveis independentes a temperatura do sistema, como mostra a Equação 3 (MELO *et al.*, 2017).

$$\Psi_{os} = -R.T.C \quad (3)$$

Em que:

R – constante universal dos gases ($0,00831 \text{ kg MPa K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$);

T – temperatura (K);

C – concentração do soluto (mol kg^{-1}).

Para fins de padronização de metodologia científica, aparelhos que medem a condutividade elétrica de uma solução, como os condutivímetros, expressam a salinidade como uma condutividade medida à uma temperatura de 25°C. Os condutivímetros modernos possuem sensores de temperatura e um algoritmo que permitem corrigir o valor de condutividade para 25°C, ou seja, por compensação automática de temperatura. Geralmente, aceita-se que a condutividade aumenta 2% para cada 1°C de aumento de temperatura (BOWER; WILCOX, 1965).

Essa metodologia facilita o processo de comparação, e a partir de equações lineares e não lineares, como as Equações 4 (BOWER; WILCOX, 1965) e 5 (RICHARDS, 1954), obtém-se a condutividade elétrica compensada a partir de valores reais mensurados para uma dada temperatura.

$$CE_{25} = \frac{CE_i}{[1+\alpha.(T-25)]} \quad (4)$$

Em que:

CE_{25} – condutividade elétrica à temperatura de 25°C (dS m⁻¹);

CE_i – condutividade elétrica à uma dada temperatura (dS m⁻¹);

T – temperatura associada à medida de CE_i (°C);

α – coeficiente angular do ajuste linear, comumente adotado igual a 2 (% °C⁻¹).

$$CE_{25} = F_i.CE_i \quad (5)$$

Em que:

F_i – fator de correção para uma dada temperatura.

Na Figura 1 é apresentado o comportamento exponencial do parâmetro F para uma dada temperatura.

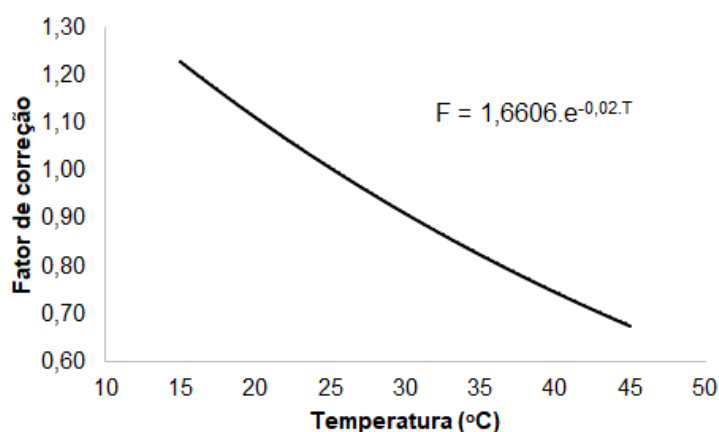


Figura 1. Fator de correção para obtenção da condutividade elétrica à 25°C, em função da temperatura observada (Adaptado de RICHARDS, 1954).

4.7 Cultura da alface

As primeiras orientações para os agricultores sobre as espécies a cultivar vêm do mercado, porém, para o aproveitamento das águas salobras, é recomendado

culturas e cultivares de ciclo curto e mais tolerantes, pois assim os efeitos prejudiciais da salinidade à produção seriam menores. Culturas rentáveis são mais interessantes de explorar para cobrir os custos com a preservação ambiental, sendo adaptáveis as condições climáticas locais e nos modelos de sustentabilidade previsto na agricultura intensiva. Portanto, nesse sentido, as hortaliças, por exemplo, tornam-se culturas interessantes para o uso das águas salobras (SOARES, 2007).

Com origem na região do mediterrâneo, a alface (*Lactuca sativa* L.) é a hortaliça folhosa (ou olerícola) mais importante no mundo, sendo seu consumo feito através de saladas na forma *in natura*. Existem seis grupos varietais (crespa, lisa, americana, mimosa, romana e vermelha) predominantes no Brasil que atendem à demanda do mercado consumidor (SALA; COSTA, 2012).

No Brasil, a área de produção das folhosas abrange 174 mil hectares com um contingente de 1,5 milhão de produtores, e a alface ocupa 49,9% dessa área total, seguido do repolho, couve, brócolis e as demais folhosas. Além disso, sendo a folhosa mais consumida no Brasil, a cultura da alface movimenta, em média, um montante R\$ 8 bilhões, somente no varejo, e produz anualmente 1,5 milhão de toneladas. A alface é cultivada em todas as regiões do Brasil, com destaque para região Centro-Sul, em áreas próximas aos grandes centros, conhecidos como “cinturões verdes” (PESSOA; MACHADO JÚNIOR, 2021).

As hortaliças folhosas são recomendadas na dieta alimentar no tratamento de diversas doenças crônicas e degenerativas. Dentre as folhas, é considerada uma das mais populares e consumidas no mundo por apresentar baixo valor calórico, fonte de vitamina C e sais minerais como cálcio, fósforo, ferro e potássio (OHSE *et al.*, 2001).

Apesar de cultivada em todas as regiões do Brasil, há restrições no seu cultivo, como: temperaturas elevadas associadas a alta pluviosidade podem ocasionar perdas em até 60% devido a maior umidade relativa que favorece ataque de microorganismos, como fungos e bactérias; e altas temperaturas podem induzir o pendoamento precoce, alongamento do caule e redução do número de folhas, afetando o preço e a oferta no mercado. A maior parte do cultivo da alface é em campo aberto, porém, devido às perdas e limitações do cultivo realizados no período de verão, o cultivo em ambiente protegido tem crescido devido à redução dos riscos, regularidade na produção e previsibilidade (SALA; COSTA, 2012).

No Nordeste brasileiro, grande parte do cultivo da alface restringe-se a pequenas áreas, com uma pequena variedade de cultivares adaptadas a elevada luminosidade e as condições climáticas da região, ocorrendo o florescimento precoce e baixa produtividade (QUEIROGA *et al.*, 2001).

Com relação ao manejo da irrigação da alface em solo, recomenda-se uma faixa de tensão crítica de água no solo para promover a irrigação, visando-se obter a produtividade máxima, entre 20 a 50 kPa para irrigação por aspersão (SAMMIS, 1980), 10 a 20 kPa para o sistema em gotejamento e 20 a 40 kPa para sistemas por sulcos, considerando que os maiores valores das faixas de tensão crítica sugeridas devem ser utilizadas em períodos de déficit hídrico, altas demandas evapotranspirativa ($ET_o > 6 \text{ mm dia}^{-1}$) e/ou solos arenosos (MAROUELLI, 2008).

Não existe consenso com relação a tensão crítica para a cultura da alface, podendo-se observar diversos valores recomendados na literatura. Bianchi *et al.* (2017) realizou um compêndio de diversos estudos para tensão crítica da alface em diferentes tipos de solos e sistemas de irrigação, e encontrou as seguintes tensões recomendadas: 20 kPa para solos franco-argilosos ou franco-arenosos em sistema por aspersão ou gotejamento (SAMMIS, 1980); 30 kPa para solo franco-argiloso em irrigação por superfície (AGGELIDES *et al.*, 1999); e 50 kPa para solo franco-arenoso em sistema por aspersão (GALLARDO *et al.*, 1996).

Com relação ao cultivo da cultura da alface em sistema hidropônico, é o vegetal mais cultivado em sistema hidropônico NFT, devido a fácil adaptabilidade ao sistema, melhor aspecto visual, alto rendimento e ter seu ciclo reduzido quando comparado com o solo (OHSE *et al.*, 2001). Em ambientes tropicais, o ciclo da alface em sistemas de cultivo convencionais em solo é de 70 dias, enquanto que em sistemas hidropônicos pode chegar a 40 dias (COMETTI *et al.*, 2013).

Com relação a tolerância da cultura à salinidade, a alface pode ser classificada como “moderadamente sensível” à salinidade (MAAS, 1984), com decréscimo da produção em 13% por aumento unitário da condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{es}) do solo acima de $1,3 \text{ dS m}^{-1}$, já em termos de condutividade elétrica da água (CE_a) o limiar seria de $0,9 \text{ dS m}^{-1}$, considerando-se a relação entre CE_{es} e CE_a para fração de lixiviação entre 0,15 e 0,20 (MAAS; HOFFMAN, 1977).

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização e descrição da área experimental

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, no período de novembro a dezembro (primavera) de 2022, e de março a abril (outono) de 2023, na área experimental do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA), Núcleo de Engenharia de Água e Solo (NEAS) da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), localizado no município de Cruz das Almas-BA, situado nas coordenadas geográficas 12°40'19" de Latitude Sul, 39°06'23" de Longitude Oeste e altitude média de 220 m.

Segundo a classificação de Koppen, o clima da região é considerado tropical quente e úmido (*Af*) (ALVARES *et al.*, 2014), com os meses de setembro a fevereiro os mais secos e os meses mais frios de março a agosto. A umidade relativa do ar média anual é de 80%, com temperatura média anual do ar de 24,5°C (GUIMARÃES *et al.*, 2016).

A estrutura que foi utilizada para montagem e execução do experimento foi uma casa de vegetação em arco simples, com 7 m de largura por 24 m de comprimento e pé-direito elevado com 3 m, para evitar que o interior da casa de vegetação atinja altas temperaturas. Além disso, o ambiente possui no teto um filme plástico anti-UV de 150 µm. As laterais possuem pilares de madeira e tela de sombreamento (50%). O piso do ambiente encontra-se protegido com brita para melhorar as condições fitossanitárias.

5.2 Monitoramento das condições ambientais na casa de vegetação

A umidade relativa e a temperatura do ar foram monitoradas diariamente (dia e noite) no interior da casa de vegetação com a utilização de um termo-higrômetro, modelo DHT22, com intervalos de medição a cada 2 segundos e médias a cada 10 minutos, instalados a uma altura de 1,0 m dos perfis hidropônicos e dos vasos com solo, conectados a um sistema de aquisição de dados de baixo custo.

A radiação solar foi medida com o uso de um piranômetro artesanal de baixo custo (BENÍTEZ, 2021). O aparelho possui, internamente, um fotodiodo que reage proporcionalmente à radiação solar incidida, permitindo-se estimar a radiação global por área. O sensor foi previamente calibrado para o uso em ambiente protegido, com a curva de calibração apresentada na Figura 2.

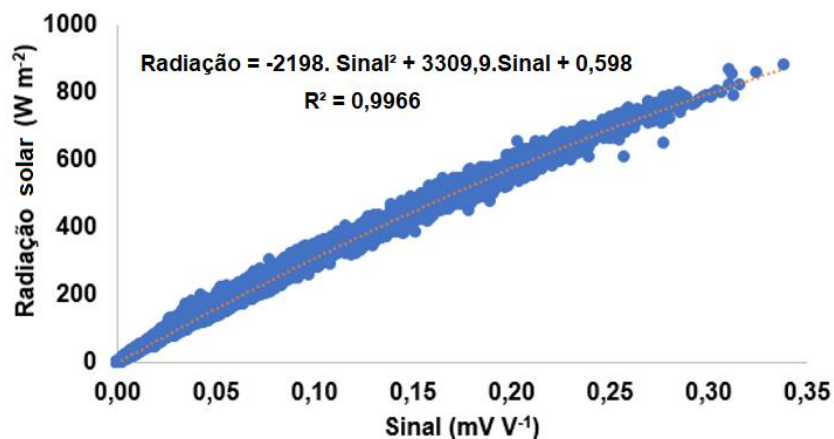


Figura 2. Curva de calibração do piranômetro utilizado nos experimentos.

Durante o experimento de primavera, desde o transplântio até o momento da colheita, as temperaturas do ar (Figura 3A) oscilaram entre a mínima de $20,0^{\circ}C$ e a máxima de $39,9^{\circ}C$, com média de $27,5^{\circ}C$. Com relação a umidade relativa do ar (Figura 3B), os valores oscilaram entre a mínima de $39,4\%$ e a máxima de $90,0\%$, com média de $75,7\%$. Os valores de radiação solar (Figura 3C) apresentaram valores mínimos de $24,4 W m^{-2}$, máxima de $965,9 W m^{-2}$ e média de $220,1 W m^{-2}$.

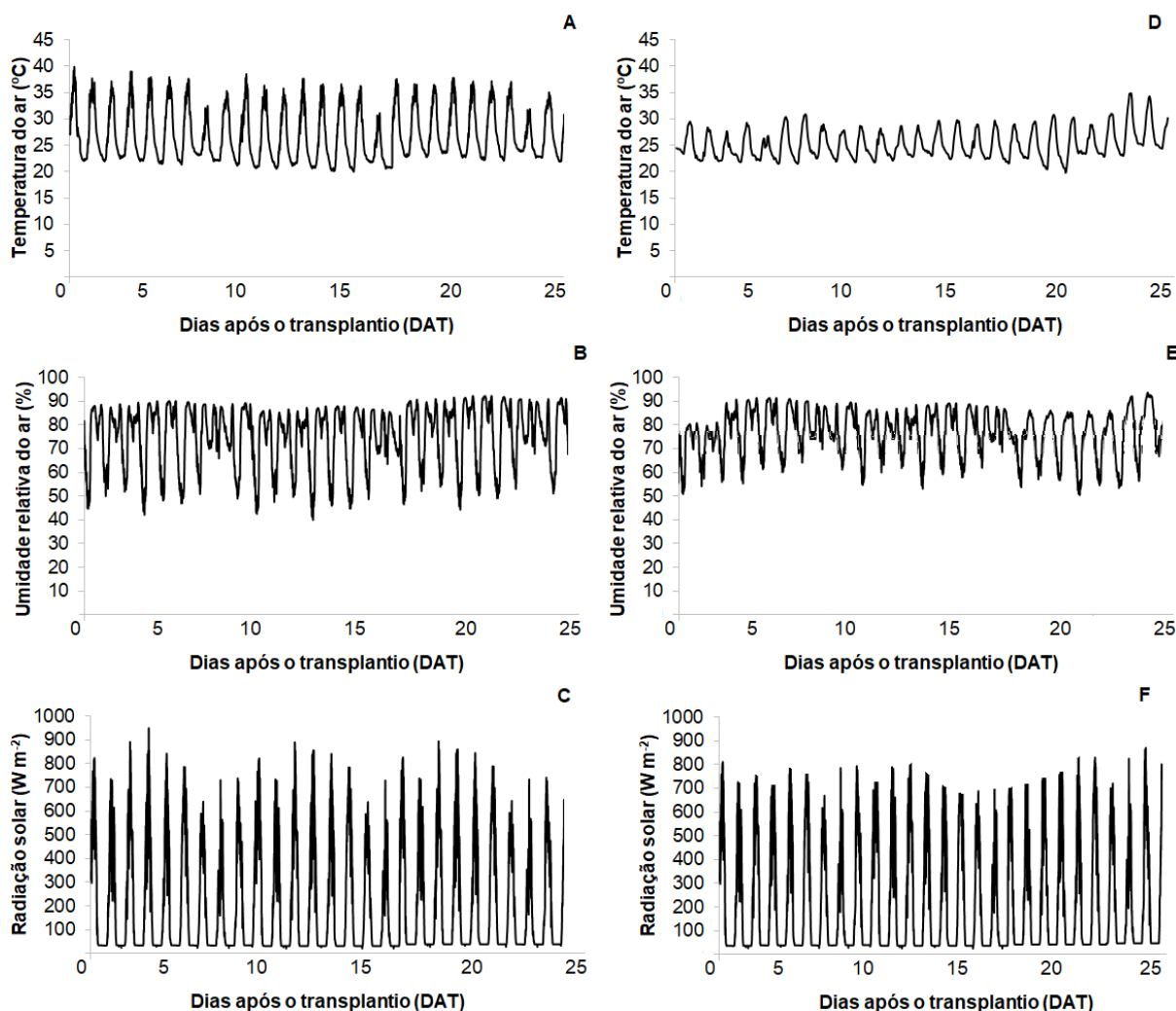


Figura 3. Oscilação da temperatura do ar (A), umidade relativa do ar (B) e radiação solar (C) do experimento de primavera, e registro das oscilações de temperatura do ar (D), umidade relativa do ar (E) e radiação solar (F) do experimento de outono, no interior da casa de vegetação.

No experimento de outono, desde o transplântio até o momento da colheita, as temperaturas do ar (Figura 3D) oscilaram entre a mínima de 19,8°C e a máxima de 34,9°C, com média de 25,3°C. Com relação a umidade relativa do ar (Figura 3E), os valores oscilaram entre a mínima de 38,7% e a máxima de 91,4%, com média de 72,4%. Os valores de radiação solar (Figura 3F) apresentaram valores mínimos de 22,2 W m⁻², máxima de 901,2 W m⁻² e média de 190,3 W m⁻².

5.3 Delineamento experimental e tratamentos

Foram conduzidos dois sistemas de cultivo independentes, hidropônico (*Nutrient film technique* – NFT) e em solo (plantas cultivadas em vasos),

concomitantemente. O delineamento experimental utilizado, de ambos, foi aleatorizado em blocos, cinco tratamentos, quatro repetições e 20 parcelas para cada sistema de cultivo, totalizando 40 parcelas experimentais, como mostra a Figura 4. Na hidroponia, cada parcela foi composta por seis plantas, enquanto no solo cada parcela continha três plantas.

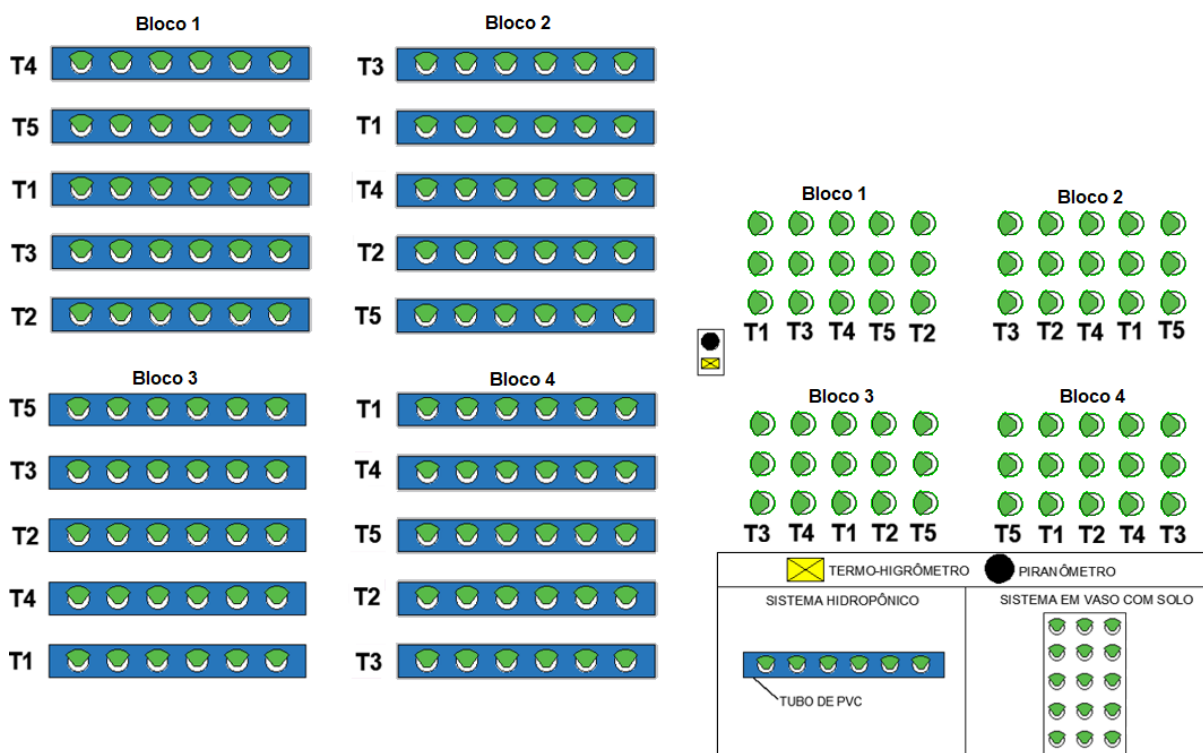


Figura 4. Layout do delineamento experimental.

Foram utilizados cinco níveis de condutividade elétrica do meio de cultivo: 2,0 (controle); 3,0; 4,0; 5,0 e 6,0 dS m^{-1} , definidos como T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente.

Para obtenção das condutividades elétricas desejadas das águas salobras utilizadas na hidroponia, adicionou-se NaCl comercial a água da concessionária ($\text{CE}_a = 0,3 \text{ dS m}^{-1}$). A quantidade de cloreto de sódio utilizada no preparo das águas salobras foi determinada a partir de um ensaio piloto, em que foi adicionado quantidades unitárias crescentes de sais a água e, em seguida, foi medido a CE da água. Com esses valores, gerou-se um gráfico de dispersão e uma regressão que relaciona a CE da água desejada (a 25°C) e a quantidade de sais a adicionar por volume de água (Figura 5).

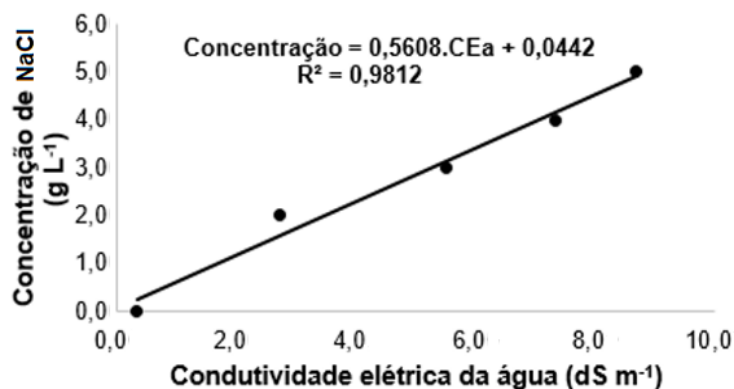


Figura 5. Relação da condutividade elétrica desejada da água com a concentração de cloreto de sódio (NaCl) a adicionar, por volume de água.

Na hidroponia, a água salobra foi utilizada apenas para o preparo da solução nutritiva. As concentrações de NaCl adicionadas foram de 0,00; 0,59; 1,17; 1,76 e 2,34 g L⁻¹, respectivas aos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, correspondendo aos níveis de condutividade elétrica da água (CE_a) de 0,3; 1,0; 2,0; 3,0 e 4,0 dS m⁻¹, respectivamente.

Após o preparo da água salobra, foram adicionados os nutrientes, conforme recomendado por Furlani (1998) para hortaliças folhosas, como mostra a Tabela 1, obtendo-se os níveis de condutividade elétrica da solução nutritiva (CE_{sol}) de 2,0 (controle); 3,0; 4,0; 5,0 e 6,0 dS m⁻¹.

Tabela 1. Quantidade de fertilizantes para o preparo de 1 m³ de solução nutritiva para o cultivo hidropônico de hortaliças, com as respectivas concentrações esperadas de nutrientes (FURLANI, 1998).

Fertilizantes	q*	N-NH ₄	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
-----g m ⁻³ -----														
Nitrato de cálcio	750	7,5	108,75			142,5								
Nitrato de potássio	500		65		182,5									
Fosfato monoamônico	150	16,5		39										
Sulfato de magnésio	400						40	52						
Sulfato de cobre	0,15									0,02				
Sulfato de zinco	0,30													0,07
Sulfato de manganês	1,50											0,39		
Ácido bórico	1,80								0,31					
Molibdato de sódio	0,15												0,06	
Fe-EDTA -13% Fe	16										2,08			
Recomendações		24	173,75	39	182,5	142,5	40	52	0,31	0,02	2,08	0,39	0,06	0,07

q* representa a quantidade de fertilizantes em g m⁻³.

No sistema em vaso, o solo foi corrigido e adubado, e a solução utilizada em cada tratamento para irrigar o solo foi a solução nutritiva utilizada na hidroponia (Tabela 1), com adição de NaCl para obtenção dos níveis desejados da CE do solo na capacidade de campo. A quantidade de sais adicionados à água, que irrigou o solo para se obter os níveis de CE na capacidade de campo de 2,0 (controle); 3,0; 4,0; 5,0 e 6,0 dS m⁻¹, foram determinados previamente por um ensaio piloto.

Inicialmente foi montada uma curva artificial de salinização, com o objetivo de direcionar o processo de salinização na montagem do experimento, visando obter valores de condutividade elétrica do solo em função da concentração dos sais da água, utilizando-se as metodologias descritas por Dias *et al.* (2007) e Silva (2016), adaptando-se apenas a metodologia para obtenção do extrato de saturação, sendo a quantidade de água adicionada por cada m³ de solo contido no vaso, calculada pela relação entre o volume do solo seco e a umidade do solo na condição de saturação. O solo utilizado no experimento foi acondicionado nos vasos e, em seguida, foram preparadas as soluções com as CE referentes aos cinco níveis de salinidade.

Para encontrar a relação entre a CE da água de irrigação e a concentração de sais a serem aplicados, utilizou-se a Equação 6, conforme Richards (1954).

$$C_s = 640. CE_s \quad (6)$$

Em que:

C_s – concentração de sais aplicados (mg L^{-1});

CE_s – condutividade elétrica da solução (dS m^{-1}).

Com base na Equação 6, foram preparadas diferentes concentrações que correspondem a uma salinidade denominada “salinidade teórica”, para posteriormente determinar a CE real das soluções. A partir de uma solução padrão com CE teórica de $10,5 \text{ dS m}^{-1}$, com concentração de $6,72 \text{ g L}^{-1}$, foram tomadas alíquotas para cada nível crescente de salinidade. As alíquotas (V_2) foram calculadas mediante a Equação 7, sendo os volumes de solução padrão e de água calculados pela Equação 8, e pipetados para recipientes plásticos de 150 mL.

$$C_1.V_1 = C_2.V_2 \quad (7)$$

$$V_{\text{água}} = 100 - V_2 \quad (8)$$

Em que:

C_1 – concentração de sais na solução a preparar (mg L^{-1});

V_1 – 100 mL da solução a preparar;

C_2 – concentração de sais na solução padrão (mg L^{-1});

V_2 – volume necessário, em mL, da solução padrão;

$V_{\text{água}}$ – volume de água a adicionar para o preparo de 100 mL de solução (mL).

Foi utilizado um total de 21 soluções, sendo as concentrações dessas soluções variando de 0 até $6,72 \text{ g L}^{-1}$, com intervalo de $0,32 \text{ g L}^{-1}$, o que corresponde as salinidades teóricas variando de 0 até $10,5 \text{ dS m}^{-1}$, com intervalos de $0,5 \text{ dS m}^{-1}$, com base na Equação 6. A amostra em branco (0 g L^{-1}) correspondeu a CE inicial da água sem adição de sais. Foi determinada, a partir dessas soluções preparadas, a condutividade elétrica real das soluções com um condutímetro digital, obtendo-se posteriormente uma curva que relaciona a concentração de sais com a CE real das soluções. A partir da curva gerada e da equação de regressão obtida, foram

determinadas as quantidades de sais necessários para salinização do solo nos níveis desejados.

Para esse ensaio, o solo foi seco ao ar livre, peneirado e acondicionado em vasos plástico, com o mesmo volume que foi utilizado posteriormente no experimento, tendo em sua base uma camada de brita coberta com uma manta geotêxtil, e uma mangueira para coleta do fluxo drenado.

As soluções diluídas pré-estabelecidas foram aplicadas nos vasos, saturando o solo seco, lentamente, até a capacidade de campo (capacidade de “container”), com o objetivo de se obter os cinco níveis de salinidade (2,0; 3,0; 4,0; 5,0 e 6,0 dS m⁻¹). Os valores da concentração final (C_f) dos sais aplicados no solo foram aqueles necessários para se obter os níveis de CE_{es} para serem atingidos na fase de campo do experimento, sendo estimados pelos níveis utilizados na curva de salinização, com a correção devido a diferença de umidade.

O volume de água a ser aplicada correspondeu ao volume necessário para elevar a umidade do solo até a capacidade de campo, e as quantidades de sais adicionadas foram as necessárias para se obter as CE desejadas. A estimativa da concentração final dos sais foi feita com base na Equação 9.

$$C_f = C_i \cdot \left(\frac{U_s}{U_{cc}} \right) \quad (9)$$

Em que:

C_f – concentração final de sais na solução (mg L⁻¹);

U_s - umidade a base de peso na correção da pasta saturada (g g⁻¹);

U_{cc} – umidade do solo a base de peso na capacidade de campo (g g⁻¹);

C_i – concentração de sais, com base na curva de salinização (mg L⁻¹).

A superfície do solo foi coberta com plástico filme para que não houvesse perda de umidade por evaporação. O equilíbrio iônico foi atingido no momento em que a CE do solo se manteve constante ao longo do tempo. Caso verificado uma diminuição na CE, uma nova salinização foi feita.

Três dias após a aplicação das soluções, foram retiradas amostras de solo na camada de 0 – 10 cm, após uma raspagem de 2 cm da superfície do solo. A partir

dessa amostragem, foi determinado a condutividade elétrica do extrato de saturação (CE_{es}) real, ou seja, aqueles referentes aos valores encontrados no solo.

A pasta saturada para determinação da CE_{es} foi preparada utilizando-se 300 g de solo seco ao ar, adicionando-se gradualmente água destilada até atingir o ponto de saturação. As pastas foram colocadas em repouso por 24 h e, em seguida, os extratos de saturação foram extraídos por meio de sucção.

A sucção foi feita aplicando-se um vácuo de aproximadamente -80 kPa, e após 24h, foram coletados os extratos da solução do solo para determinação da condutividade elétrica da solução, repetindo-se a coleta após dois dias para verificar se atingiu o equilíbrio iônico.

As curvas de salinização foram então construídas por meio de diagramas de dispersão, onde foram plotados os valores de CE real encontrados versus as concentrações de sais correspondentes aplicadas. Na Figura 6 é apresentada a curva artificial de salinização obtida para o solo que foi utilizado no presente trabalho.

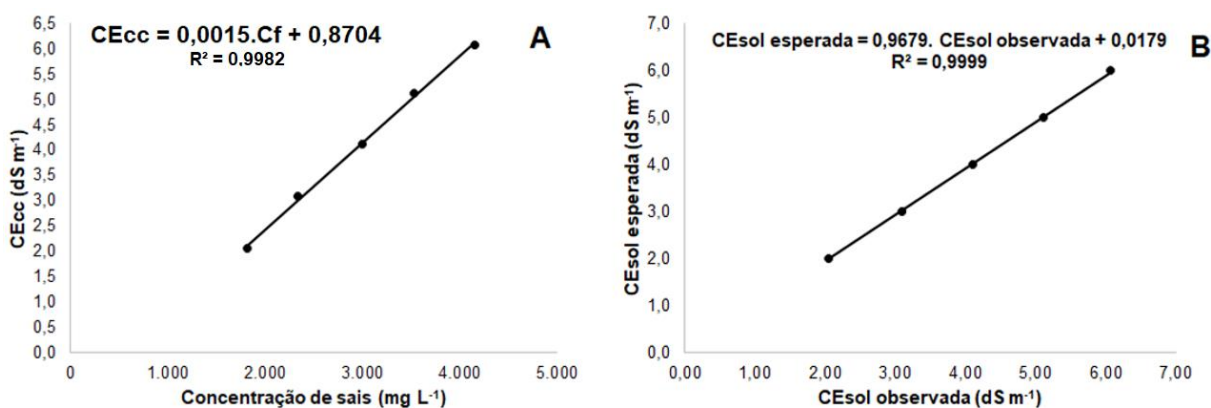


Figura 6. Relação entre a concentração de sais e a condutividade elétrica do solo na capacidade de campo (A) e a relação entre a condutividade elétrica esperada e a CE observada após a adição dos sais (B).

5.4 Caracterização dos sistemas de cultivo

A estrutura foi constituída de 20 unidades experimentais para o cultivo em sistema hidropônico NFT (técnica do fluxo laminar de nutrientes), como mostra a Figura 7. O espaçamento entre plantas foi de 0,30 m. As parcelas foram constituídas por perfis hidropônicos independentes, e reservatórios plásticos de 50 L foram utilizadas para armazenar a solução nutritiva, além de uma eletrobomba para

circulação da mesma, com componentes internos em plástico para evitar o efeito corrosivo da solução nutritiva.

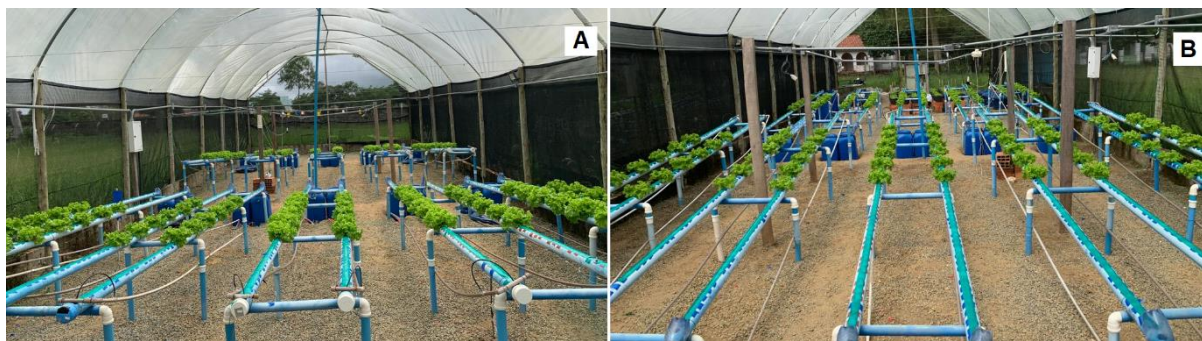


Figura 7. Visão geral da casa de vegetação com as unidades hidropônicas, no experimento de primavera (A) e outono (B).

Foram utilizados tubos de PVC (DN = 75 mm), comprimento de 3,0 m e orifícios espaçados em 0,30 m para montagem dos perfis hidropônicos, instalados sobre cavaletes de PVC com quatro pontos de apoio e uma declividade de 6%. O cavalete de maior altura ficou a 1,0 m da superfície do solo.

O sistema de cultivo em solo foi conduzido juntamente com o sistema hidropônico, com os vasos apoiados em blocos cerâmicos, com uma planta por vaso, mantendo-os próximo do perfil hidropônico. O espaçamento entre plantas foi de 0,30 m.

Foram utilizados 60 vasos plásticos, sendo os recipientes utilizados em formato de tronco de cone, com capacidade de 12,40 L, altura de 0,22 m, diâmetro superior de 0,33 m e inferior 0,20 m. Sua base foi perfurada para dispor de um sistema de drenagem, permitindo a drenagem por meio de uma mangueira transparente revestida com fita aluminizada, com o objetivo de evitar a proliferação de algas. Os primeiros 3 cm dos recipientes foram preenchidos com uma camada de brita lavada nº 2 e recoberta com manta geotêxtil, e posteriormente, preenchidos com o volume de solo.

O solo utilizado foi originado de um perfil proveniente do campus da UFRB, coletado na camada de 0 – 30 cm, classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso (SANTOS *et al.*, 2018), seco ao ar livre, destorroado e peneirado em malha de 5 mm. Após esse processo, os vasos foram preenchidos com o solo e pesados de forma que todos tivessem a mesma massa de solo seco, 12,2 kg de solo por vaso, ocupando

11,4 L do volume total do vaso. Amostras de solo foram coletadas e encaminhadas para o Laboratório de Solos da EMBRAPA Mandioca e Fruticultura para caracterização física, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Características físicas do solo utilizado no experimento.

Profundidade m	Granulometria			Classificação textural	Densidade do solo (d_s)	Densidade de partículas (d_p)	Porosidade total (ϵ) %
	Areia	Silte	Argila				
	-----%-----				-----g cm ⁻³ -----		
0 - 0,30	79,1	2,8	18,1	Franco-arenoso	1,31	2,50	47,60

As análises químicas do solo foram realizadas antes do experimento, no Laboratório de Solos da EMBRAPA Mandioca e Fruticultura. Conforme análise química do solo, foi realizado a correção do pH mediante calagem, com aplicação de calcário dolomítico em cada vaso para elevar a saturação por bases para 75%, realizando-se posteriormente uma nova análise química do solo, conforme Tabela 3.

Tabela 3. Características químicas do solo utilizado no experimento, antes e após calagem.

pH em água	P mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	Ca + Mg	Al	Na	H + Al	SB	CTC	V	MO	
		-----cmol _c dm ⁻³ -----										%	g kg ⁻¹
Antes da calagem													
5,1	1	0,05	0,85	0,40	1,25	0,30	0,03	3,28	1,32	4,60	29	8	
Após calagem													
5,5	1	0,05	2,20	1,80	4,00	0,00	0,03	1,45	4,25	5,70	75	8	

SB – soma de bases; CTC – capacidade de troca de cátions; V – saturação por bases e MO – matéria orgânica.

A adubação de fundação foi baseada nas recomendações de Alvarez e Ribeiro (1999) para alface, conforme Tabela 4, sendo os valores recomendados por área de cultivo convertidos para volume de solo, já que o sistema de cultivo foi em vasos.

Tabela 4. Recomendação mineral de plantio para a cultura da alface (ALVAREZ; RIBEIRO, 1999).

	Nitrogênio (N)	Potássio (K ₂ O)	Fósforo (P ₂ O ₅)
kg ha ⁻¹	160	80	300
g dm ⁻³	0,08	0,04	0,15

Para realizar a calagem do solo foram aplicados 13,4 g de calcário dolomítico por vaso. As fontes de nitrogênio, fósforo e potássio, utilizadas para adubação mineral para o cultivo da alface em solo, foram, respectivamente, a ureia (2,0 g vaso⁻¹), o superfosfato simples (9,4 g vaso⁻¹) e o cloreto de potássio (0,4 g vaso⁻¹).

Antes do início do experimento, um vaso foi montado e preenchido com a brita, a manta e o solo. Esse protótipo foi submetido, em um período de um mês, a processos de irrigação e secagem. Esse processo teve como objetivo permitir que o solo se acomodasse no vaso, criando um arranjo e estrutura, visando reproduzir as reais condições do experimento.

Após esse período, amostras indeformadas de solo foram coletadas nos vasos e encaminhadas para Câmara de Pressão de Richards para obtenção da curva de retenção de água, sendo os dados de umidade e tensão da água no solo relacionados de acordo com a Equação 10, conforme modelo de van Genuchten (1980), obtendo-se a curva de retenção apresentada na Figura 8. Nascimento *et al.* (2022), trabalharam com o mesmo solo e obtiveram valores próximos dos parâmetros da curva de retenção obtida (Tabela 5).

$$\theta = \theta_{RES} + \frac{\theta_{SAT} - \theta_{RES}}{[1 + (\alpha \cdot |\Psi_m|)^n]^m} \quad (10)$$

Em que:

θ_{RES} – umidade residual;

θ_{SAT} – umidade na saturação;

Ψ_m - potencial matricial (mca);

α , m e n – parâmetros empíricos que determinam a forma da curva de retenção de água no solo.

Tabela 5. Parâmetros hidráulicos e da curva de retenção do solo utilizado no experimento.

θ_{SAT} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{RES} (cm ³ cm ⁻³)	α (mca ⁻¹)	n	m	λ	K_s (m dia ⁻¹)	R^2
0,472	0,022	5,50	1,52	0,3421	0,008	0,072	0,9389

K_s – condutividade hidráulica saturada; λ – parâmetro hidráulico empírico.

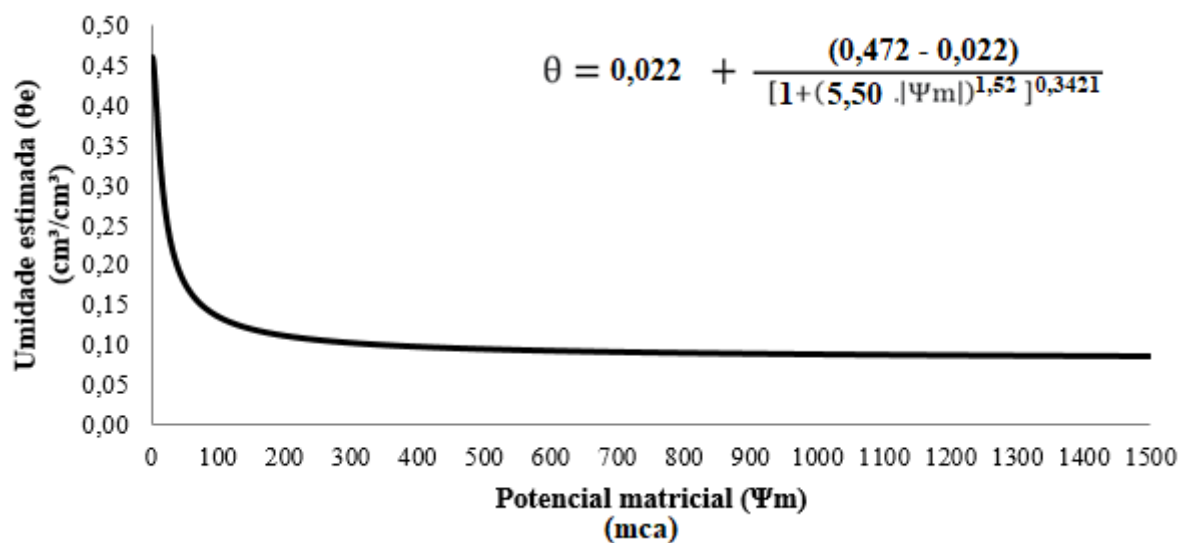


Figura 8. Curva característica de retenção da água do solo do experimento.

No cultivo em solo (Figura 9) na primavera, a irrigação nos vasos foi realizada por gotejamento. Cada tratamento dispôs de um reservatório de 100 L para o armazenamento da solução nutritiva, sendo que na parte inferior do reservatório foi instalado um registro de gaveta, conectado a uma tubulação de 32 mm de diâmetro, que se prolongava até uma bomba centrífuga com potência de 32 W para pressurizar o sistema.



Figura 9. Visão geral da casa de vegetação (A) com as unidades do cultivo em solo e do gotejador autocompensante utilizado (B), no experimento de primavera.

O sistema foi constituído por tubulações plásticas PELBD e diâmetro de 16 mm, com uma linha principal de 2 m, linhas de derivação de 2,1 m, linhas laterais de 0,90 m. Cada linha lateral teve um emissor (gotejador autocompensante) por vaso, com seis emissores por linha, com vazão de 2 L h⁻¹ por emissor, espaçados em 0,30 m, seguindo o espaçamento entre vasos. A baixa vazão aplicada foi importante para evitar percursos preferenciais da água no solo, o que poderia afetar a homogeneidade da salinidade do solo.

No experimento de outono (Figura 10) a irrigação foi realizada manualmente, aplicando-se um volume fixo a cada irrigação. O volume necessário para irrigação foi aplicado gradativamente, simulando o gotejamento e formação do bulbo molhado, além de evitar que a água percorresse caminhos preferenciais. Reservatório de 100 L também foram utilizados para o armazenamento da solução nutritiva.



Figura 10. Visão geral da casa de vegetação com as unidades do cultivo em solo, no experimento de outono.

5.5 Condução da cultura

A cultura utilizada foi a alface (*Lactuca sativa* L.), tipo crespa, procedentes da empresa Sakata®, cv. Jade (AF 7944). A cultivar apresenta alto rendimento, devido ao maior número de folhas por planta, ciclo médio de 52 dias (precoce), cultivo em todo o ano, tolerante ao pendoamento precoce, além de apresentar moderado nível de tolerância ao fungo *Pythium spp* e a *Bremia lactucae* (míldio).

As sementes peletizadas da alface, tanto para o sistema hidropônico como para o cultivo em solo, foram semeadas no dia 01/11/2022 (primavera) e 28/03/2023 (outono), em células cúbicas de espuma fenólica (2 x 2 x 3 cm), com uma semente por célula e cobertas com substrato de fibra de coco. Antes da semeadura, as espumas foram lavadas com água corrente para remoção de possíveis substâncias contaminantes.

A emergência ocorreu três dias após a semeadura (DAS). As plântulas de ambos os sistemas, solo e hidropônico, foram irrigadas inicialmente com água de abastecimento local ($CE_a = 0,30 \text{ dS m}^{-1}$). Aos 6 DAS, as plântulas foram encaminhadas para um berçário tipo NFT de telha plástica ondulada, onde receberam solução nutritiva (Furlani *et al.*, 1999) padrão diluída a 50%.

O transplântio das mudas para o sistema em solo e para as calhas do sistema hidropônico NFT ocorreram 14 DAS, quando as plantas apresentaram de 4 a 5 folhas e uma altura de aproximadamente 9 cm. Logo após o transplântio, iniciou-se a aplicação dos tratamentos, com 100% da solução nutritiva, segundo formulação de Furlani *et al.* (1999). Aos 25 dias após o transplântio (DAT), foi realizada a colheita.

5.6 Tratos culturais

Com relação aos tratos culturais durante os experimentos, foi realizado regularmente o controle de ervas daninhas e brotações indesejáveis dentro da casa de vegetação, realizando-se a capina, evitando que prejudicasse o desenvolvimento vegetativo e conseqüentemente a produtividade. Além disso, foi realizado o controle manual (catação) de pragas, não sendo necessário a aplicação de inseticidas e fungicidas.

5.7 Manejo da fertirrigação

Na hidroponia, durante os experimentos da primavera e outono, o controle do acionamento das eletrobombas foi efetivado utilizando-se temporizador analógico, com a seguinte programação de recirculação da solução nutritiva: circulações programadas em intervalos alternados de 15 min (15 min funcionando e 15 min em repouso) das 6h as 18h; no período noturno as soluções nutritivas foram circuladas a cada 2h, com duração de 15 min cada evento.

As reposições do consumo hídrico, nos reservatórios das soluções nutritivas, foram realizadas manualmente com água doce de abastecimento local ($CE_a = 0,30 \text{ dS m}^{-1}$), havendo, portanto, previsão da salinidade constante ao longo do tempo.

No solo, para determinação da umidade e da tensão do solo na capacidade de campo, utilizou-se a metodologia proposta por Liang *et al.* (2016), método amplamente utilizado por diversos autores (LIAKOS *et al.*, 2016; REYNOLDS, 2018; LENA *et al.*, 2022), que considera o ponto de capacidade de campo como o ponto de interseção das retas tangentes do ponto de inflexão com a reta tangente do ponto de murcha permanente (Figura 11). O cálculo da tensão na capacidade de campo foi baseado nas Equações 11, 12, 13 e 14.

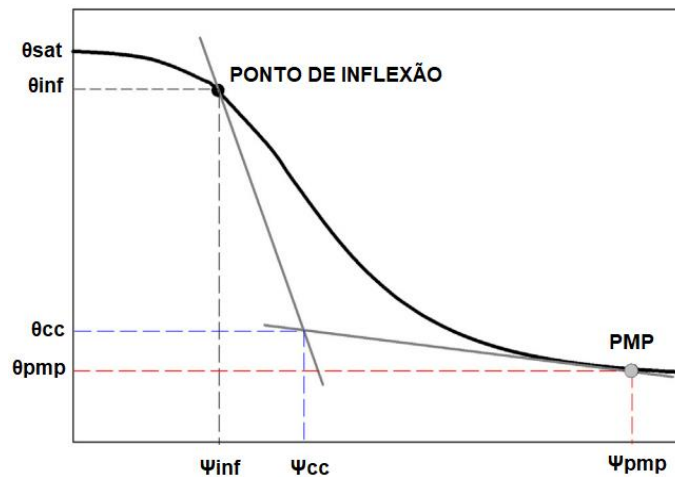


Figura 11. Modelo de van Genuchten com linhas tangentes ao ponto de inflexão e ao ponto de murcha permanente, para identificação da interseção (capacidade de campo) (Adaptado de LIANG *et al.*, 2016).

$$\Psi_{inf} = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(n - \frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (11)$$

Em que:

Ψ_{inf} – tensão da água no solo no ponto de inflexão (mca).

$$S_{inf} = \frac{\alpha^n \cdot (1-n) \cdot (\theta_{sat} - \theta_{pmp}) \cdot (\Psi_{inf}^{(n-1)})}{(1 + (\alpha \cdot \Psi_{inf})^n)^{2 - (1/n)}} \quad (12)$$

Em que:

S_{inf} – inclinação da reta tangente no ponto de inflexão;

θ_{pmp} – umidade do solo no ponto de murcha permanente ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

$$S_{pmp} = \frac{\alpha^n \cdot (1-n) \cdot (\theta_{sat} - \theta_{pmp}) \cdot (\Psi_{pmp})^{(n-1)}}{(1 + (\alpha \cdot \Psi_{pmp})^n)^{2 - (1/n)}} \quad (13)$$

Em que:

S_{pmp} – inclinação da reta tangente no ponto de murcha permanente;

Ψ_{pmp} – tensão da água no solo no ponto de murcha permanente (mca).

$$\Psi_{cc} = \frac{\theta_{pmp} + (S_{inf} \cdot \Psi_{inf}) - (S_{pmp} \cdot \Psi_{pmp}) - \theta_{inf}}{S_{inf} - S_{pmp}} \quad (14)$$

Em que:

Ψ_{cc} – tensão da água no solo na capacidade de campo (mca);

θ_{inf} – umidade do solo no ponto de inflexão ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Com isso, obteve-se a tensão na capacidade de campo equivalente a 0,8365 mca (8,20 kPa), correspondente a umidade de 0,2191 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

A irrigação foi realizada sempre que a umidade crítica foi atingida. A necessidade de irrigação foi calculada com base na Equação 15.

$$NI = \frac{V_s \cdot (\theta_{cc} - \theta_c)}{E_a \cdot (1 - FL)} \quad (15)$$

Em que:

NI – necessidade de irrigação (L);

V_s – volume de solo no vaso (L);

E_a – eficiência de aplicação do gotejador (90%) (decimal);

FL – fração de lixiviação.

A fração de lixiviação adotada, fixada em 10%, segue as recomendações para solos de textura franco-arenosa (CAVALCANTE *et al.*, 2016; MEDEIROS *et al.*, 2016). Esta abordagem visou a manutenção da condutividade elétrica do solo, uma vez que a aplicação desta fração de lixiviação buscou o equilíbrio salino, promovendo a movimentação de elementos dissolvidos para as camadas mais profundas do solo. Essa prática, de certa forma, desencadeou um processo em que a fração de lixiviação atuou como agente propulsor, impelindo os componentes presentes no solo em direção às camadas subsuperficiais. Dessa forma, visou-se estabelecer uma dinâmica equilibrada, na qual a entrada de sais no solo fosse balanceada pela saída na drenagem, promovendo a manutenção de uma concentração salina estável.

No experimento de primavera, a irrigação foi manejada com base na umidade do solo, que foi monitorada por meio de sensores capacitivos de umidade do solo, da marca LIUYI®, modelo v1.2 (Figura 12), instalados a profundidade de 0,12 m da superfície do solo. O sensor capacitivo analógico da umidade do solo mede níveis de umidade do solo pela detecção capacitiva, emitindo um sinal através do sensor que é convertido em valores de umidade (PLACIDI *et al.*, 2020).

Os circuitos dos sensores foram protegidos com resina epóxi, para proteção dos mesmos contra interferências ou ruídos externos ao circuito eletrônico, e a sonda foi revestida com verniz automotivo para reduzir a abrasividade do solo. O cabo original do sensor foi substituído por cabos do tipo “manga”, de 3 vias e 3 m e de comprimento.

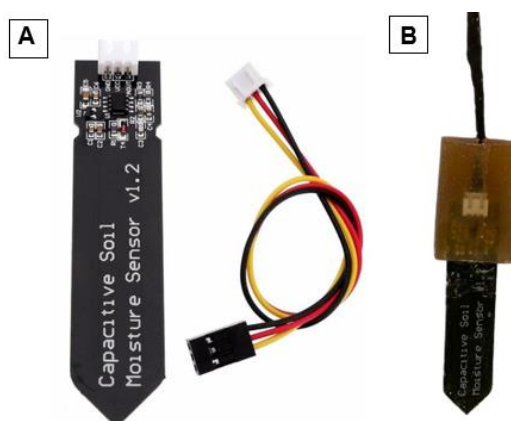


Figura 12. Sensor capacitivo da umidade do solo sem revestimento (A) e o sensor com revestimento epóxi (B) usado para o experimento da primavera.

Para calibrar o sensor, seções de tubos de PVC de 12,5 cm de altura e diâmetro de 75 mm foram preenchidos com solo, tendo em sua base uma tela para drenagem do excesso de água. Foram utilizadas 20 amostras de solo, cada uma contendo um sensor. As amostras foram previamente saturadas, e durante um período de sete dias, foram submetidas a secagem, primeiramente ao ar livre, e posteriormente em estufa com circulação forçada de ar quente, pesando-se as amostras e realizando-se as leituras dos sinais.

Os valores de umidade volumétrica referentes a cada uma das pesagens do conjunto tubo-solo-sonda-tela foram calculados conforme a Equação 16.

$$\theta = d_s \cdot \frac{P_1 - P_2}{P_2} \quad (16)$$

Em que:

θ – umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

P_1 – massa atual do conjunto tubo-solo-sonda-tela (g);

P_2 - massa seca do conjunto tubo-solo-sonda-tela (g);

d_s – densidade do solo (g cm^{-3}).

As leituras realizadas no Arduino relacionavam a umidade do solo com um sinal elétrico (Volt), convertido em uma leitura em bytes. Com as leituras realizadas, gerou-se uma curva de regressão para cada sonda. A Figura 13 mostra a curva de calibração obtida para uma das sondas utilizadas.

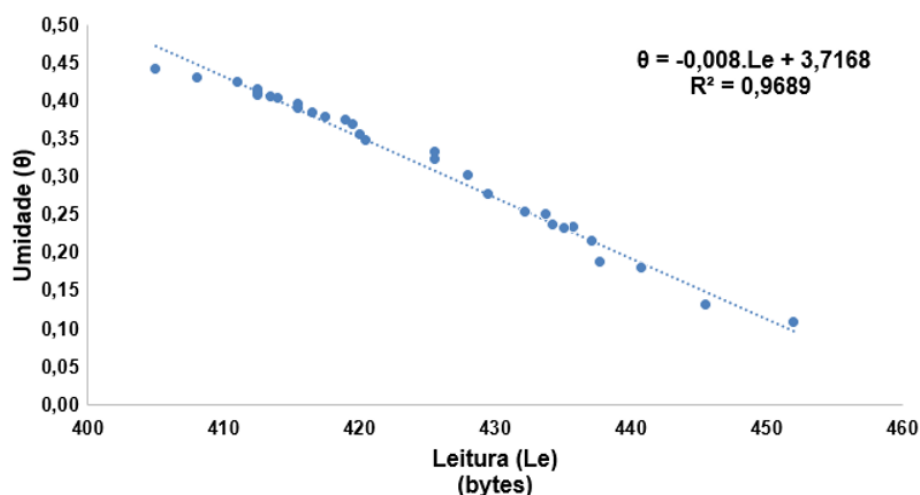


Figura 13. Curva de calibração de um dos sensores capacitivos de umidade do solo utilizado no solo do experimento da primavera.

A programação da irrigação foi feita no Arduino, programado para irrigar o solo sempre que o mesmo atingiu a umidade referente à tensão crítica. As leituras realizadas foram armazenadas em um sistema de aquisição de dados de baixo custo.

Para tensão crítica da alfaca, em sistema de irrigação por gotejamento, adotou-se uma tensão de 20 kPa (SAMMIS, 1980; MAROUELLI, 2008), que corresponde a uma tensão de 2,04 mca, obtendo-se, pela equação apresentada na Figura 8, uma umidade crítica de $0,1489 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

O tempo de irrigação do gotejador, utilizado no experimento de primavera, foi calculado com base na Equação 17.

$$T_i = 60 \cdot \frac{NI}{q_i} \quad (17)$$

Em que:

T_i – tempo de irrigação (minutos);

q_i – vazão do gotejador ($L h^{-1}$).

No experimento de outono o manejo da irrigação foi realizado com base na técnica da reflectometria no domínio do tempo (*time domain reflectometry* - TDR). Foram construídas 15 sondas para uso na TDR, sendo confeccionadas artesanalmente em laboratório. As sondas eram compostas por três hastes, com comprimento da haste de 0,14 m, sendo 0,10 m fora da resina epóxi, com espaçamento entre as hastes de 1,5 cm, com cabos coaxiais de 50 ohms e 0,70 m de comprimento, como mostra a Figura 14.

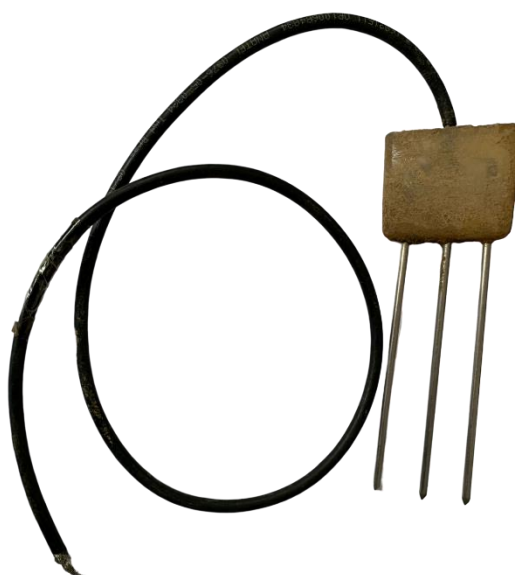


Figura 14. Sondas artesanais utilizadas no experimento de outono.

Após a confecção das sondas, foi realizada a calibração. As sondas foram conectadas a um TDR100 com uso do software PC-TDR (Campbell Scientific. Inc., Logan, Utah, USA), acopladas diretamente ao equipamento ou a um conjunto de multiplexadores de leituras do tipo SMDX, da mesma empresa.

A calibração foi realizada com amostras indeformadas, acondicionadas em tubos de PVC. Inicialmente, as amostras foram saturadas por um período de 24h, e após a saturação, foram instaladas no solo na posição diagonal, e o conjunto tubo-solo-sonda-tela foi encaminhado para pesagem em balança de precisão. Foram realizadas medidas simultâneas da constante dielétrica (K_a) e da massa da amostra em balança de precisão, até o momento que o solo estava totalmente seco. Os valores de umidade volumétrica referentes a cada uma das pesagens do conjunto tubo-solo-sonda-tela foram obtidos de acordo com a Equação 16.

A princípio, as leituras foram realizadas em um curto período de tempo, porém, a medida que ocorria a redução da percolação, as leituras foram realizadas em um maior intervalo de tempo. Quando a umidade do conjunto solo-tubo-sonda-tela se tornou pouco variável, o conjunto foi levado para uma estufa a 105°C para acelerar o processo de secamento.

As sondas foram instaladas a 0,12 m de profundidade do solo e próxima a planta. As leituras foram realizadas diariamente, de forma manual, conectando o cabo coaxial a TDR100. Os dados foram convertidos em umidade com o auxílio da curva de calibração das sondas para o solo utilizado no experimento. A Figura 15 exemplifica a curva de calibração obtida para uma das sondas utilizadas.

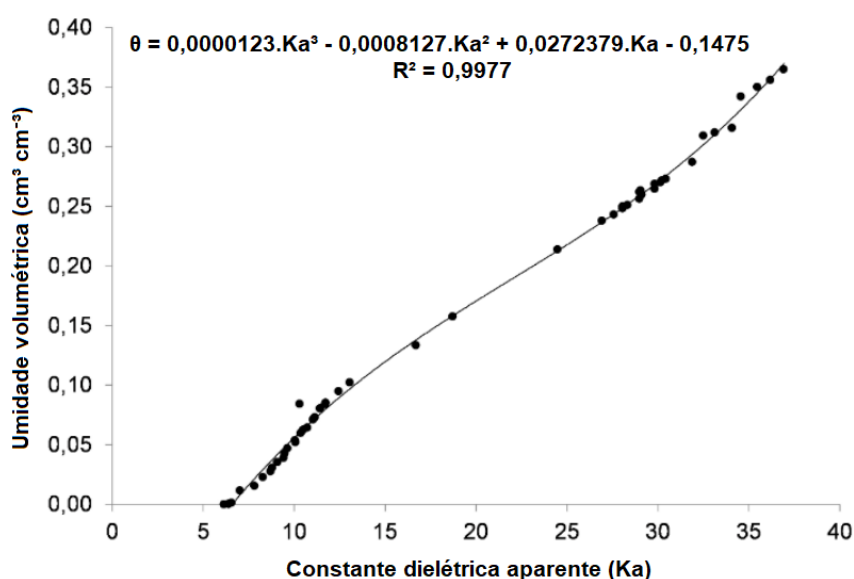


Figura 15. Curva de calibração de uma das sondas utilizadas para obtenção do conteúdo volumétrico de água estimado, em função da constante dielétrica medida pela TDR100.

Para tensão crítica da alface, adotada no experimento de outono, utilizou-se a tensão de 10 kPa (SAMMIS, 1980; MAROUELLI, 2008), que corresponde a uma tensão de 1,02 mca, obtendo-se, pela equação apresentada na Figura 8, uma umidade crítica de 0,2012 cm³ cm⁻³. O volume aplicado a cada irrigação foi calculado com base na Equação 15.

A escolha das diferentes tensões críticas adotadas, nos experimentos de primavera e outono, foi uma estratégia deliberada para investigar o comportamento da alface em relação à salinidade do meio de cultivo em diferentes contextos sazonais. Esta abordagem visou elucidar as possíveis influências das estações, do sistema de cultivo e das tensões críticas sobre a resposta da alface.

5.8 Avaliação da uniformidade de distribuição dos sistemas de irrigação

Visando garantir a confiabilidade do estudo e que todos os tratamentos tenham uma aplicação uniforme das soluções nutritivas, os sistemas foram avaliados quanto a uniformidade de distribuição (CUD).

A uniformidade de aplicação da solução nutritiva nas calhas foi avaliada antes de se iniciar os experimentos. Foram coletadas lâminas aplicadas no sistema em baldes de 5 L em um tempo fixo de 5 minutos. Após a coleta, foi feita a leitura do volume da amostra com o auxílio de uma proveta. Com os dados coletados, foram estimados os CUD para cada tratamento (MANTOVANI *et al.*, 2009).

A uniformidade de aplicação da solução nutritiva nas calhas apresentou coeficientes de distribuição de 96,19; 96,98; 96,23; 97,13 e 96,75% para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente, indicando uma alta eficiência de aplicação. O registro da uniformidade de distribuição da solução nutritiva nos perfis hidropônicos, para os tratamentos avaliados, garante confiabilidade aos estudos, indicando que para todos os tratamentos houve aplicação uniforme.

A determinação da uniformidade de distribuição de água no sistema de gotejamento teve como parâmetro a metodologia de Keller e Karmeli (1974). Foram coletadas as vazões em quatro emissores ao longo da linha lateral, da seguinte forma: o primeiro gotejador, o segundo situado a 1/3, o terceiro a 2/3 do comprimento da linha e o último gotejador.

A vazão foi determinada por meio da coleta, com recipientes, do volume de água aplicado pelo emissor durante o período de dois minutos, e posteriormente a medição do volume coletado por meio de uma proveta graduada. Para o cálculo do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), foi utilizado a Equação 18.

$$\text{CUD} = 100. \left(\frac{q_{25\%}}{q_m} \right) \quad (18)$$

Em que:

$q_{25\%}$ - média de 25% dos menores valores de vazões observadas (L h^{-1});

q_m - vazão média dos gotejadores (L h^{-1}).

No experimento de primavera, a uniformidade de aplicação das soluções pelos gotejadores apresentou coeficientes de distribuição de 97,00; 96,93; 97,06; 97,33 e 97,78% para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente, indicando uma alta eficiência de aplicação.

5.9 Manejo e monitoramento da CE, pH e temperatura do meio de cultivo

O manejo da salinidade foi realizado acompanhando-se a evolução da salinidade nos tratamentos, realizando-se medições periódicas no reservatório da solução nutritiva do sistema hidropônico NFT, com uso de condutivímetro portátil, a cada dois dias. Caso houvesse redução da CE da solução em $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ devido ao consumo de nutrientes, seria realizada a reposição dos nutrientes para elevar a CE ao valor desejado, como recomendado por Bione (2017), porém, tal fato não ocorreu.

Com essa mesma frequência, foi monitorado o pH da solução nutritiva com pHmetro portátil. Se constatado que o pH estava fora da faixa ideal para a cultura (5,5 – 6,5), a correção foi realizada com a aplicação de ácido ou solução alcalina.

A temperatura da solução nutritiva foi monitorada utilizando-se um medidor de temperatura DS18B20, com intervalos de medição a cada 2 segundos e médias a cada 10 minutos. Foram utilizados oito sensores de temperatura, em diferentes blocos, instalados nos reservatórios de retorno da solução nutritiva. Os dados foram armazenados em um cartão SD conectado a um Arduino.

Com os valores obtidos da temperatura da solução nutritiva dos sensores, juntamente com os valores da CE obtidos com o condutivímetro portátil com compensação de temperatura para 25°C , obteve-se a CE equivalente a temperatura

atual da leitura. A conversão foi realizada isolando-se a CE_i da Equação 4, sendo rearranjada para Equação 19.

$$CE_i = CE_{25} \cdot [1 + \alpha \cdot (T - 25)] \quad (19)$$

A salinidade do solo foi medida a cada três dias após a irrigação, com o uso de extratores para obtenção da solução do solo. Os extratores de solução do solo foram construídos com um tubo de PVC, acoplado a uma cápsula de cerâmica porosa na extremidade inferior e vedado com uma borracha na extremidade superior. A retirada da solução dos extratores foi feita com uma seringa conectada a uma mangueira. Posteriormente as amostras foram armazenadas em recipientes plásticos previamente lavados e identificados para, em seguida, realizar-se as leituras da CE da solução do solo com o auxílio de um condutivímetro portátil.

Para se obter a CE do solo na capacidade de campo e na umidade crítica, foi realizada a conversão utilizando-se a relação apresentada na Equação 20.

$$CE_i \cdot \theta_i = CE_{cc} \cdot \theta_{cc} = CE_c \cdot \theta_c \quad (20)$$

Em que:

CE_i - condutividade elétrica instantânea (dS m⁻¹);

θ_i – umidade do solo instantânea (decimal);

CE_{cc} – condutividade elétrica da umidade na capacidade de campo (dS m⁻¹);

CE_c - condutividade elétrica na umidade crítica (dS m⁻¹).

Durante o experimento, a aplicação do vácuo de -80 kPa aos extratores se deu 2 h após a irrigação, momento em que era verificada a umidade do solo (FRANCISCO, 2014), e as soluções foram coletadas 24 h após a aplicação do vácuo (GOMES, 2005).

Devido ao consumo de nutrientes e ao poder tampão do solo, foi conduzida uma irrigação excessiva com elevada fração de lixiviação (20%) sempre que a CE for reduzida a 25% do valor original previamente estabelecido. Quando ocorreu essa redução na CE, foi adicionada uma nova solução salina de ajuste da condutividade elétrica da solução do solo, diferente das pré-determinadas, com base nos valores de CE_{es} obtidos, corrigindo a salinidade das parcelas experimentais visando obter os níveis desejados. A correção foi calculada por meio da fórmula de mistura de soluções, de acordo com a Equação 21.

$$V_{cc}.CE_{esd} = V_a.CE_a + V_r.CE_c \quad (21)$$

Em que:

V_{cc} – volume de água armazenado no solo a capacidade de campo (L);

CE_{esd} – condutividade elétrica do extrato de saturação do solo desejada ($dS\ m^{-1}$);

V_a – volume atual de água armazenado no solo (L);

CE_a – condutividade elétrica atual do solo ($dS\ m^{-1}$);

V_r – volume de água no solo necessário para se atingir a capacidade de campo (L);

CE_c – condutividade elétrica da solução de correção para se atingir a CE_{esd} ($dS\ m^{-1}$).

A cada dois dias foi medido o pH do solo com o auxílio de um pHmetro de solo, modelo HI99121 (HANNA *Instruments*®), com os valores de pH do solo obtidos instantaneamente e automaticamente com a introdução do eletrodo no solo.

A temperatura do solo foi monitorada utilizando-se o mesmo medidor de temperatura utilizado na hidroponia, o DS18B20. Foram utilizados oito sensores de temperatura, em diferentes blocos, instalados a 0,12 m de profundidade da superfície do solo. Os dados foram armazenados em um cartão SD conectado a um Arduino.

De forma análoga à hidroponia, com a temperatura obtida das leituras dos sensores, juntamente com a CE da solução do solo extraída com os extratores, lidos com o condutivímetro portátil, converteu-se o valor da CE a 25°C para o valor correspondente a temperatura atual, conforme Equação 19.

5.10 Controle da salinidade nos sistemas

O controle da salinidade, em ambos sistemas de cultivo, foi realizado com as medições periódicas da CE, sendo calculado a variação percentual da salinidade (D_t) em cada tratamento (Equação 22), a média ponderada da salinidade (CE_p) no tempo (Equação 23) e o afastamento entre as salinidades médias ponderadas e inicial (D_p) para cada tratamento (Equação 24).

$$D_t = \left(100 \cdot \frac{CE_{final}}{CE_{inicial}} \right) - 100 \quad (22)$$

Em que:

D_t – variação percentual da salinidade ao final do ciclo para um dado tratamento (%);

CE_{final} – média da salinidade medida ao final do ciclo ($dS\ m^{-1}$);

$CE_{inicial}$ – média da salinidade medida ao início do ciclo ($dS\ m^{-1}$).

$$CE_p = \frac{\sum CE_i \cdot \Delta T_i}{\sum \Delta T_i} \quad (23)$$

Em que:

CE_p – salinidade ponderada no tempo ($dS\ m^{-1}$);

CE_i – condutividade elétrica da solução na i-ésima leitura ($dS\ m^{-1}$);

i – número de leituras (adimensional);

ΔT – intervalo de tempo que se assume constante a CE_i (dias).

$$D_p = \left(100 \cdot \frac{CE_p}{CE_{inicial}} \right) - 100 \quad (24)$$

Em que:

D_p – diferença percentual da salinidade ponderada em relação a salinidade inicial (%).

5.11 Análise visual de sintomas

Diariamente as plantas foram observadas quanto ao aparecimento de sintomas e alterações para possível detecção de estresse salino pelos tratamentos, buscando-se visualizar sinais de toxidez, deficiência nutricional ou estresse hídrico.

Foi observado o surgimento de sintomas nas folhas quanto a deformação e rugosidade, murcha temporária ou permanente, intensidade da cor, surgimento de clorose, necrose e abscisão.

5.12 Análises biométricas da planta

5.12.1 Crescimento vegetativo

As variáveis de crescimento foram avaliadas no momento da colheita, aos 25 DAT, quais sejam: altura da planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF) e área foliar total (AF).

5.12.1.1 Altura da planta

A altura da planta (cm) foi medida com uma trena, considerando a altura do colo da planta até a altura da maior folha.

5.12.1.2 Diâmetro do caule

O diâmetro do caule (mm) foi medido no colo da planta próximo ao solo, com o auxílio de um paquímetro digital.

5.12.1.3 Número de folhas

Para contagem do número de folhas, considerou-se apenas as folhas com no mínimo 50% de sua área fotossinteticamente ativas e não danificadas. Na contagem, não foram consideradas as folhas que perderam sua massa em quase sua totalidade devido à queima dos tecidos, supostamente pela presença dos sais.

5.12.1.4 Área foliar

A área foliar (cm²) total foi estimada no momento da colheita, com o auxílio de um integrador portátil tipo scanner, modelo CI-202 CID Bio-Science.

5.12.2 Variáveis de produção

5.12.2.1 Massa de matéria fresca

Foi realizada uma análise destrutiva da planta. A região do colo da planta foi cortada e a parte aérea imediatamente pesada em balança de precisão (0,01 g) para obtenção da massa de matéria fresca da parte aérea (MFPA).

5.12.2.2 Massa de matéria seca

Após pesagem e obtenção das massas de matéria frescas, a planta foi acomodada em sacos de papel e colocadas em estufa com circulação forçada de ar quente para secagem a 65°C durante três dias para remoção completa da umidade. Após esse processo, pesou-se novamente para obtenção da massa de matéria seca da parte aérea (MSPA).

5.12.2.3 Produtividade relativa

A produtividade relativa (Y_r) da alface, em cada nível de salinidade dos tratamentos, foi calculada em relação ao tratamento controle, conforme Equação 25.

$$Y_r = 100 \cdot \left(\frac{MFPA_{\text{tratamento}}}{MFPA_{\text{controle}}} \right) \quad (25)$$

Em que:

Y_r – produtividade relativa (%);

MFPA_{tratamento} – massa de matéria fresca da parte aérea de um dado tratamento (g);

MFPA_{controle} – massa de matéria fresca da parte aérea do tratamento controle (g).

5.13 Teor de água nas folhas

O teor de água (TA) nas folhas, dado em %, foi calculado com base na massa de matéria fresca da parte aérea da planta, conforme Equação 26.

$$TA = 100 \cdot \frac{(MFPA - MSPA)}{MFPA} \quad (26)$$

5.14 Consumo hídrico e volume evapotranspirado

Na hidroponia, o consumo hídrico (CH) foi registrado diariamente, a partir das leituras do nível da água nos reservatórios da solução nutritiva, calculado mediante a Equação 27.

$$CH = \frac{10^3 \cdot (L_f - L_i) \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot n \cdot \Delta T} \quad (27)$$

Em que:

CH – consumo hídrico na hidroponia (L planta⁻¹ dia⁻¹);

L_f – leitura final do nível da água no reservatório (m);

L_i – leitura inicial do nível da água no reservatório (m);

D – diâmetro interno do reservatório (m);

ΔT – intervalo de tempo entre as leituras (dias);

n - número de plantas no perfil no intervalo de tempo ΔT.

No solo, os volumes evapotranspirados (V_{ET}) foram computados a cada irrigação, obtendo-se o volume evapotranspirado acumulado pela somatória dos volumes aplicados ao longo de todo o ciclo da cultura.

5.15 Eficiência do uso de água e produtividade de água

Na hidroponia, foram computados em planilha as quantidades de água consumidas diariamente pelas plantas, em volume, bem como o acumulado, calculando-se a eficiência do uso de água (EUA) pela relação entre a massa de matéria fresca da parte aérea e o volume efetivamente consumido de água em cada tratamento, como mostra a Equação 28.

$$EUA = \frac{MFPA}{CH} \quad (28)$$

Em que:

EUA – eficiência do uso de água na hidroponia (kg m^{-3});

MFPA – produção de massa de matéria fresca da parte aérea (kg).

No solo, calculou-se a produtividade de água pela relação entre a massa de matéria fresca da parte aérea e o volume efetivamente evapotranspirado acumulado em cada tratamento, como mostra a Equação 29.

$$PA = \frac{MFPA}{VET} \quad (29)$$

Em que:

PA – produtividade de água no solo (kg m^{-3});

MFPA – produção de massa de matéria fresca da parte aérea (kg).

5.16 Análise de solutos inorgânicos

Com a matéria seca das folhas, realizou-se a trituração para a determinação dos teores de solutos inorgânicos. Para a determinação dos teores de Na^+ , K^+ e Cl^- , os extratos foram preparados em tubos de ensaio, com 100 mg do material seco das folhas e 10 mL de água deionizada (JONES JUNIOR, 2001).

Os tubos foram mantidos à temperatura de 100°C , em banho-maria, durante 1 h. Após este período, os tubos foram centrifugados, à temperatura ambiente. No extrato foram determinados os teores de Na^+ e K^+ por fotometria de chama (FAITHFULL, 2002), em fotômetro modelo Q498M2 (QUIMIS, Diadema, SP, BR), e o teor de Cl^- por espectrofotometria (JONES JUNIOR, 2001), em espectrofotômetro modelo 2000 UV (BEL PHOTONICS, Piracicaba, SP, BR).

5.17 Tolerância da cultura à salinidade

Para determinação da tolerância da cultura à salinidade, foram empregados os valores de produções relativas, acumuladas aos 25 DAT para produção total. Para avaliação da tolerância das plantas, considerou-se, para todos os tratamentos, no cultivo hidropônico e em solo, a condutividade elétrica real do meio de cultivo, já que neste caso é importante considerar a condição real da salinidade na zona radicular (SONNEVELD, 2004).

5.17.1 Modelo de Maas e Hoffman

O modelo de tolerância das plantas à salinidade proposto por Maas e Hoffman (1977), também denominado de ‘função linear três-peças’ (platô-limiar-inclinação), se caracteriza por possuir um platô para produção relativa de 100%, com subsequente decréscimo linear e condutividade elétrica na qual a produção é zero. Para cálculo da salinidade limiar (SL) da cultura da alface, para os dois sistemas de cultivo (hidropônico e solo), a Equação 30 foi aplicada com as respectivas três fases do modelo.

$$Y_r = \begin{cases} 1 & ; 0 < CE \leq SL \\ 1 - b(CE - SL) & ; SL < CE < CE_o \\ 0 & ; CE \geq CE_o \end{cases} \quad (30)$$

Em que:

Y_r – rendimento relativo potencial (%);

CE – condutividade elétrica do meio de cultivo ($dS\ m^{-1}$);

SL – salinidade limiar da cultura, que corresponde ao valor da condutividade elétrica do meio de cultivo a partir do qual se inicia a redução da produtividade relativa potencial ($dS\ m^{-1}$);

b – diminuição do rendimento por aumento unitário da CE acima do valor SL (%) ($dS\ m^{-1}$)⁻¹;

CE_o – condutividade elétrica do meio de cultivo no qual a produção é nula ($dS\ m^{-1}$).

5.17.2 Modelo de Steppuhn

Também foi utilizado o modelo proposto por Steppuhn *et al.* (2005a), também denominada de ‘função de desconto modificada’, que propõe que a resposta do rendimento das culturas expostas à salinidade apresenta um comportamento sigmoideal, conforme Equação 31. O modelo não apresenta o valor de salinidade limiar para a produção relativa igual a 100%, os autores trabalham com o conceito de condutividade elétrica referente a 50% da produção relativa.

$$Y_r = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{CE}{CE_{50}}\right)^{\exp(S \cdot CE_{50})}\right]} \quad (31)$$

Em que:

CE_{50} – nível de salinidade correspondente a 50% do rendimento dos tratamentos salinos em função do tratamento controle ($dS\ m^{-1}$);

S – diminuição do rendimento por aumento unitário da CE (%) ($dS\ m^{-1}$)⁻¹.

Com a combinação dos parâmetros do modelo, obtém-se um índice de tolerância à salinidade (ST-Index). O índice consiste na redução de 50% no rendimento da cultura (CE_{50}) mais a tendência que mantém algum rendimento no produto à medida que a cultura é submetida a níveis crescentes de salinidade que se aproximam de CE_{50} , como mostra a Equação 32.

$$ST-Index = CE_{50} + S.CE_{50} \quad (32)$$

5.17.3 Modelo de platô com queda exponencial

Esse modelo se caracteriza por possuir um platô, com CE para produção relativa de 100%, com subsequente decréscimo exponencial (BIONE, 2017). A Equação 33 apresenta a formulação do modelo e suas fases.

$$Y_r = \begin{cases} Y_l & ; CE \leq SL \\ Y_i + (Y_l - Y_i)e^{-k(CE-SL)} & ; CE \geq SL \end{cases} \quad (33)$$

Em que:

Y_l – valor médio da produtividade relativa obtido até a SL (platô superior) (decimal);

Y_i – valor inferior da produtividade relativa estimado para CE tendendo ao infinito (platô inferior) (decimal);

k – constante expressa na unidade inversa à da condutividade elétrica do meio de cultivo ($dS\ m^{-1}$)⁻¹.

5.17.4 Modelo de van Straten

Proposto por van Straten *et al.* (2019), o modelo consiste em simples modificações nas equações e fases dos modelos de Maas e Hoffman (1977) e van Genuchten e Hoffman (1984), considerando a adoção do rendimento relativo a 90% como parâmetro de tolerância (CE_{90}). As Equações 34 e 35 representam o modelo modificado de Maas e Hoffman (1977), e as Equações 36 e 37 o modelo modificado de van Genuchten e Hoffman (1984).

$$Y_r = \begin{cases} 1 - f_{nn} & ; \quad CE \leq CE_{nn} \\ 1 - f_{nn} - b(CE - CE_{nn}); CE_{nn} < CE < CE_{nn} + \frac{(1-f_{nn})}{b} & \\ 0 & ; \quad CE \geq CE_{nn} + \frac{(1-f_{nn})}{b} \end{cases} \quad (34)$$

$$f_{nn} = \frac{100-nn}{100} \quad (35)$$

Em que:

f_{nn} – constante (decimal);

nn – porcentagem desejada do rendimento (%), onde $0 < nn \leq 100$;

CE_{nn} – condutividade elétrica associada ao rendimento desejado (nn) ($dS\ m^{-1}$).

Para $nn = 100$ e $f_{nn} = 0$, a CE_{nn} é igual a SL , produzindo o modelo original, proposto por Maas e Hoffman (1977).

$$Y_r = \frac{1}{\left[1 + g_{nn} \left(\frac{CE}{CE_{nn}}\right)^p\right]} \quad (36)$$

$$g_{nn} = f_{nn} \cdot \left(\frac{100}{nn}\right) \quad (37)$$

Em que:

g_{nn} - constante (decimal);

p – constante empírica.

5.17.5 Ajustes dos dados para os modelos de tolerância à salinidade

Os ajustes dos dados aos modelos testados foram feitos de acordo com a observação do comportamento dos dados nos gráficos de resposta, seu significado agrônomo, a significância estatística de seus termos e o coeficiente de determinação. Os parâmetros dos modelos foram analisados com a ferramenta computacional “Solver” do Microsoft Excel, para minimização do somatório dos quadrados dos desvios. O método selecionado para a solução com essa ferramenta foi o “GRG não linear”, com convergência de 0,0001, com a opção de tornar não negativa todas as variáveis irrestritas.

5.17.6 Simulação da tolerância à salinidade em diferentes abordagens

Para verificar o impacto das parametrizações propostas no presente trabalho, realizou-se simulações da tolerância da cultura à salinidade a partir dos dados obtidos, considerando a inclusão/exclusão dos fatores temperatura e variação de umidade do

solo, para verificação da influência sobre a CE_{real} de cada tratamento. Posteriormente, aplicou-se as CE 's obtidas para cada tratamento aos modelos de tolerância avaliados.

A simulação da tolerância à salinidade, no cultivo hidropônico, e os respectivos parâmetros considerados, foi:

- Simulação hidroponia (SH): obtenção da tolerância da cultura à salinidade com os valores de CE dos tratamentos ponderada ao longo do tempo, sem descompensação de temperatura, ou seja, considerando que a temperatura da solução nutritiva ao longo de todo o ciclo manteve-se a 25°C.

A simulação da tolerância à salinidade, no cultivo em solo, e os respectivos parâmetros considerados, foram:

- Simulação solo 1 (SS_1): obtenção da tolerância da cultura à salinidade com os valores de CE dos tratamentos ponderada ao longo do tempo, considerando a variação de umidade do solo, sem descompensação de temperatura;
- Simulação solo 2 (SS_2): obtenção da tolerância da cultura à salinidade com os valores de CE dos tratamentos ponderada ao longo do tempo, simulando a utilização do método do extrato de saturação do solo, considerando que a quantidade de água aplicada para obtenção do extrato equivale a porcentagem da porosidade total do solo, sem descompensação de temperatura;
- Simulação solo 3 (SS_3): obtenção da tolerância da cultura à salinidade com os valores de CE dos tratamentos ponderada ao longo do tempo, simulando a utilização do método do extrato de saturação do solo, considerando que a quantidade de água aplicada para obtenção do extrato equivale a porcentagem da porosidade total do solo, com descompensação de temperatura.

5.18 Análise estatística

Inicialmente todos os dados foram tabulados e processados em planilhas eletrônicas, para posterior confecção dos gráficos. Foi realizado a aplicação do Teste F da análise de variância (ANAVA), analisando-se os dados separadamente em cada sistema de cultivo, para avaliação da significância da condutividade elétrica do meio de cultivo. Quando significativa pela ANAVA, o fator condutividade elétrica do meio de cultivo foi avaliada mediante análise de regressão, selecionando-se os modelos de acordo com a significância de seus termos, no coeficiente de determinação e no

significado agrônômico do comportamento. A análise estatística foi realizada com o auxílio do programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2019).

É fundamental ressaltar que a comparação das respostas da cultura à salinidade, realizada entre os sistemas de cultivo hidropônico e em solo, não foi estritamente estatística, mas categórica. Isso se deve à natureza intrinsecamente diferente desses sistemas, o que torna desafiador estabelecer comparações estatísticas diretas.

Para as variáveis cuja resposta à salinidade do meio de cultivo for definida por uma equação do 1º grau (Equação 38), foi estimada a redução linear relativa com base nos coeficientes da função, conforme Equação 39.

$$f(x) = m \cdot x + q \quad (38)$$

$$\alpha_i = 100 \cdot \frac{m}{q} \quad (39)$$

Em que:

α_i - redução linear relativa da variável i para cada acréscimo unitário na salinidade do meio de cultivo (%);

m - coeficiente angular da equação ajustada para a variável i ;

q - coeficiente linear da equação ajustada para a variável i .

Para as variáveis cuja relação de dependência com a condutividade elétrica do meio de cultivo foi melhor ajustada por modelos polinomiais de segundo grau, os pontos de máxima e de mínima resposta foram obtidos pela derivada primeira das equações.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 pH, temperatura e condutividade elétrica do meio de cultivo

Na Figura 16, observa-se o comportamento do pH da solução nutritiva no sistema hidropônico (Figura 16A) e da solução do solo (Figura 16B), durante o experimento de primavera, e da solução nutritiva (Figura 16C) e da solução do solo (Figura 16D) durante o experimento de outono.

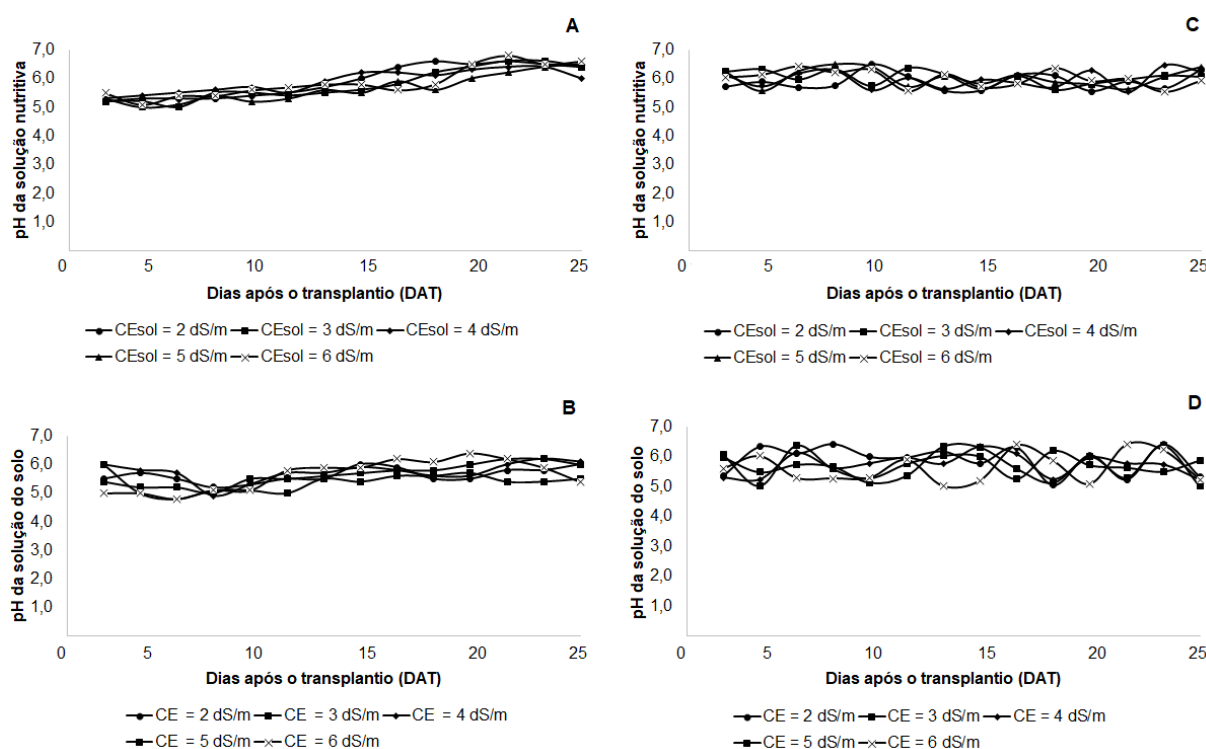


Figura 16. Variação dos valores de pH da solução nutritiva do sistema hidropônico (A) e da solução do solo (B) durante o experimento de primavera e do pH da solução nutritiva do sistema hidropônico (C) e da solução do solo (D) durante o experimento de outono, ao longo dos ciclos da alface, em função das condutividades elétricas dos tratamentos.

Durante o experimento de primavera, os valores de pH no sistema hidropônico se mantiveram constantes até aproximadamente os 12 dias após o transplantio (DAT), tendo uma maior variação no final do experimento, já no solo os valores de pH tiveram variações significativas nos primeiros dias, estabilizando-se e com pequenas variações até o final do ciclo. No experimento de outono, observou-se variações mais significativas no cultivo em solo do que na hidroponia. Em geral, nos experimentos de

primavera e outono, observou-se que os valores de pH se mantiveram entre 5,5 e 6,5, faixa ideal recomendada para o cultivo de hortaliças folhosas.

As variações de pH nas soluções do meio de cultivo são comuns e são decorrentes das altas temperaturas, pH da água, e liberação de OH^- ou H^+ pelas raízes, causando alterações na concentração dos nutrientes. Soluções em que há a presença de fertilizantes amoniacais em sua formulação, podem sofrer alterações bruscas de pH (FURLANI, 1998).

Na Figura 17, apresenta-se o comportamento da temperatura da solução nutritiva da hidroponia (Figura 17A) e da rizosfera (Figura 17B) ao longo do experimento de primavera, bem como a variação de temperatura da solução nutritiva da hidroponia (Figura 17C) e da rizosfera (Figura 17D) ao longo do experimento de outono.

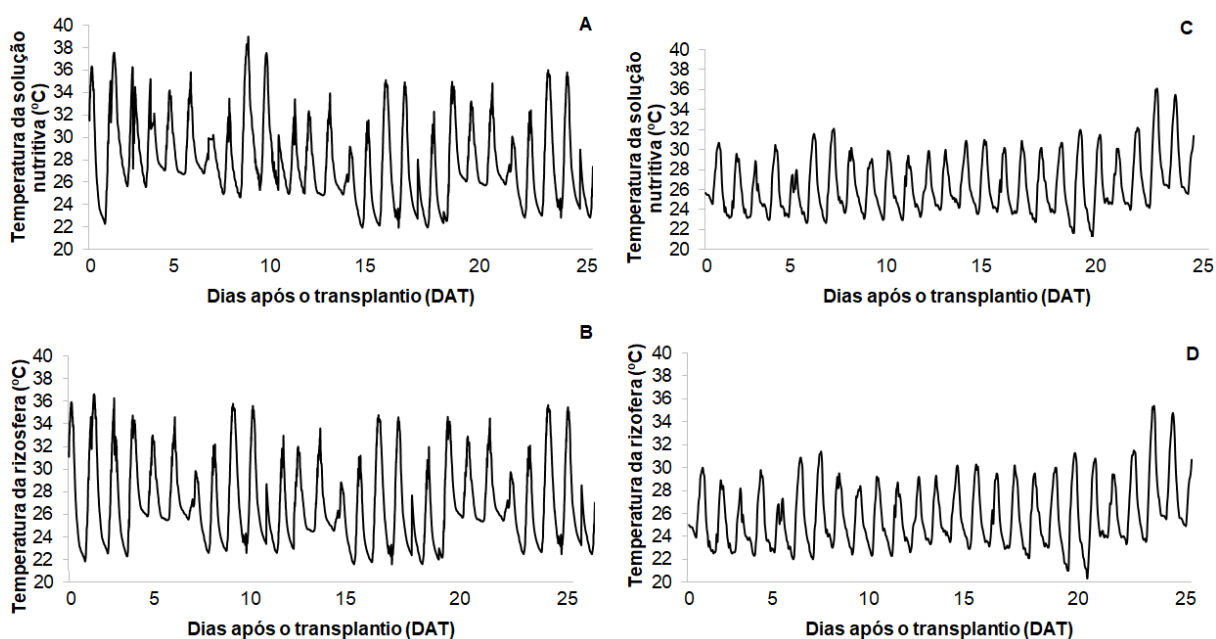


Figura 17. Comportamento da variação de temperatura da solução nutritiva (A) e da rizosfera (B) ao longo do experimento de primavera, e oscilação da temperatura da solução nutritiva (C) e da rizosfera (D) no experimento de outono.

Durante o experimento de primavera, desde o transplântio até o momento da colheita, no sistema hidropônico as temperaturas da solução nutritiva (Figura 17A) oscilaram entre a mínima de 21,9°C e a máxima de 39,0°C, com média de 27,8°C. No

cultivo em solo, as temperaturas da rizosfera (Figura 17B) oscilaram entre a mínima de 21,6°C e a máxima de 36,6°C, com média de 26,9°C.

No experimento de outono, desde o transplântio até o momento da colheita, as temperaturas da solução nutritiva da hidroponia (Figura 17C) oscilaram entre a mínima de 21,0°C e a máxima de 36,1°C, com média de 26,5°C. No cultivo em solo, as temperaturas da rizosfera (Figura 17D) oscilaram entre a mínima de 20,3°C e a máxima de 35,6°C, com média de 25,4°C.

De modo geral, considera-se a temperatura ideal da solução nutritiva na faixa de 20 a 25°C (CARRIJO *et al.*, 2000). Porém, outros estudos (SILVA *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2020b) também registraram altas temperaturas das soluções nutritivas da hidroponia nos horários mais quentes do dia, com valores acima de 30°C, obtendo-se produções satisfatórias. Ao aumentar a temperatura da solução, aumenta-se a solubilidade dos fertilizantes, resultando em mais íons dissociados e conseqüente elevação da salinidade da solução (RODRIGUES, 2002).

A solubilidade da maioria dos sais fertilizantes são afetados pela temperatura, porém, para o cloreto de sódio (NaCl), a temperatura não exerce influência sobre a sua solubilidade (PIZARRO, 1985; FERREIRA *et al.*, 2016). Logo, a influência da temperatura sobre solubilidade dos sais das soluções do solo e da hidroponia, observados no presente estudo, podem ser atribuídas ao nitrato de cálcio, nitrato de potássio e pelo fosfato monoamônico (MAP), presentes na formulação proposta por Furlani (1998), os demais sais presentes na formulação não tem suas respectivas solubilidades influenciadas pela temperatura.

Na Figura 18 é apresentado o monitoramento da CE_{sol} do sistema hidropônico ao longo do experimento de primavera, com compensação automática de temperatura para 25°C. Observa-se pequenas variações nos valores de CE_{sol} ao longo do ciclo, fato devido à reposição do consumo hídrico ter sido realizada com água doce de abastecimento público local ($CE = 0,3 \text{ dS m}^{-1}$), além da alta disponibilidade de volume de solução nutritiva, que foi de $8,33 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, dentro da faixa recomendada. Segundo Makishima e Carrijo (2000), o volume recomendado para plantas de porte menor, como a alface, é de no mínimo de 0,5 a $1,5 \text{ L planta}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

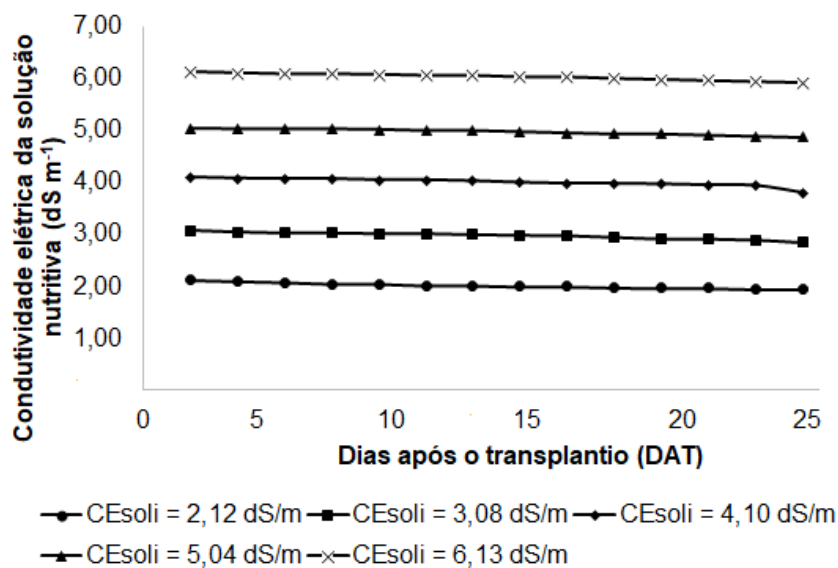


Figura 18. Valores da condutividade elétrica da solução nutritiva (CE_{sol}) da hidroponia, compensados para 25°C , durante o experimento de primavera com a alface.

Com isso, não houve preocupação com a manutenção dos nutrientes em solução, visto que os mesmos não reduziram a CE para 25% do valor original, como recomendado por Bione (2017), não havendo necessidade de reposição ou troca da solução. No presente estudo, as reduções observadas, sem descompensação de temperatura, foram de 8,02; 7,47; 7,32; 3,17 e 3,43%, para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente. Essa prática de reposição dos nutrientes quando a CE é reduzida em 25% do valor original é mais próxima da realidade dos produtores, não comprometendo a disponibilidade de nutrientes para o crescimento das culturas.

Com os valores apresentados na Figura 18, obteve-se a CE ponderada no tempo para cada tratamento, com valores médios de 2,02; 2,98; 4,01; 4,98 e 6,03 dS m^{-1} . Com os valores de temperatura da solução nutritiva (Figura 17A), descompensou-se a CE da temperatura de 25°C para os valores reais de temperatura da solução nutritiva, relacionando os valores de CE das médias ponderadas com os valores de temperatura obtidos a cada 10 minutos ao longo do experimento.

Na Figura 19, apresenta-se o comportamento da condutividade elétrica da solução nutritiva do sistema hidropônico, com a descompensação de temperatura, ou seja, associando os valores de CE_{sol} ponderada com as temperaturas reais (Figura 17B) ao longo do tempo.

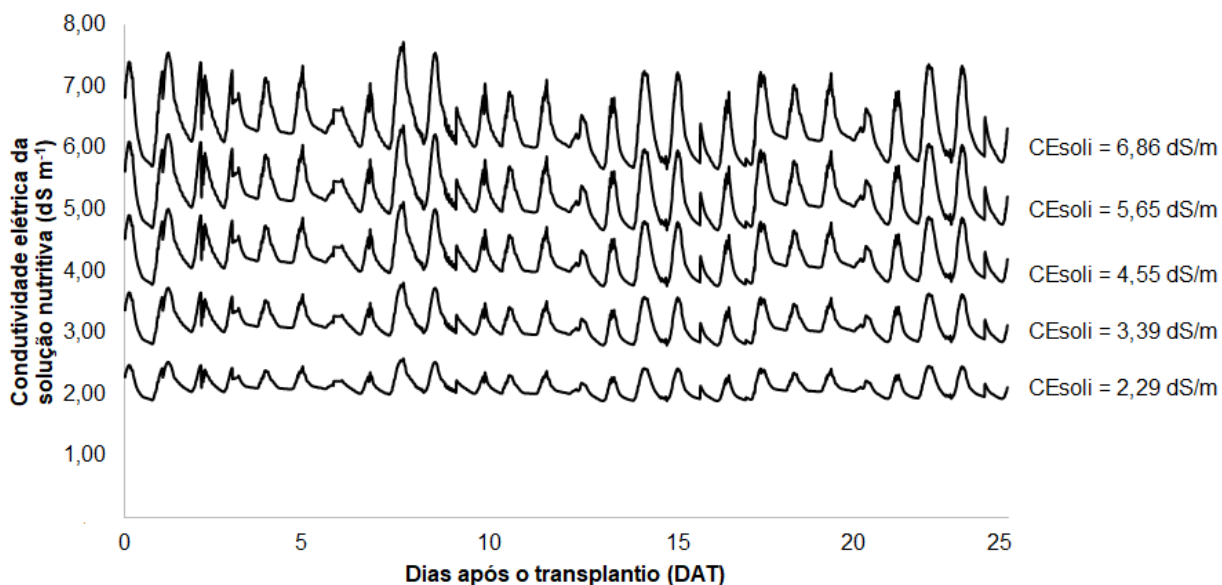


Figura 19. Valores estimados de condutividade elétrica da solução nutritiva (CE_{sol}) da hidroponia, com descompensação de temperatura no experimento de primavera.

Aceita-se que a condutividade elétrica do meio de cultivo, associada à temperatura real, reflita melhor a variação da concentração iônica do meio de cultivo, sendo, portanto, uma variável que melhor expressa a resposta da cultura do que a CE compensada a 25°C.

No cultivo em solo do experimento de primavera, o monitoramento da condutividade elétrica do solo na capacidade de campo (CE_{cc}) é apresentado na Figura 20, com compensação automática de temperatura para 25°C. Observa-se pequenas variações nos valores de CE_{cc} ao longo do ciclo, fato que pode estar associado a baixa adsorção de sais em solos de textura arenosa (HUANG; HARTEMINK, 2020). Além disso, solos arenosos favorecem o movimento de sais (SOUSA *et al.*, 2017) e apresentam maior eficiência de lixiviação, quando comparado com solos de textura fina ou argilosa (CAVALCANTE *et al.*, 2016).

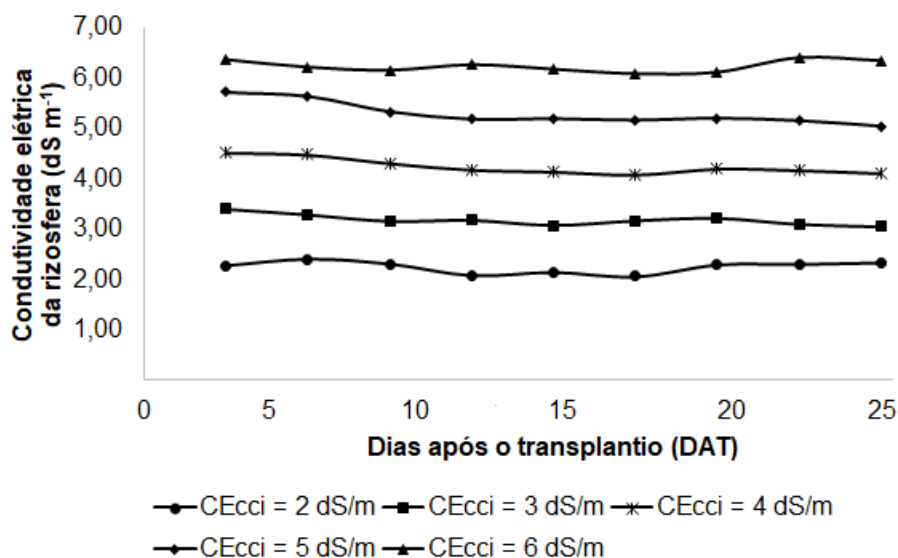


Figura 20. Valores de condutividade elétrica da solução do solo na capacidade de campo (CE_{cc}), compensados para 25°C, ao longo do experimento de primavera.

Outro ponto, que reforça essa afirmação, pode ser observado na curva artificial de salinização (Figura 6). Frações de argila acumulam íons por adsorção e posterior dessorção, sendo influenciados pela temperatura e concentração iônica na solução do solo (DIAS *et al.*, 2007). Porém, não se constatou efeito da adsorção de sais fertilizantes no solo utilizado no presente estudo, provavelmente por o solo apresentar uma alta porcentagem de areia (79%) e baixa porcentagem de argila (18%), de forma que o valor da CE esperada se aproximou da CE observada (Figura 6B).

Durante o ciclo da alface no cultivo em solo, não houve decaimento da salinidade da solução do solo para 25% do valor original, portanto, não houve preocupação em aplicar uma irrigação para manutenção da salinidade da solução do solo.

Com os valores apresentados na Figura 20, obteve-se a CE média ponderada no tempo na capacidade de campo do solo para cada tratamento, obtendo-se os valores de 2,15; 3,18; 4,14; 5,19 e 6,12 $dS\ m^{-1}$. Com os valores de temperatura da rizosfera (Figura 17B), descompensou-se a CE da temperatura de 25°C para os valores reais de temperatura da rizosfera, relacionando os valores de CE das médias ponderadas com os valores de temperatura obtidos a cada 10 minutos ao longo do experimento.

Na Figura 21 é apresentado o comportamento da variação de umidade do solo em todos os tratamentos. A partir dos valores de umidade, obteve-se a condutividade

elétrica da solução do solo para a umidade atual, e posteriormente descompensou-se a temperatura, ou seja, associou-se os valores de CE_{25} da umidade atual com as temperaturas reais (Figura 17B) ao longo do tempo.

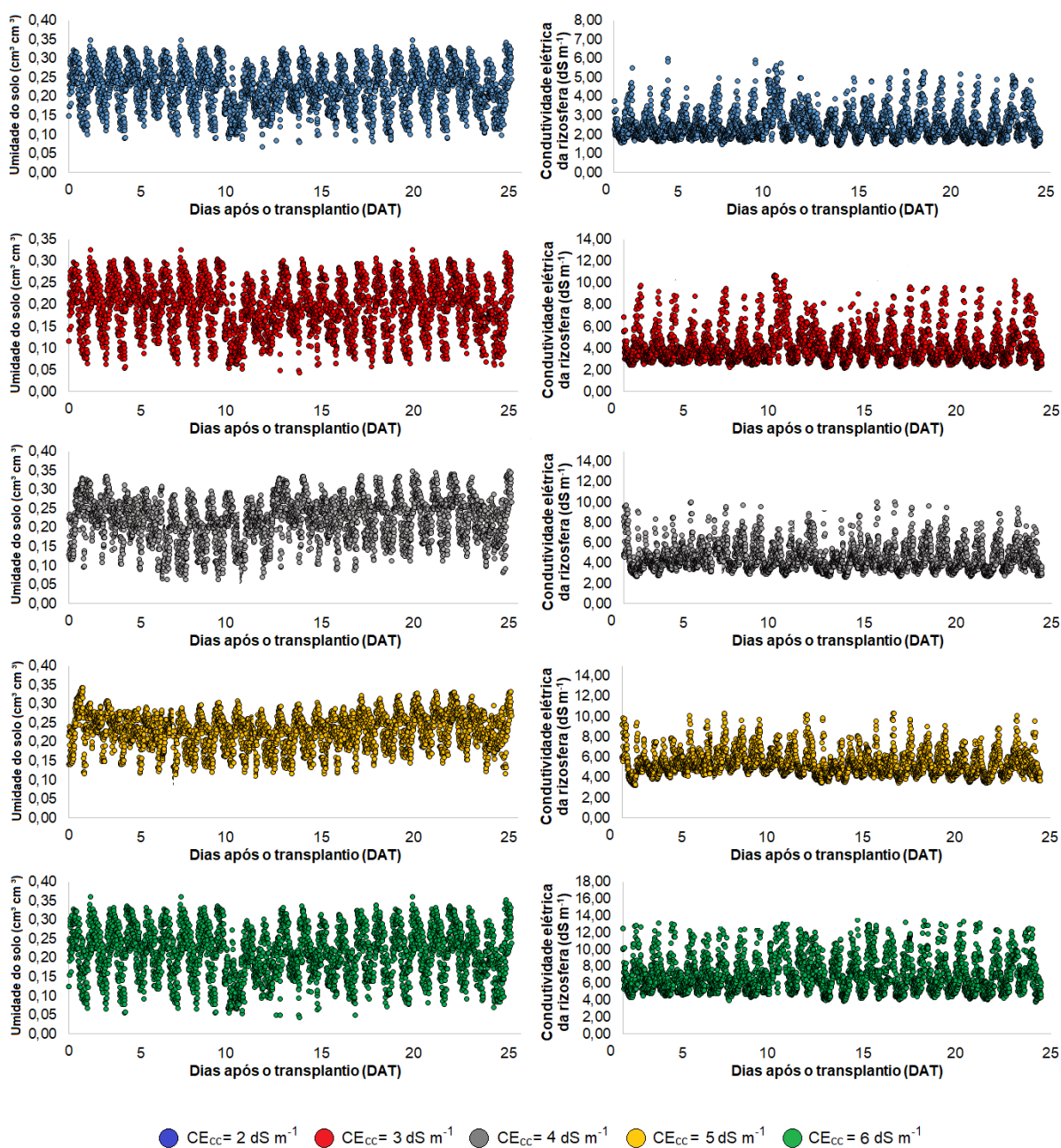


Figura 21. Oscilação da umidade do solo e da condutividade elétrica da rizosfera, com descompensação de temperatura, ao longo do ciclo da alface no experimento de primavera.

Apesar da umidade do solo na capacidade de campo corresponder a aproximadamente $0,2191 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, no experimento de primavera observou-se, a cada irrigação realizada, valores de umidade acima desse valor, variando de 0,30 até 0,35 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, diferentemente da umidade na capacidade de campo observado no experimento de outono, que se manteve entre 0,22 e 0,23 $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ a cada irrigação. Tal ocorrência, constatada no experimento de primavera, pode ser atribuída a maior magnitude do processo de secagem do que no experimento de outono.

O processo de umedecimento/secagem do solo favorece a acomodação das partículas do solo, aumentando a densidade do solo com o passar do tempo a cada irrigação (ROSIM *et al.*, 2012). Essa reestruturação das partículas do solo ocorre devido às forças de atração dos agregados devido a secagem, promovida pelo filme capilar entre as partículas, que com a perda de água fornece energia para deslocar e acomodar por deslizamento e translação dos agregados (VIANA *et al.*, 2004).

Como consequência desses processos, ocorre a redução da condutividade hidráulica do solo, diminuindo a taxa de infiltração e retardando o processo de distribuição da água no solo (ABREU *et al.*, 2004), o que justifica maiores valores de umidade registrados pelas sondas utilizadas no experimento de primavera.

Com relação ao experimento de outono, apresenta-se na Figura 22 o monitoramento da CE_{sol} do sistema hidropônico, com compensação automática de temperatura para 25°C . Assim como no experimento de primavera, também se observa pequenas variações nos valores de CE_{sol} ao longo do ciclo.

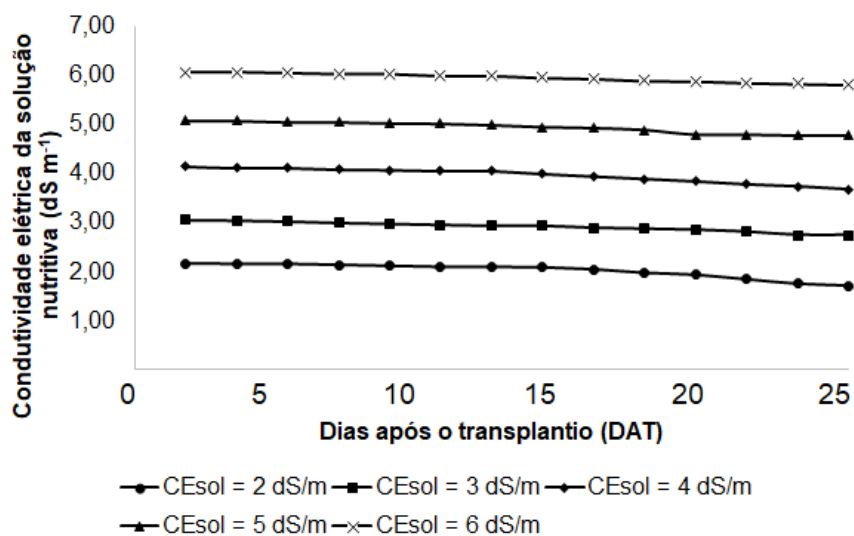


Figura 22. Valores da condutividade elétrica da solução nutritiva (CE_{sol}) da hidroponia, compensados para $25^{\circ}C$, durante o experimento de outono com a alface.

Durante o experimento de outono, também não houve necessidade de manutenção dos nutrientes da solução nutritiva, já que não houve redução da CE para 25% do valor original. As reduções observadas, sem descompensação de temperatura, foram de 15,74; 10,13; 11,08; 6,09 e 4,28%, para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente.

A partir dos valores obtidos na Figura 22, obteve-se a CE ponderada no tempo em cada tratamento, com valores médios de 2,04; 2,92; 3,97; 4,95 e 5,97 $dS\ m^{-1}$. Com os valores de temperatura da solução nutritiva (Figura 17C), descompensou-se a CE da temperatura de $25^{\circ}C$ para os valores reais de temperatura da solução nutritiva, como mostra a Figura 23.

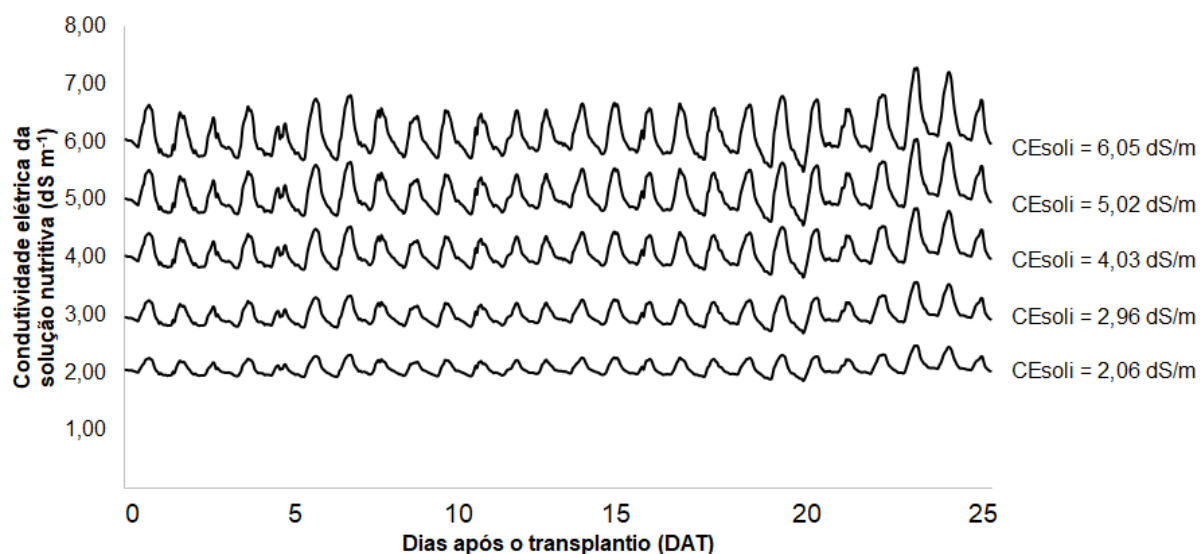


Figura 23. Valores estimados de condutividade elétrica da solução nutritiva (CE_{sol}) da hidroponia, com descompensação de temperatura ao longo do experimento de outono.

No cultivo em solo do experimento de outono, o monitoramento da condutividade elétrica do solo na capacidade de campo (CE_{cc}) pode ser observado na Figura 24, com compensação automática de temperatura para 25°C.

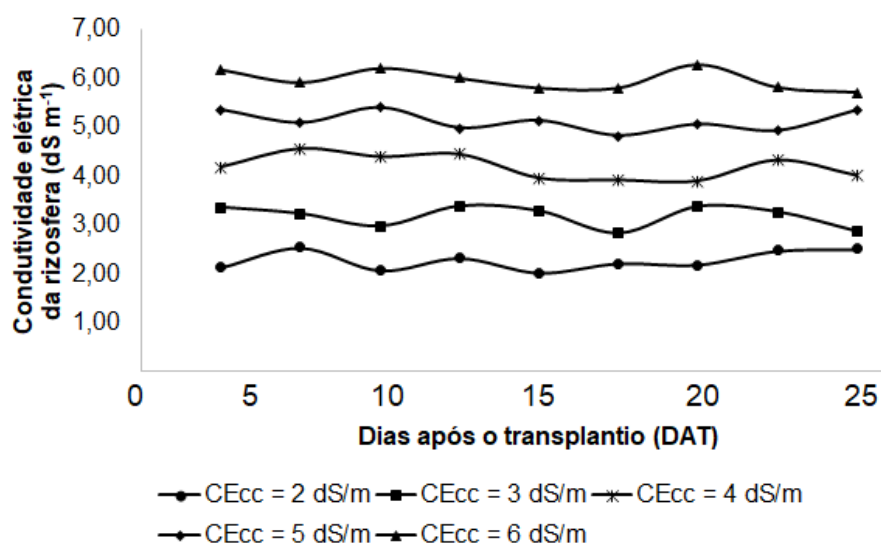


Figura 24. Valores de condutividade elétrica da solução do solo na capacidade de campo (CE_{cc}), compensados para 25°C, ao longo do experimento de outono.

Com base nos dados apresentados na Figura 24, obteve-se a CE média ponderada no tempo na capacidade de campo do solo para cada tratamento, obtendo-se os valores de 2,18; 3,17; 4,19; 5,13 e 5,97 dS m^{-1} .

Na Figura 25 é apresentado a oscilação da umidade do solo em cada tratamento. A partir dos valores de umidade, obteve-se a condutividade elétrica da solução do solo para a umidade atual, e em seguida, descompensou-se a temperatura a partir da temperatura real da rizosfera (Figura 17D) ao longo do tempo.

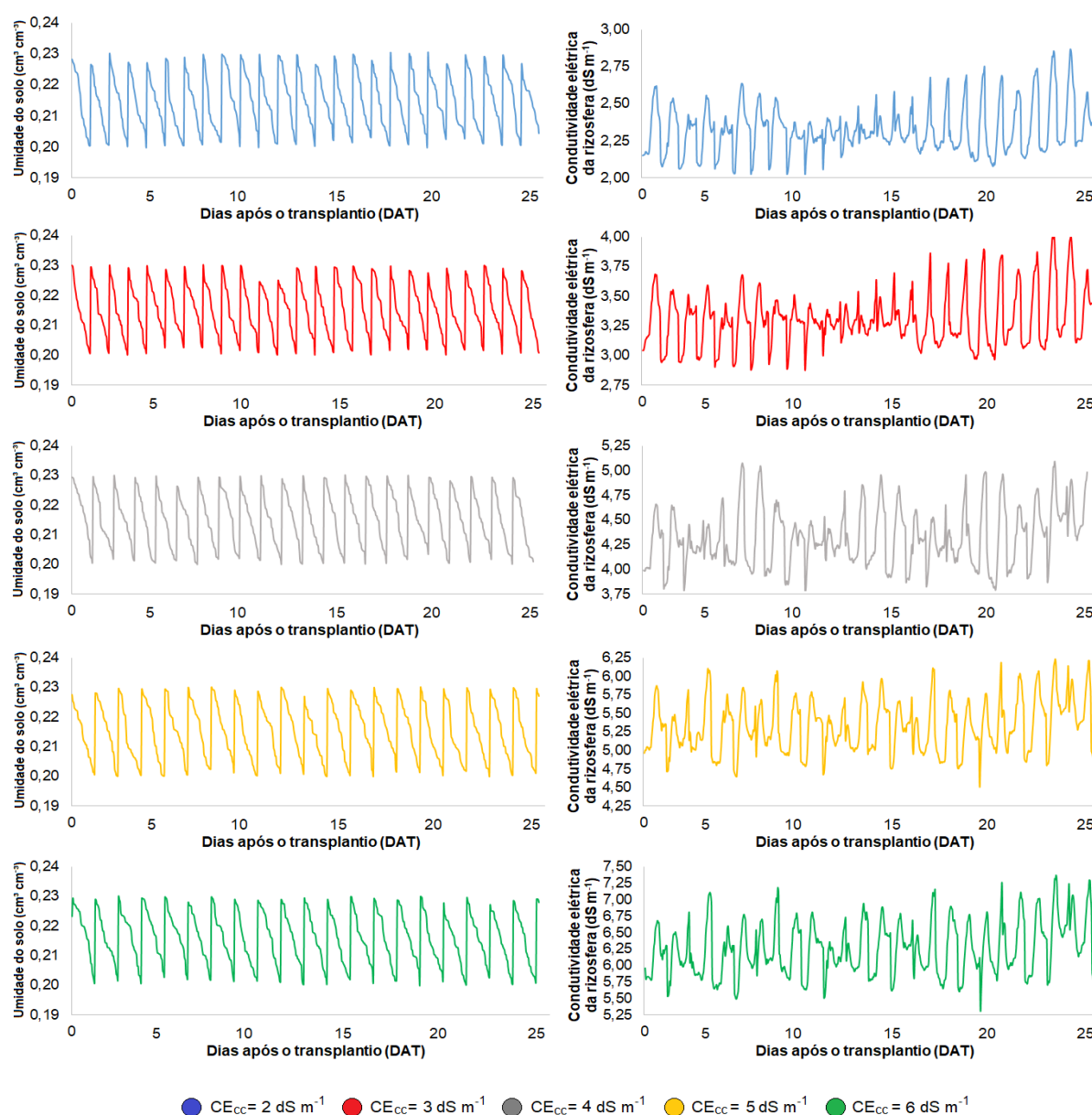


Figura 25. Oscilação da umidade do solo e da condutividade elétrica da rizosfera, com descompensação de temperatura, ao longo do ciclo da alface no experimento de outono.

Conforme Tabela 6, observa-se que a variação percentual da condutividade elétrica do meio de cultivo (D_t) do início ao final do ciclo e a variação da salinidade inicial e ponderada (D_p) foram variáveis em função do tratamento, do tipo de sistema e da estação de cultivo. Com base nos valores de CE, com descompensação de temperatura, obteve-se a condutividade elétrica da solução nutritiva média ponderada (CE_{solp}) e a condutividade elétrica média ponderada da rizosfera (CE_p) ao longo dos experimentos de primavera e outono.

Tabela 6. Variação percentual da condutividade elétrica do meio de cultivo (D_t) do início ao final do experimento, salinidade média ponderada no tempo (CE_{solp} e CE_p) e variação percentual entre a salinidade inicial e a ponderada (D_p), com descompensação de temperatura, em função dos tratamentos aplicados na cultura alface, no sistema hidropônico e em solo, durante o experimento de primavera e outono.

Tratamento	Cultivo hidropônico				Cultivo em solo			
	CE_{sol} inicial	CE_{solp}	D_p	D_t	CE_{cc} inicial	CE_p	D_p	D_t
	-----dS m ⁻¹ -----		-----%-----		----dS m ⁻¹ ---		-----%-----	
Experimento de primavera								
T1	2,29	2,13	-6,99	-7,65	2,28	2,52	10,53	-17,98
T2	3,39	3,15	-7,08	-7,86	3,40	4,27	25,59	-6,76
T3	4,55	4,23	-7,03	-7,78	4,52	5,10	12,83	-7,52
T4	5,65	5,26	-6,90	-7,73	5,72	5,65	-1,22	-8,57
T5	6,86	6,37	-7,14	-7,85	6,37	7,64	19,94	-1,88
Experimento de outono								
T1	2,06	2,08	0,97	-1,54	2,15	2,33	8,37	10,23
T2	2,96	3,01	1,69	-1,06	3,04	3,31	8,88	13,16
T3	4,03	4,09	1,49	-1,24	3,99	4,33	8,52	17,79
T4	5,02	5,10	1,59	-1,15	4,96	5,34	7,66	0,60
T5	6,05	6,14	1,49	-1,21	5,96	6,26	5,03	-3,36

6.2 Aspecto visual

No presente estudo, no experimento de primavera em cultivo hidropônico, foram detectados, poucos dias após o transplante (5 DAT) e aplicação dos tratamentos com NaCl, sintomas de toxidez (Figura 26) provenientes da salinidade nos tratamentos mais salinos (CE_{solp} de 5,26 e 6,37 dS m⁻¹).

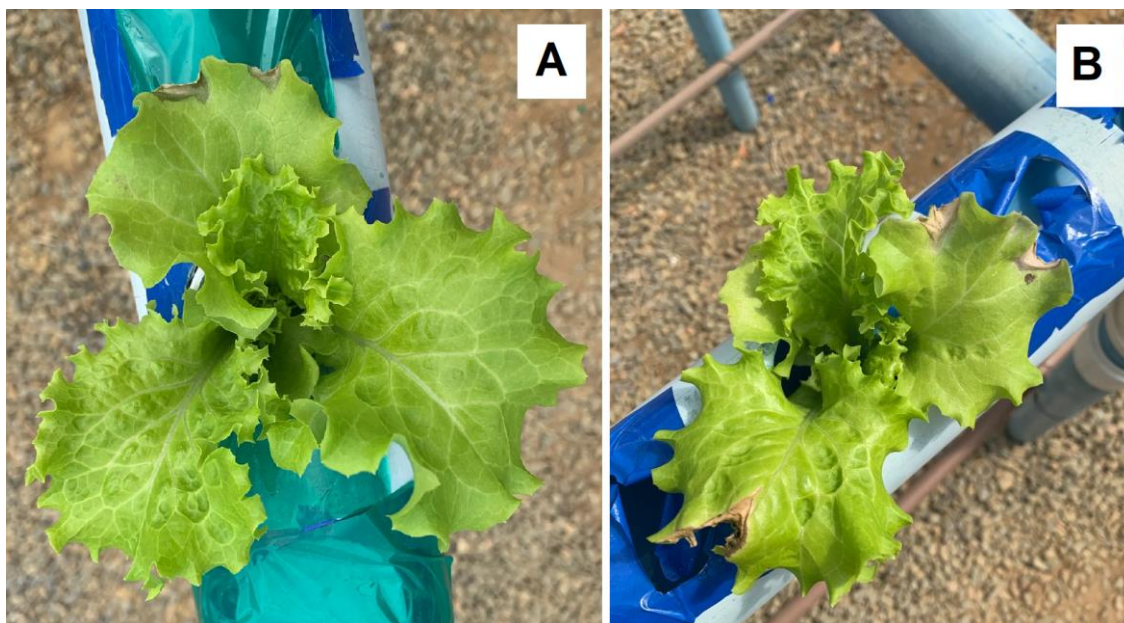


Figura 26. Sintomas de clorose e necrose nas bordas foliares da alface, no cultivo hidropônico de primavera, aos 5 dias após o transplântio, sob condutividade elétrica média ponderada da solução nutritiva de $5,26 \text{ dS m}^{-1}$ (A) e $6,37 \text{ dS m}^{-1}$ (B).

No cultivo hidropônico do experimento de outono, os primeiros sintomas relacionados a toxidez dos sais só foram observados aos 8 DAT (Figura 27), apenas no tratamento mais salino ($6,14 \text{ dS m}^{-1}$). Diferente do observado no experimento de primavera, onde os primeiros sintomas surgiram mais precocemente e nos dois níveis mais salinos, o atraso no surgimento dos sintomas pode ser atribuído ao fato da estação de outono apresentar temperaturas relativamente mais baixas que na primavera, o que ameniza o efeito dos sais sobre as culturas.



Figura 27. Sintomas de clorose e necrose nas bordas foliares da alface, no cultivo hidropônico de outono, aos 8 dias após o transplântio, sob nível mais alto de salinidade ($6,14 \text{ dS m}^{-1}$) da solução nutritiva.

Porém, após esse período de surgimento dos primeiros sintomas de toxidez por sais, em ambas as estações (primavera e outono), de acordo as observações periódicas da parte aérea das plantas, não se constatou o agravamento dos sintomas, que reduziram gradativamente ao longo do experimento, de modo que não se verificou sintomas de toxicidade nas novas folhas produzidas. Tal ocorrência pode estar associada à aclimatação das plantas aos níveis dos sais testados.

Analogamente, Soares *et al.* (2019) cultivaram alface em sistema hidropônico NFT com águas salobras e concluíram que, apesar da redução do crescimento, o uso de águas salobras não ocasionou danos visuais que inviabilizassem a qualidade comercial da alface. Nos estudos conduzidos por Guimarães *et al.* (2017), com as cultivares de alface 'Valentina' e 'Alcione', a salinidade da solução nutritiva não provocou sintomas deletérios que comprometessem a comercialização do produto.

No cultivo em solo, no experimento de primavera, observou-se a presença de sintomas visuais relacionados a salinidade apenas nos tratamentos mais salinos (CE_p de $5,65$ e $7,64 \text{ dS m}^{-1}$), a partir dos 12 DAT, como se pode verificar na Figura 28.

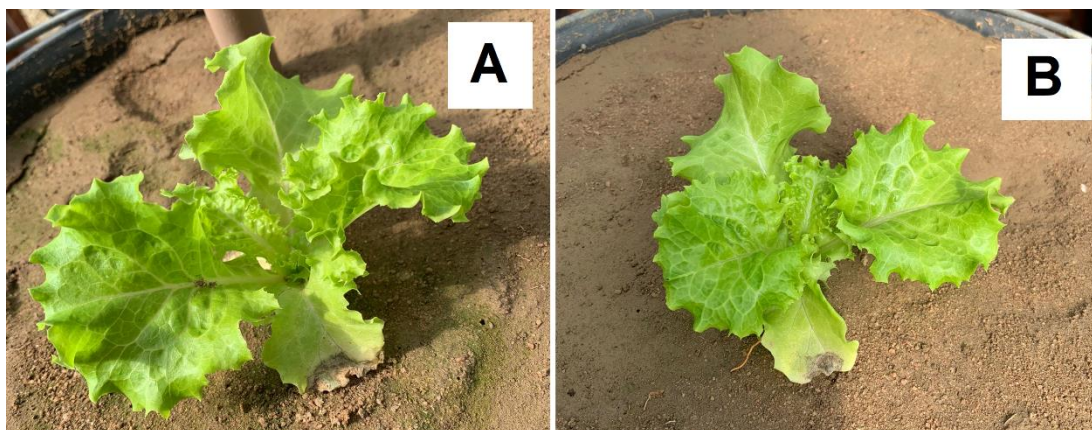


Figura 28. Sintomas de clorose e necrose nas bordas foliares da alface, no cultivo em solo da primavera, aos 12 dias após o transplante, sob condutividade elétrica ponderada da rizosfera de $5,65 \text{ dS m}^{-1}$ (A) e $7,64 \text{ dS m}^{-1}$ (B).

Porém, no tratamento correspondente ao nível de salinidade média ponderada de $5,65 \text{ dS m}^{-1}$, constatou-se, de forma análoga ao ocorrido na hidroponia, a redução dos sintomas ao longo do experimento, fato que pode estar associado a aclimação da planta à salinidade. Já no nível mais salino, os sintomas relacionados a toxidez por sais acompanharam as plantas ao longo de todo o ciclo, comprometendo a qualidade comercial.

Os sintomas observados no tratamento mais salino ($7,64 \text{ dS m}^{-1}$) consistiram de: murchamento, clorose das folhas, agravando-se para necrose e consequente deformação do limbo foliar, como mostra a Figura 29.



Figura 29. Aspecto geral da planta de alface cultivada em solo, no experimento de primavera, com o tratamento mais salino ($7,64 \text{ dS m}^{-1}$), aos 20 dias após o transplante.

No cultivo em solo do experimento de outono, os primeiros sintomas associados a salinidade do meio de cultivo só foram observados aos 10 DAT, apenas no tratamento mais salino ($6,26 \text{ dS m}^{-1}$), como mostra a Figura 30.



Figura 30. Sintomas de clorose e necrose nas bordas foliares da alface, no cultivo em solo, no período de outono, aos 10 dias após o transplântio, sob nível mais alto de salinidade ($6,26 \text{ dS m}^{-1}$) da rizosfera.

Em geral, visualmente, as plantas de alface cultivadas no experimento de primavera (Figura 31) e outono (Figura 32), em sistema hidropônico (Figura 31A e Figura 32A) e em solo (Figura 31B e Figura 32B), aos 25 DAT, não foram afetadas pela salinidade dos tratamentos aplicados, exceto pelo nível salino mais alto no sistema de cultivo em solo do experimento de primavera. Logo, as plantas dos demais tratamentos podem ser consideradas comerciáveis.

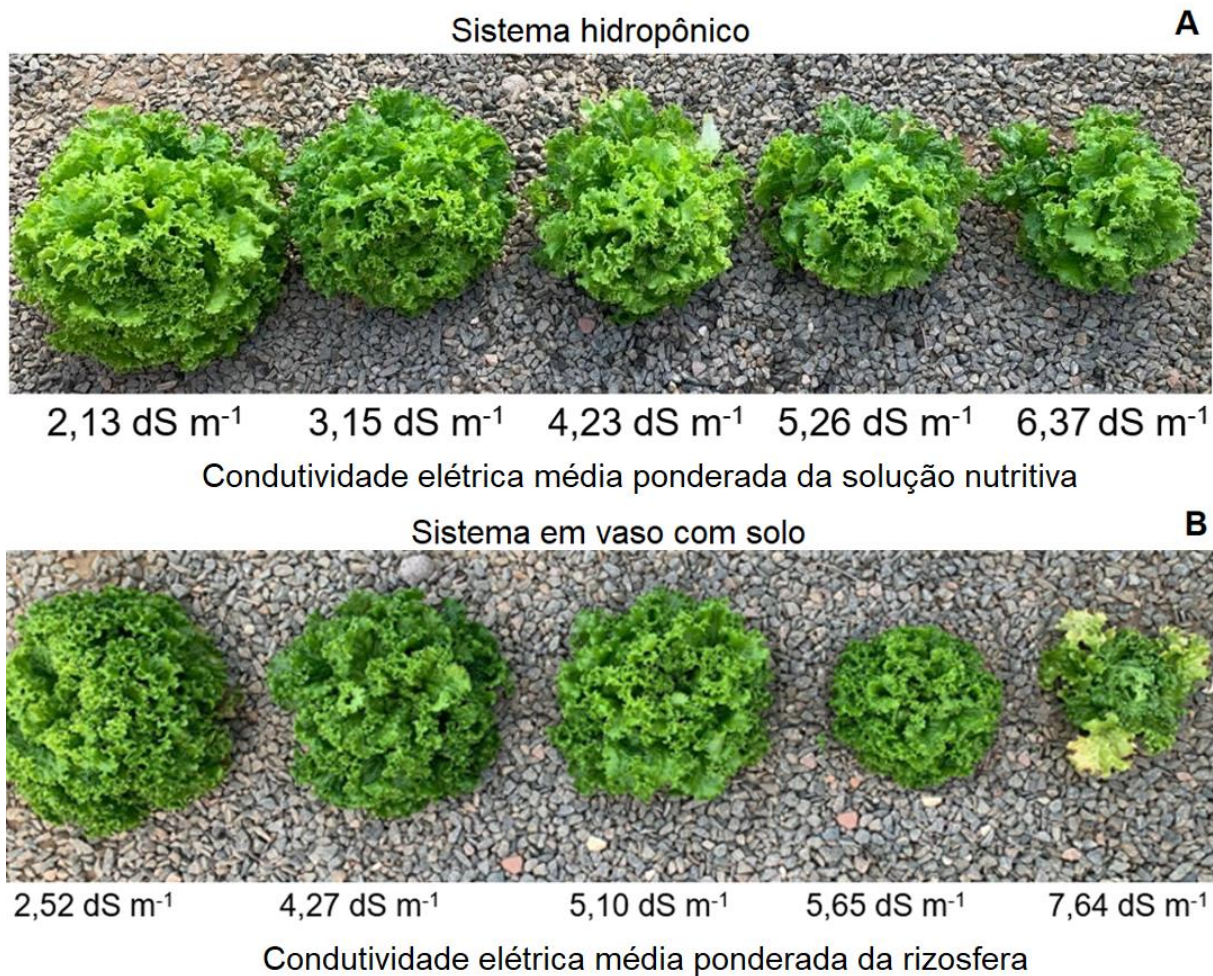


Figura 31. Aspecto visual da alface, aos 25 dias após o transplântio, no experimento de primavera, cultivada em sistema hidropônico (A) e em solo (B), submetida a níveis crescentes de condutividade elétrica do meio de cultivo.

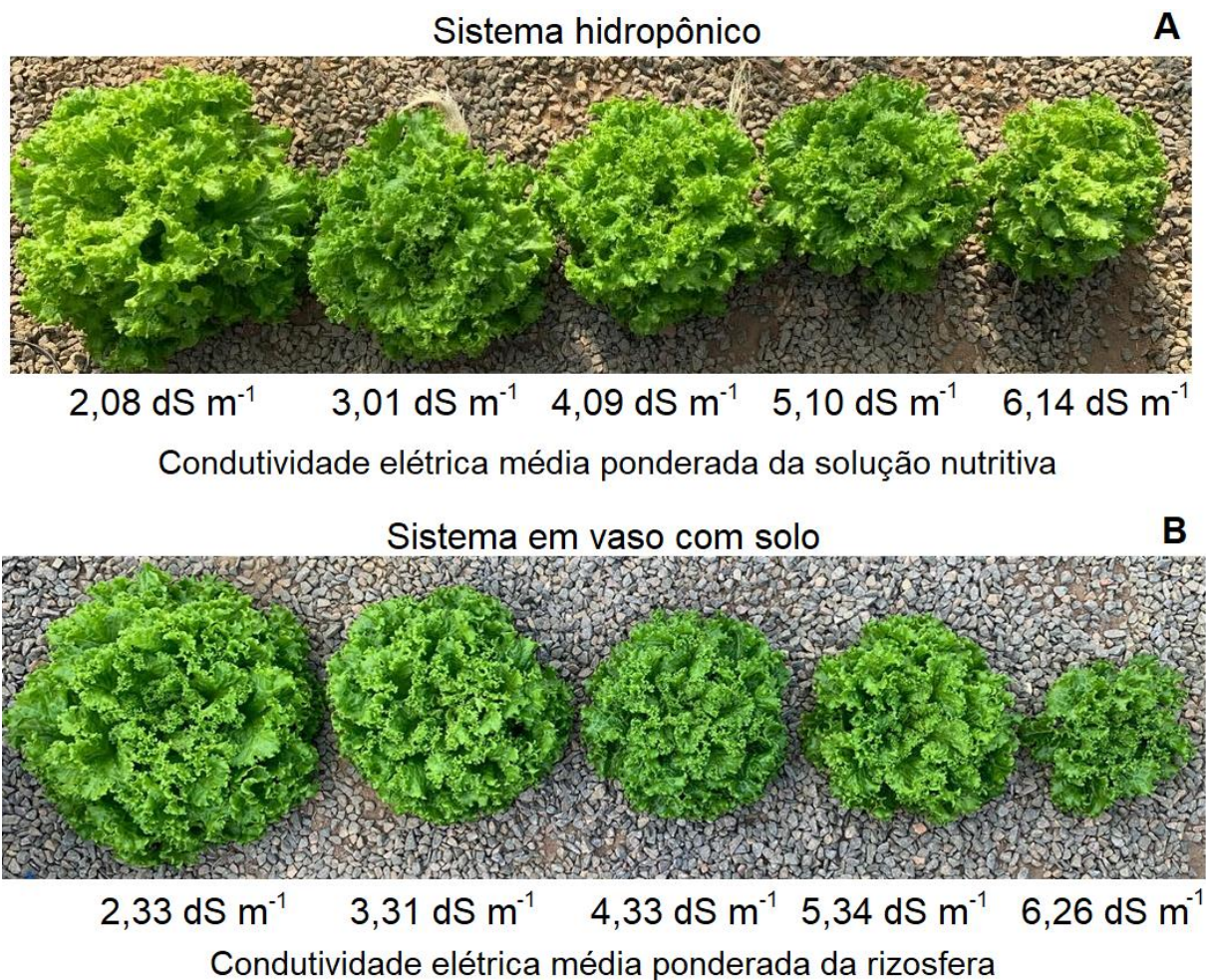


Figura 32. Aspecto visual da alface, aos 25 dias após o transplântio, no experimento de outono, cultivada em sistema hidropônico (A) e em solo (B), submetida a níveis crescentes de condutividade elétrica do meio de cultivo.

No presente estudo não houve perdas de plantas devido à salinidade, nem mesmo no maior nível salino testado. Os sintomas descritos anteriormente ocorridos nos tratamentos mais salinos, do sistema hidropônico e do solo, estão de acordo com a sintomatologia provocada pela toxicidade de íons de sódio e cloro (CASSANITI *et al.*, 2013; DIAS *et al.*, 2016).

Com relação a temperatura do meio de cultivo, como observado na Figura 17, nos experimentos de primavera e outono as temperaturas da zona radicular, tanto na hidroponia quanto no solo, mantiveram-se acima da faixa ideal na maior parte do ciclo, porém, a qualidade visual e comercial da cultura não foi afetada. De acordo com Freitas *et al.* (2021), isso pode ser atribuído, em partes, aos avanços no melhoramento genético das culturas, tornando-as mais resistentes as condições tropicais brasileiras.

A colheita do presente estudo, em cultivo hidropônico e em solo, foi realizada aos 45 dias após a sementeira, o que está de acordo com o período indicado pela empresa, que informam que a cultivar 'Jade' apresenta um ciclo médio de 52 dias desde a sementeira.

Segundo o catálogo da empresa de sementes Sakata (2023), a cultivar 'Jade' apresenta plantas grandes e volumosas, folhas largas, coloração verde brilhante e alta crespicidade. As plantas produzidas pelo presente estudo, no experimento de primavera, conduzidas em solo e em hidroponia, mesmo sob condições salinas, atingiram os padrões comerciáveis descritos pela empresa, exceto as plantas cultivadas em solo no tratamento mais salino ($7,64 \text{ dS m}^{-1}$) do experimento de primavera.

6.3 Crescimento vegetativo

Com base no resumo da análise de variância (Tabela 7), foi possível verificar a ocorrência de significância ($p < 0,01$) entre os diferentes níveis de condutividade elétrica do meio de cultivo testados no sistema hidropônico NFT e no cultivo em solo, para as variáveis altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF) e área foliar total (AF), nos experimentos de primavera e outono.

Tabela 7. Resumo da análise de variância para a altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF) e área foliar (AF) das plantas de alface, em hidroponia e em solo, nos experimentos de primavera e outono, em função da condutividade elétrica do meio de cultivo.

FV	GL	Quadrados médios							
		Experimento de primavera				Experimento de outono			
		AP	DC	NF	AF	AP	DC	NF	AF
Hidroponia									
Blocos	3	1,773 ^{ns}	0,639 ^{ns}	1,688 ^{ns}	0,0097 ^{ns}	0,075 ^{ns}	0,134 ^{ns}	2,103 ^{ns}	0,0003 ^{ns}
CE_{sol}	4	21,369 ^{**}	4,795 ^{**}	41,097 ^{**}	0,0569 ^{**}	18,450 ^{**}	4,113 ^{**}	36,136 ^{**}	0,096 ^{**}
Erro	12	0,943	0,449	3,292	0,0073	0,634	0,245	1,821	0,001
CV (%)		4,65	4,13	5,84	11,83	3,77	3,15	4,57	5,64
Solo									
Blocos	3	2,009 ^{ns}	1,678 ^{ns}	10,835 ^{ns}	0,0023 ^{ns}	0,577 ^{ns}	1,009 ^{ns}	0,554 ^{ns}	0,006 ^{ns}
CE	4	24,371 ^{**}	16,759 ^{**}	158,287 ^{**}	0,0511 ^{**}	26,187 ^{**}	1,532 [*]	51,650 ^{**}	0,167 ^{**}
Erro	12	0,288	0,251	0,784	0,0005	0,785	0,320	3,314	0,0004
CV (%)		3,31	3,66	4,03	4,52	6,93	4,18	6,77	3,93

^{**}, ^{*} - significativo pelo teste F a 0,01 e 0,05 de probabilidade, respectivamente; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação; FV - fonte de variação; GL - grau de liberdade.

No experimento de primavera, nos modelos obtidos pela análise de regressão no cultivo em solo, para AP (Figura 33A), DC (Figura 33B), NF (Figura 33C) e AF (Figura 33D), observaram-se decréscimos de 5,66; 5,63; 8,62 e 7,38%, por aumento unitário na condutividade elétrica da rizosfera, respectivamente. Já na hidroponia, os decréscimos observados foram da ordem de 5,06; 3,31; 4,69 e 8,37%, por aumento unitário na condutividade elétrica da solução nutritiva, respectivamente.

No experimento de outono, os decréscimos observados no cultivo em solo para os parâmetros AP (Figura 33E), DC (Figura 33F), NF (Figura 33G) e AF (Figura 33H) foram de 8,19; 2,56; 6,19 e 11,91%, respectivamente. No cultivo em sistema hidropônico, para os mesmos parâmetros, as reduções observadas por aumento unitário da salinidade do meio de cultivo foram de 4,98; 3,40; 4,99 e 10,31%, respectivamente.

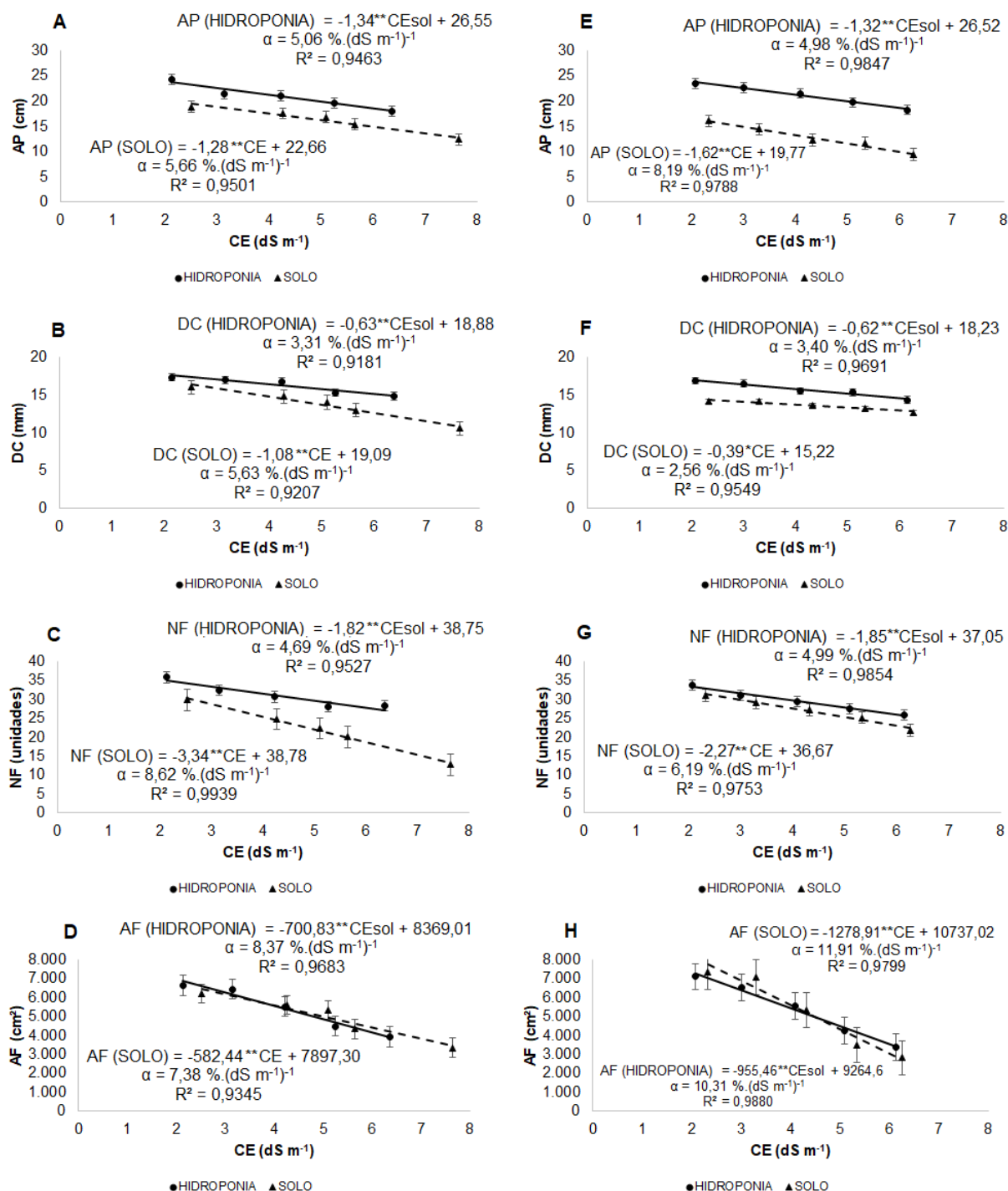


Figura 33. A - Altura de planta (AP), B - diâmetro do caule (DC), C - número de folhas (NF), e D - área foliar (AF) das plantas de alface cultivadas no experimento de primavera, e E - Altura de planta (AP), F - diâmetro do caule (DC), G - número de folhas (NF), e H - área foliar (AF) das plantas de alface cultivadas no experimento de outono, em sistema hidropônico NFT e em solo, sob diferentes níveis de condutividade elétrica do meio de cultivo.

Nos experimentos de primavera e outono constatou-se que, em ambas estações de cultivo, a altura de planta e o diâmetro do caule das plantas da hidroponia foram superiores aos das plantas do solo. Tal fato pode estar associado com o diâmetro da parte aérea (parâmetro não mensurado), sendo que no solo o diâmetro da copa foi superior ao da hidroponia, ou seja, as plantas apresentaram crescimento lateral superior ao vertical. No sistema hidropônico, o crescimento vertical foi priorizado e superior ao do solo, apresentando uma maior altura das plantas. Supostamente, tal fato implica no diâmetro do caule, já que menores alturas verticais exigem menor esforço de sustentação para a cultura, em que parte dos esforços sobre o caule estão distribuídos por estarem apoiados sobre a superfície do solo, gerando um caule menor no solo. Já na hidroponia, como o crescimento vertical foi priorizado, exigiu-se uma maior sustentação para equilibrar a planta, exigindo um caule maior.

Conforme se pode verificar na Tabela 8, para os experimentos de primavera e outono, a magnitude dos efeitos salinos sobre os parâmetros de crescimento vegetativo avaliados, quando comparados o maior nível salino com o controle. Observa-se, em ambos experimentos, maiores reduções percentuais do cultivo em solo, exceto para o diâmetro do caule.

Tabela 8. Diferença percentual do parâmetro estimado entre o tratamento controle e o nível salino mais alto, para altura de planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF) e área foliar (AF) da cultura da alface, para os experimentos de primavera e outono.

Diferença percentual (%) do parâmetro estimado do tratamento controle com o nível salino mais alto							
Cultivo hidropônico				Cultivo em solo			
AP	DC	NF	AF	AP	DC	NF	AF
Experimento de primavera							
25,76	14,36	20,93	41,10	34,17	33,81	57,26	46,15
Experimento de outono							
22,30	15,22	23,02	52,45	41,29	10,45	29,84	61,64

Dentre as variáveis analisadas nas plantas de alface, verificou-se uma maior sensibilidade à salinidade em função da AP, do NF e da AF, já que em ambas estações e em ambos os sistemas de cultivos esses foram os parâmetros que apresentaram maiores reduções percentuais por aumento unitário da salinidade.

Ao longo dos experimentos, em ambas as estações e sistemas de cultivo, observou-se que a redução no número de folhas foi associada a menor taxa de produção de novas folhas, já que, conforme discutido no tópico 'Análise visual de sintomas', os sintomas apresentados no início do experimento reduziram gradativamente ao longo do ciclo, o que não provocou perdas de folhas.

Segundo Willadino *et al.* (2011), a manutenção da área foliar dos genótipos aclimatados ao estresse salino é realizada com a diminuição da emissão foliar, priorizando a expansão da área foliar em detrimento do surgimento de novas folhas.

No geral, dos parâmetros avaliados (AP, DC e NF), as plantas de alface do tratamento controle e do maior nível salino do sistema hidropônico apresentaram valores médios superiores quando comparadas com as plantas cultivadas em solo. Esses resultados sugerem que a hidroponia proporciona maiores acréscimos nas atividades fisiológicas e metabólicas da cultura, e conseqüentemente no crescimento, devido a imediata disponibilidade de água e nutrientes da solução nutritiva nas raízes das plantas.

Porém, essa disponibilidade imediata de nutrientes acompanhada de sais, ocasionados pela hidroponia, provocou uma maior redução percentual de área foliar na primavera, que foi de 8,37% $(\text{dS m}^{-1})^{-1}$, enquanto no solo essa redução foi de 7,38% $(\text{dS m}^{-1})^{-1}$, já no outono, apesar do solo apresentar maior redução percentual, que foi de 11,91% $(\text{dS m}^{-1})^{-1}$, apresentou também maiores valores médios estimados de área foliar, o que pode indicar que a hidroponia não só dispõe mais facilmente água e nutrientes, mas também sais como o NaCl, prejudicando de forma mais acentuada do que no solo a parte comerciável e mais importante da cultura.

Independente da estação e do sistema de cultivo, as plantas de alface tiveram seu crescimento prejudicado, sendo verificado um comportamento de queda linear com o aumento da salinidade do meio de cultivo. Tal comportamento está associado as altas concentrações de sais na zona radicular, que reduzem a absorção de água pelas plantas, uma vez que os íons Na^+ e o Cl^- afetam negativamente o crescimento e os processos metabólicos das plantas (DEINLEIN *et al.*, 2014). Além disso, nesses ambientes, ocorre nas plantas o fechamento estomático para reduzir a perda de água, o que compromete o transporte de íons e reduz as atividades fotossintéticas, diminuindo a assimilação de CO_2 (ABDELGAWAD *et al.*, 2016).

De acordo com Lotfi *et al.* (2020), a redução da condutância estomática devido à salinidade tem como consequência a diminuição da superfície fotossintetizadora da planta em consequência do efeito osmótico, o que limita o conteúdo de água nas células vegetais e reduz a expansão celular e, conseqüentemente, a superfície assimiladora de luz.

Os resultados do cultivo em solo do presente estudo estão de acordo com os observados por Oliveira *et al.* (2011), que avaliaram cinco cultivares de alface (Mônica SF31, Grandes Lagos 659, Veneranda, Folha Roxa Quatro Estações e Stella) em solo e observaram que, em todas as cultivares, a altura de planta, o número de folhas e a área foliar decresceram com o aumento da salinidade da água de irrigação.

Sá *et al.* (2017) também identificaram redução do número de folhas com o aumento da salinidade em cinco cultivares de alface ('Simpson Semente Preta', 'Alba', 'Mimosa Vermelha', 'Veneranda' e 'Mônica SF31'). Por outro lado, Kim *et al.* (2016) identificaram que os efeitos dos sais da água de irrigação não exerceram efeito significativo sobre o número de folhas da alface.

Di Mola *et al.* (2017) cultivaram alface (cv. Cambria) em condições de solo, em lisímetros de drenagem, e verificaram que o aumento da salinidade da água de irrigação promoveu diminuição linear nos parâmetros número de folhas e área foliar. Já Silva *et al.* (2020a) avaliaram o cultivo da alface em canteiros irrigados por gotejamento em campo aberto e em ambiente protegido, e constataram que nas duas condições de cultivo, a salinidade reduziu a altura de planta e o número de folhas.

De forma análoga aos resultados do presente estudo no cultivo hidropônico, Soares *et al.* (2015) verificaram reduções na área foliar da alface hidropônica com o aumento da salinidade da solução nutritiva nos dois períodos (Outono-Inverno e Verão) avaliados para a cultivar 'Tainá'. Fernandes *et al.* (2018) cultivaram alface americana em sistema hidropônico NFT e constataram que o aumento da salinidade da solução nutritiva reduziu o número de folhas. Soares *et al.* (2019) observaram que o uso de águas salobras no cultivo da alface em sistema hidropônico reduziu linearmente a área foliar, com redução de 6,99% da área para cada aumento unitário da CE_{sol} .

Freitas *et al.* (2021) observaram efeito significativa dos níveis de condutividade elétrica da solução nutritiva sobre a altura de planta e o número de folhas, com

redução do crescimento das cultivares 'Robusta', 'Gloriosa' e 'Tainá' com o aumento da salinidade, em sistemas hidropônicos NFT e DFT.

6.4 Produção e teor de água nas folhas

As plantas de alface, cultivadas em sistema hidropônico NFT e em solo, no experimento de primavera e outono, foram colhidas no mesmo período, aos 25 DAT. Muuns e Gilliam (2015) afirmam que o florescimento e a fase produtiva de uma cultura podem ser antecipados ou atrasados, dependendo da cultura e da salinidade do meio de cultivo. Porém, tal fato não foi observado no presente estudo, constatando que não houve favorecimento ou desfavorecimento do sistema ou da estação de cultivo no período de colheita da alface.

De acordo com o resumo da análise de variância observados na Tabela 9, demonstrou-se que a salinidade do meio de cultivo promoveu efeito significativo ($p < 0,01$) sobre as variáveis acumuladas de massa de matéria fresca (MFPA) e seca da parte aérea (MSPA) da alface, cultivada em sistema hidropônico e em solo nos experimentos de primavera e outono. Já para a variável teor de água nas folhas, em ambas estações e sistemas de cultivo avaliados, não houve efeito significativo da salinidade.

Tabela 9. Resumo da análise de variância para a massa de matéria fresca (MFPA) e seca (MSPA) da parte aérea e do teor de água (TA) das plantas de alface, em hidroponia e em solo, nos experimentos de primavera e outono, em função da condutividade elétrica do meio de cultivo.

FV	GL	Quadrados médios					
		Experimento de primavera			Experimento de outono		
		MFPA	MSPA	TA	MFPA	MSPA	TA
Hidroponia							
Blocos	3	3108,348 ^{ns}	7,839 ^{ns}	3,032 ^{ns}	94,255 ^{ns}	1,324 ^{ns}	0,236 ^{ns}
CE_{sol}	4	18330,894 ^{**}	56,448 ^{**}	0,905 ^{ns}	31046,926 ^{**}	45,734 ^{**}	1,462 ^{ns}
Erro	12	2358,787	1,134	0,581	295,251	1,078	0,075
CV (%)		12,74	6,26	3,81	5,65	6,59	4,29
Solo							
Blocos	3	755,182 ^{ns}	1,451 ^{ns}	0,027 ^{ns}	1971,297 ^{ns}	10,515 ^{ns}	0,025 ^{ns}
CE	4	16464,939 ^{**}	49,834 ^{**}	0,569 ^{ns}	53708,412 ^{**}	238,176 ^{**}	0,506 ^{ns}
Erro	12	162,42	0,443	0,169	135,850	1,448	0,089
CV (%)		4,52	5,83	4,43	3,93	6,33	3,32

^{**}, ^{*} - significativo pelo teste F a 0,01 e 0,05 de probabilidade, respectivamente; ^{ns} - não significativo; CV - coeficiente de variação; FV - fonte de variação; GL - grau de liberdade.

No experimento de primavera, nos modelos lineares obtidos pela análise de regressão do cultivo em solo, para MFPA (Figura 34A) e MSPA (Figura 34B), observaram-se decréscimos de 7,38 e 8,93%, por aumento unitário na condutividade elétrica da rizosfera, respectivamente. Já no cultivo em sistema hidropônico, observou-se que a salinidade da solução nutritiva promoveu decréscimo, por aumento unitário da CE da zona radicular, de 8,37 e 8,27%, para as variáveis MFPA (Figura 34A) e MSPA (Figura 34B), respectivamente.

Durante o ciclo da alface produzida no experimento de outono, observou-se reduções de 11,91 e 12,16% por aumento unitário da salinidade da rizosfera para a MFPA (Figura 34D) e MSPA (Figura 34E), respectivamente. No cultivo em sistema hidropônico, as reduções observadas para esses mesmos parâmetros foram de 10,31 e 8,57%, respectivamente.

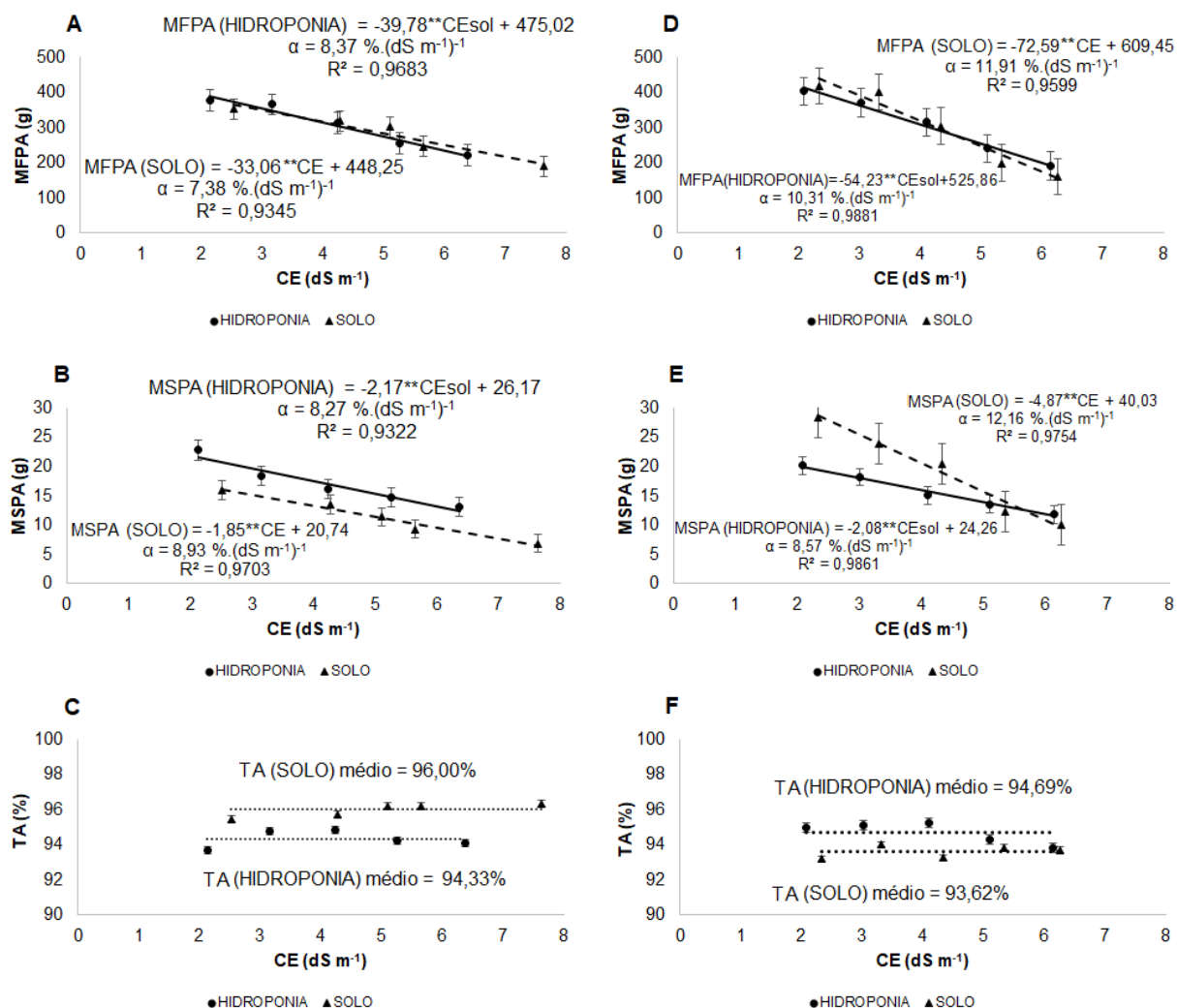


Figura 34. A - Massa de matéria fresca da parte aérea (MFPA), B – massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) e C – teor de água (TA) das plantas de alface cultivadas no experimento de primavera, e D - massa de matéria fresca da parte aérea (MFPA), E – massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) e F – teor de água (TA) das plantas de alface cultivadas no experimento de outono, em hidroponia e solo, sob diferentes níveis de condutividade elétrica do meio de cultivo.

Na Tabela 10 observa-se, para os experimentos de primavera e outono, a magnitude dos efeitos salinos sobre os parâmetros de produção avaliados, do maior nível salino testado com o tratamento controle. Observa-se, nos experimentos de primavera e outono, que as maiores diferenças percentuais no sistema em solo.

Tabela 10. Diferença percentual do parâmetro estimado entre o tratamento controle e o nível salino mais alto, para massa de matéria fresca (MFPA) e seca (MSPA) da parte aérea da cultura da alface, para os experimentos de primavera e outono.

Diferença percentual (%) do parâmetro estimado do tratamento controle com o nível salino mais alto			
Cultivo hidropônico		Cultivo em solo	
MFPA	MSPA	MFPA	MSPA
Experimento de primavera			
43,22	42,70	46,38	58,91
Experimento de outono			
53,30	42,36	64,79	66,73

Ao observar a Figura 34A, referente a produção de massa de matéria fresca no experimento de primavera, é possível notar que a hidroponia favoreceu a produção de massa de matéria fresca da parte aérea da alface, mesmo sob condições de estresse salino em relação as plantas cultivadas em solo. Logo, percebe-se que no sistema hidropônico as plantas concentraram mais energia para o desenvolvimento da folhagem, resultando em plantas com melhor aspecto visual e padrões comerciais. Já no experimento de outono, apesar do solo apresentar uma maior redução percentual por aumento unitário da salinidade do meio de cultivo, observa-se que a estação e o sistema de cultivo em solo favoreceram a cultura, produzindo uma maior quantidade de massa de matéria fresca. Com isso, os resultados obtidos são importantes, uma vez que respondem as hipóteses levantadas no presente estudo.

Nos cultivos em solo, o teor de sais na solução do solo varia devido ao fluxo de massa que excede a absorção de água, além da diminuição do conteúdo de água nas proximidades da zona radicular proveniente da elevada demanda evapotranspiratória e a baixa condutividade hidráulica insaturada. Já nos cultivos em solução, o potencial matricial é minimizado, assim como a resistência ao movimento da água (VETTERLEIN *et al.*, 2004). Entretanto, a hipótese de que esse comportamento na hidroponia pode favorecer o desenvolvimento dos cultivos agrícolas, obtendo-se uma maior produção das culturas, não se confirma, já que depende das condições de contorno, sobretudo, a estação de cultivo e a tensão crítica adotada, como observado no presente estudo.

Isso pode ser reforçado pelo fato de que a variação da concentração da solução do solo é um processo gradual, podendo levar dias e até semanas, o que proporciona

as plantas um maior tempo de aclimação a concentração de sais (PASSIOURA, 2010), e esse tempo de aclimação ao meio de cultivo é um ponto crucial para o ajustamento osmótico das culturas, o que exige absorção de íons e formação de solutos compatíveis (VETTERLEIN *et al.*, 2004; TAVAKKOLI *et al.*, 2010), o que não ocorre nos cultivos hidropônicos.

Com relação à massa de matéria seca produzida no experimento de primavera, observou-se que, no sistema hidropônico e no solo, a salinidade reduziu linearmente a massa seca, mantendo o mesmo comportamento da massa fresca, o que pode estar relacionado com o teor de água nas folhas, que não foi afetado pela salinidade. O solo foi o sistema que proporcionou menor massa de matéria seca e maior redução percentual (8,93%) quando comparado com a hidroponia (8,27%), o que está de acordo com os resultados obtidos, uma vez que no solo obteve-se menor massa seca e maior teor de água, já na hidroponia esse comportamento foi inverso.

A menor resposta do solo na produção de biomassa no experimento de primavera, quando comparada com a hidroponia, pode estar relacionada com uma limitação na disponibilidade de água e nutrientes para as culturas, que auxilia na manutenção da turgescência e da temperatura foliar. Acredita-se que essa limitação possa ter sido acentuada nos horários do dia de maior demanda evapotranspirativa da cultura, devido à retenção da umidade pelas partículas de solo, estando as plantas sujeitas ao déficit de água. Já no experimento de outono, além da época de cultivo apresentar uma menor demanda evapotranspirativa, adotou-se um limite crítico de tensão de 10 kPa, reduzindo o estresse por secamento quando comparado ao experimento de primavera, em que se adotou um limite crítico de tensão de 20 kPa.

Na hidroponia, diferentemente da dinâmica da água que ocorre no solo, o fornecimento de água e nutrientes é imediato e distribuído ao longo do dia, independente da demanda transpirativa, já que os nutrientes da solução nutritiva se encontram na forma iônica e o fornecimento segue uma programação de frequência de recirculação ao longo de todo o dia.

De forma análoga aos resultados da produção em solo do presente estudo, Turhan *et al.* (2014) cultivaram alface em vaso, com solo de textura franco-arenosa, e observaram que a produção de massa fresca e seca reduziram com o aumento da concentração de sais da água de irrigação. Lucini *et al.* (2015) cultivaram alface em

vaso com areia quartzosa e relatou efeito significativo da salinidade e diminuição na massa de matéria seca.

Sá *et al.* (2017) relataram decréscimo da massa de matéria seca de cinco cultivares de alface cultivadas em solo com águas salinas. Di Mola *et al.* (2017) constataram que o aumento da salinidade da água de irrigação reduziu linearmente a produção de massa de matéria fresca. Silva *et al.* (2020a) cultivaram alface em campo aberto e em ambiente protegido, e constaram que a salinidade reduziu a produção de massa de matéria fresca e seca.

Com relação aos resultados obtidos no sistema hidropônico, os mesmos corroboram com os de Sakamoto *et al.* (2014) com alface em sistema hidropônico, que observaram que o peso fresco da alface foi drasticamente reduzido pela salinidade. Soares *et al.* (2015) registraram decréscimo nas massas de matéria fresca e seca da cultivar 'Tainá' nos dois experimentos conduzidos, no Outono-Inverno e no Verão, onde no último, os efeitos da salinidade foram mais nocivos para a cultura.

Guimarães *et al.* (2017) observaram efeito quadrático da salinidade da solução nutritiva nos dados de massa de matéria fresca e seca, contrariando os resultados obtidos no presente estudo, onde o modelo linear se adequou. Cova *et al.* (2017) produziram alface 'Tainá' em sistema hidropônico NFT e DFT, e nos dois sistemas de cultivo, a salinidade reduziu a produção de massa seca.

Orsini *et al.* (2018) testaram o efeito da salinidade sobre as cultivares 'Impulsion' e 'Teide', sob condições de cobertura com filme plástico transparente e branco, e em ambas as condições e cultivares, observou-se menor produção de massa fresca nos tratamentos mais salinos. Fernandes *et al.* (2018) cultivaram alface americana em sistema hidropônico NFT e observaram que a salinidade reduziu a massa de matéria fresca da parte aérea.

Sousa *et al.* (2020) constataram que a salinidade da solução nutritiva reduziu a massa de matéria fresca da parte aérea da cultivar 'Astra'. Xavier *et al.* (2021) cultivaram três cultivares de alface crespa (Elba, Cristina e Veneranda) e observaram, nas três cultivares, redução da produção de massa fresca com o aumento da salinidade.

6.5 Consumo hídrico, volume evapotranspirado, eficiência do uso de água e produtividade de água

A partir do consumo hídrico acumulado, contabilizado até 25 DAT, foi verificado pela análise de variância (Tabela 11), que a salinidade do meio de cultivo exerceu efeito significativo ($p < 0,01$) sobre a variável consumo hídrico (CH) e volume evapotranspirado (V_{ET}), no sistema hidropônico e em solo, respectivamente, nos experimentos de primavera e outono. Já para o parâmetro eficiência do uso de água (EUA) e produtividade de água (PA), a salinidade não exerceu efeito significativo no sistema hidropônico e no cultivo em solo em qualquer das estações.

Tabela 11. Resumo da análise de variância para o consumo hídrico (CH), volume evapotranspirado (V_{ET}), eficiência do uso de água (EUA) e produtividade de água (PA) das plantas de alface, em hidroponia e em solo, nos experimentos de primavera e outono, em função da condutividade elétrica do meio de cultivo.

FV	GL	Quadrados médios			
		Experimento de primavera		Experimento de outono	
		CH	EUA	CH	EUA
Hidroponia					
Blocos	3	0,143 ^{ns}	8,982 ^{ns}	1,527 ^{ns}	7,421 ^{ns}
CE_{sol}	4	4,964 ^{**}	56,554 ^{ns}	13,846 ^{**}	32,547 ^{ns}
Erro	12	0,534	6,699	0,930	4,788
CV (%)		8,07	7,72	5,23	6,31
		V_{ET}	PA	V_{ET}	PA
Solo					
Blocos	3	0,246 ^{ns}	0,053 ^{ns}	0,879 ^{ns}	0,189 ^{ns}
CE	4	7,685 ^{**}	17,083 ^{ns}	9,625 ^{**}	21,623 ^{ns}
Erro	12	0,389	0,248	0,377	0,546
CV (%)		3,60	3,11	4,69	7,42

^{**}, ^{*} - significativo pelo teste F a 0,01 e 0,05 de probabilidade, respectivamente; ^{ns} - não significativo; CV - coeficiente de variação; FV - fonte de variação; GL - grau de liberdade.

Constatou-se que, no parâmetro V_{ET} , para cada aumento unitário da CE da solução do solo, o decréscimo foi de 5,52% na primavera (Figura 35A) e 9,64% no outono (Figura 35C). Já na hidroponia, o aumento da salinidade promoveu, conforme a análise de regressão, uma redução linear do CH de 8,15% na primavera e 9,35% no outono, para cada aumento unitário na CE_{sol}.

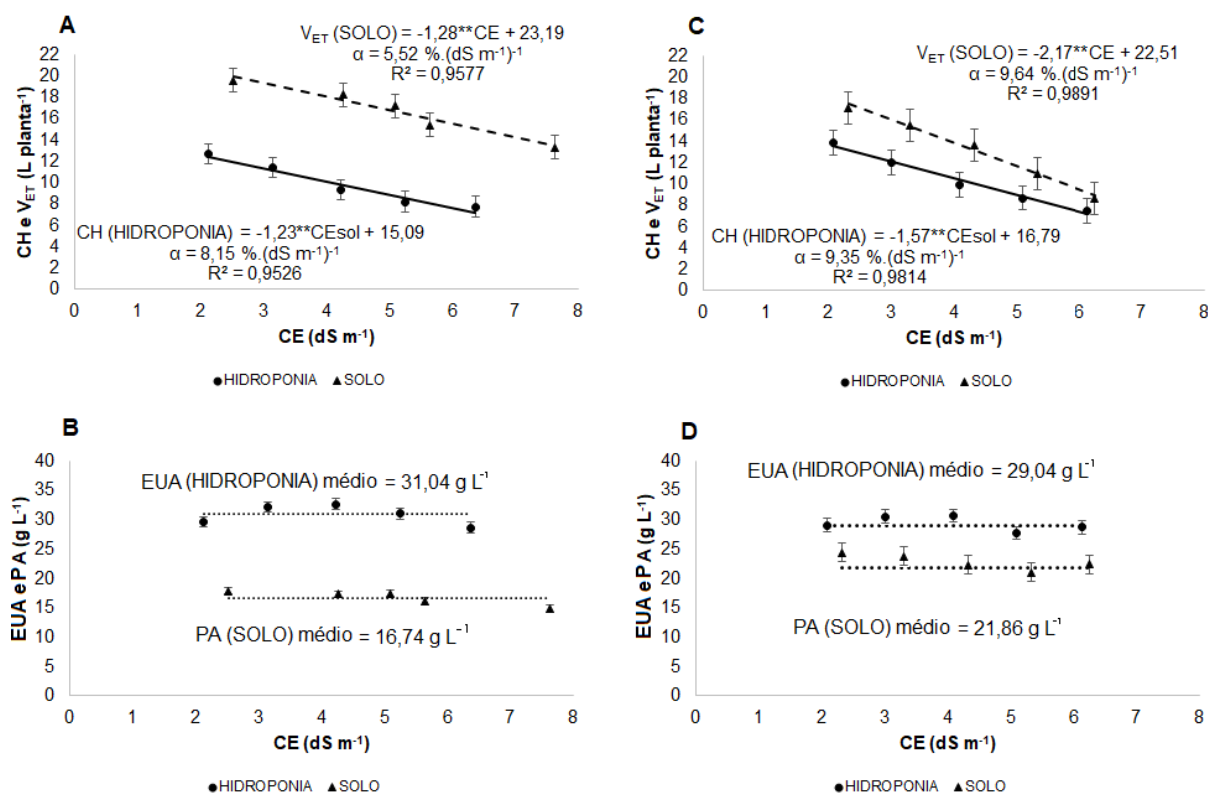


Figura 35. A - Consumo hídrico (CH) e volume evapotranspirado (V_{ET}) e B – eficiência do uso de água (EUA) e produtividade de água (PA) das plantas de alface cultivadas no experimento de primavera, e C - consumo hídrico (CH) e volume evapotranspirado (V_{ET}) e D - eficiência do uso de água (EUA) e produtividade de água (PA) das plantas de alface cultivadas no experimento de outono, em hidroponia e em solo, sob diferentes níveis de condutividade elétrica do meio de cultivo.

No sistema em solo, com relação aos efeitos salinos sobre o volume evapotranspirado (V_{ET}), quando comparados o maior nível salino com o controle, a magnitude dos efeitos foi da ordem de 32,07% na primavera e 49,54% no outono. Já na hidroponia, para a mesma variável, contrastando o maior nível salino com o controle, a magnitude dos efeitos salinos foi da ordem de 38,99% na primavera e 45,88% no outono.

Conforme Figura 35B e Figura 35D, observa-se que, apesar da salinidade não ter exercido efeito significativo sobre os parâmetros EUA e PA, constatou-se que no sistema hidropônico a EUA foi superior a PA do cultivo em solo. De acordo com Soares (2007), a eficiência do uso de água na hidroponia é reconhecidamente superior a produtividade de água do solo, devido as perdas por evaporação serem mínimas. O

fato da salinidade não ter exercido influência significativamente negativa sobre o parâmetro EUA e PA pode indicar certa vantagem de se utilizar águas salobras como insumo, já que a mesma não provocou impacto como o decréscimo na produção de massa de matéria fresca por volume de água consumido.

No experimento de outono, observa-se uma produtividade de água do que na primavera. Tal ocorrência está relacionada a menor demanda evapotranspirativa no outono, devido às baixas temperaturas e menores taxas de incidência de radiação solar, provocando uma menor perda de água por evaporação para atmosfera, aumentando a produtividade de água.

Reduções no consumo hídrico com o aumento da salinidade da solução nutritiva em sistema hidropônico NFT, também foram constatados por Paulus *et al.* (2012), que realizaram dois experimentos com alface em sistema hidropônico NFT, e em ambos, verificaram que o aumento da salinidade da solução nutritiva reduziu linearmente o consumo hídrico, com reduções de 3,89 e 10,13% por aumento unitário da condutividade elétrica da solução nutritiva.

Soares *et al.* (2015) registraram reduções no consumo hídrico ao cultivarem alface americana ('Tainá') com águas salobras. Atzori *et al.* (2016) verificaram que o consumo hídrico da alface foi menor nos tratamentos mais salinos, e ao contrário do observado no presente estudo, os tratamentos menos salinos apresentaram menor produtividade de água.

No estudo conduzido por Soares *et al.* (2019), os autores observaram que o parâmetro eficiência do uso de água foi afetado significativamente pela salinidade da solução nutritiva, se ajustando com o modelo quadrático, ao contrário do observado no presente estudo, onde a salinidade não exerceu efeito significativo.

Tanto no experimento de primavera quanto no de outono, o consumo hídrico (sistema hidropônico) e o volume evapotranspirado (sistema em solo) da alface mantiveram-se crescentes ao longo dos 25 DAT, conforme Figura 36. De acordo com os dados obtidos, constatou-se que a cultura manteve um consumo progressivo e crescente, até mesmo nos tratamentos com os níveis de CE do meio de cultivo mais elevados, que foram os tratamentos que mais restringiram o consumo de água ao longo do experimento.

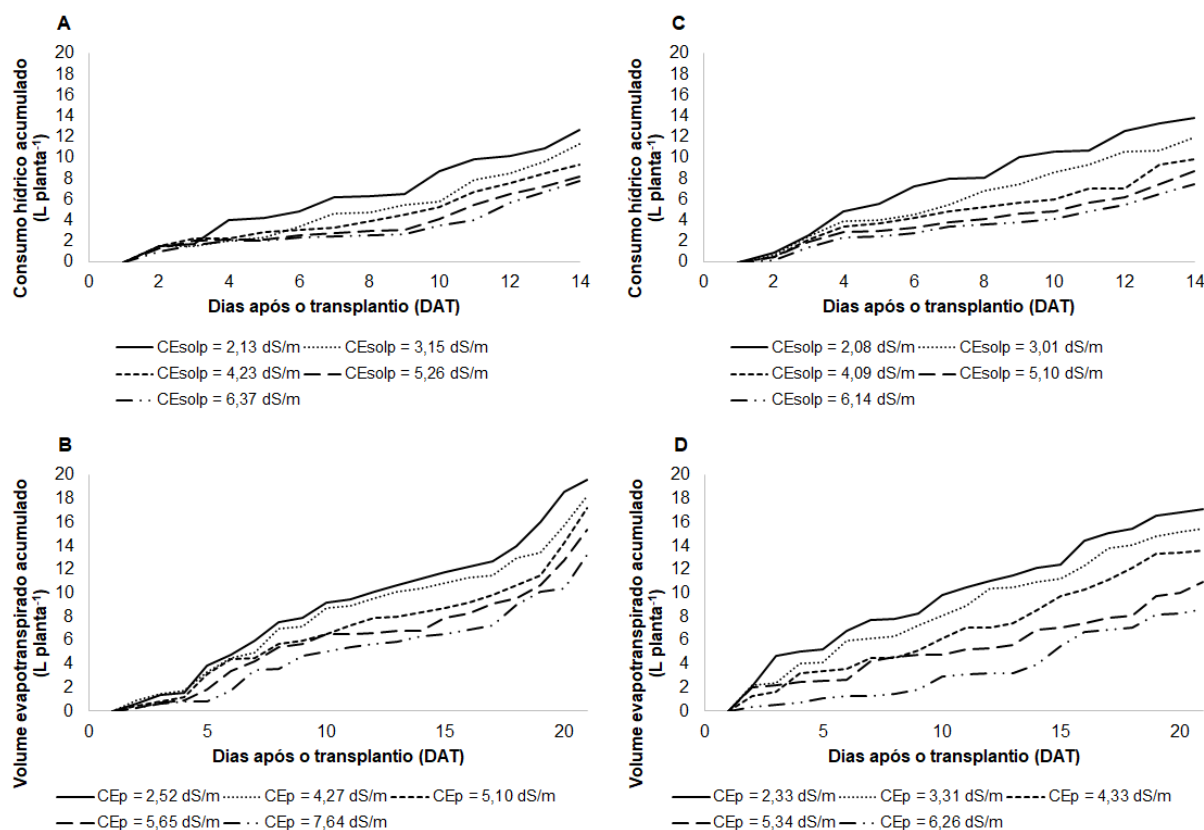


Figura 36. Consumo hídrico acumulado (A) e volume evapotranspirado acumulado (B), por planta de alface cultivada na primavera, e consumo hídrico acumulado (C) e volume evapotranspirado acumulado (D), por planta de alface cultivada no outono, em hidroponia e em solo, ao longo dos 25 dias após o transplanto, sob diferentes níveis de condutividade elétrica do meio de cultivo.

De modo geral, nas primeiras fases de crescimento no cultivo em solo, até os 5 DAT, o incremento do volume evapotranspirado foi baixo. Já no sistema hidropônico, o baixo incremento no consumo hídrico se prolongou até os 12 DAT. A medida que a planta expandiu a área foliar e emitiu uma maior quantidade de folhas, houve um aumento em ambos sistemas, havendo maior demanda de água para suprir as necessidades metabólicas da cultura, sendo esse comportamento mais definido nas plantas de alface cultivadas em solo do que nas plantas cultivadas em hidroponia, onde foi menos variável.

Além disso, em ambos sistemas de cultivo, os resultados são compatíveis com as observações visuais dos sintomas, dos quais se observou uma progressiva e gradativa aclimação das plantas de alface submetidas aos tratamentos salinos, em

que nos períodos iniciais de estabelecimento da cultura no ciclo os sintomas foram mais expressivos e com menor volume de água utilizado.

Com relação ao volume de água utilizado em função dos tratamentos testados, observou-se que, conforme se aumentava os níveis de salinidade do meio de cultivo, em ambos os experimentos e sistemas avaliados, a quantidade de água utilizada era menor.

Altas concentrações de sais dissolvidos na zona das raízes geram um potencial osmótico mais negativo, reduzindo o potencial hídrico total e afetando o desenvolvimento das culturas, exigindo das mesmas uma maior energia para gerar potenciais mais negativos que os encontrados no meio de cultivo para absorverem água. Tais gastos de energia envolvem uma transpiração menor pelas plantas à medida que se aumenta a salinidade do meio de cultivo (SILVA *et al.*, 2013).

Observou-se que as plantas cultivadas em solo apresentaram um maior volume evapotranspirado de água quando comparados com o consumo hídrico das plantas cultivadas em sistema hidropônico NFT, em todos os níveis de salinidade testados. Tal ocorrência está associada ao fato de que no sistema hidropônico está presente apenas o fenômeno da transpiração, já que as perdas de água por evaporação nos tubos e reservatórios são mínimas, pois se constitui um sistema fechado em que há o reaproveitamento da solução nutritiva por meio da recirculação contínua. Já no solo, além da transpiração, há a presença significativa da evaporação, principalmente nas condições climáticas que caracterizam a primavera, contabilizando volumes significativos de água, o que justifica o maior volume acumulado de água contabilizado no solo.

Diante dessa observação, enquanto no solo ocorre o fenômeno da evapotranspiração e na hidroponia ocorre apenas a transpiração, parece conveniente se referir ao volume transpirado na hidroponia como 'consumo hídrico', porém, em solos sem cobertura, nem toda água perdida é consumida pela cultura, tornando-se adequado se referir como 'volume evapotranspirado'.

Esse entendimento é crucial para definir os parâmetros de desempenho do uso da água, na hidroponia e no solo. A síntese de matéria produzida (fotossíntese) e a transpiração estão ligadas aos mecanismos de difusão do CO₂ e água, logo, a eficiência do uso da água é conceituada como a razão entre a produção e a

transpiração. Entretanto, a distinção entre a transpiração das plantas e a evaporação das superfícies do solo apresenta desafios. Logo, a produtividade de água é definida a partir da evapotranspiração acumulada da cultura (FRIZZONE *et al.*, 2012).

Em sistemas de cultivo em solo, onde a água é aplicada diretamente ao solo, a avaliação da 'produtividade de água' é apropriada, pois considera as perdas por evaporação no solo. Em contraste, em cultivos hidropônicos, onde a água é fornecida diretamente às raízes das plantas, as perdas por evaporação do solo são minimizadas. Nesse contexto, a 'eficiência do uso de água' torna-se mais relevante, pois destaca a relação entre a produção e a quantidade direta de água aplicada ao sistema, sem as perdas características do solo.

Portanto, a escolha entre os termos depende das condições específicas do sistema de cultivo, sendo a 'produtividade de água' mais apropriada para cultivos em solo e a 'eficiência do uso de água' mais indicada para sistemas hidropônicos. Essa distinção reflete as características particulares de cada sistema, enfatizando a necessidade de abordagens específicas na avaliação do manejo hídrico em diferentes ambientes de cultivo.

6.6 Solutos inorgânicos

Com base no resumo da análise de variância (Tabela 12), observa-se que a condutividade elétrica do meio de cultivo exerceu efeito significativo ($p < 0,01$) para os parâmetros concentração foliar de Na^+ , K^+ e Cl^- nas folhas de alface no sistema hidropônico NFT e no cultivo em solo, no experimento de primavera e outono.

Tabela 12. Resumo da análise de variância da concentração de sódio (Na^+), potássio (K^+) e cloreto (Cl^-) nas folhas de alface, cultivadas nos experimentos de primavera e outono, em hidroponia e em solo, em função da condutividade elétrica do meio de cultivo.

FV	GL	Quadrados médios					
		Experimento de primavera			Experimento de outono		
		Na^+	K^+	Cl^-	Na^+	K^+	Cl^-
Hidroponia							
Blocos	3	77,628 ^{ns}	44,712 ^{ns}	13,776 ^{ns}	0,458 ^{ns}	0,553 ^{ns}	0,696 ^{ns}
CE_{sol}	4	147,995 ^{**}	424,063 ^{**}	488,316 ^{**}	119,818 ^{**}	388,673 ^{**}	477,103 ^{**}
Erro	12	3,268	9,578	22,289	0,392	0,296	0,611
CV (%)		6,99	5,40	9,61	2,76	3,02	4,71
Solo							
Blocos	3	0,807 ^{ns}	17,126 ^{ns}	1,156 ^{ns}	0,738 ^{ns}	0,214 ^{ns}	0,392 ^{ns}
CE	4	355,222 ^{**}	70,878 ^{**}	1177,712 ^{**}	263,381 ^{**}	48,476 ^{**}	1208,569 ^{**}
Erro	12	3,396	4,100	8,984	0,760	0,084	0,854
CV (%)		8,39	4,67	6,28	3,76	2,70	3,99

^{**}, ^{*} - significativo pelo teste F a 0,01 e 0,05 de probabilidade, respectivamente; ns - não significativo; CV - coeficiente de variação; FV - fonte de variação; GL - grau de liberdade.

De acordo com a Figura 37, observa-se que os teores de Na^+ e Cl^- aumentaram linearmente com o aumento da condutividade elétrica do meio de cultivo nos dois sistemas avaliados em ambas estações de cultivo. No sistema em solo, os teores de Na^+ apresentaram incrementos de 4,86 g de sódio por kg de massa seca no experimento de primavera (Figura 37A) e 4,94 g no experimento de outono (Figura 37D). Já na hidroponia, esse incremento foi da ordem de 3,63 g de sódio por kg de massa seca na primavera e 3,38 g no experimento de outono.

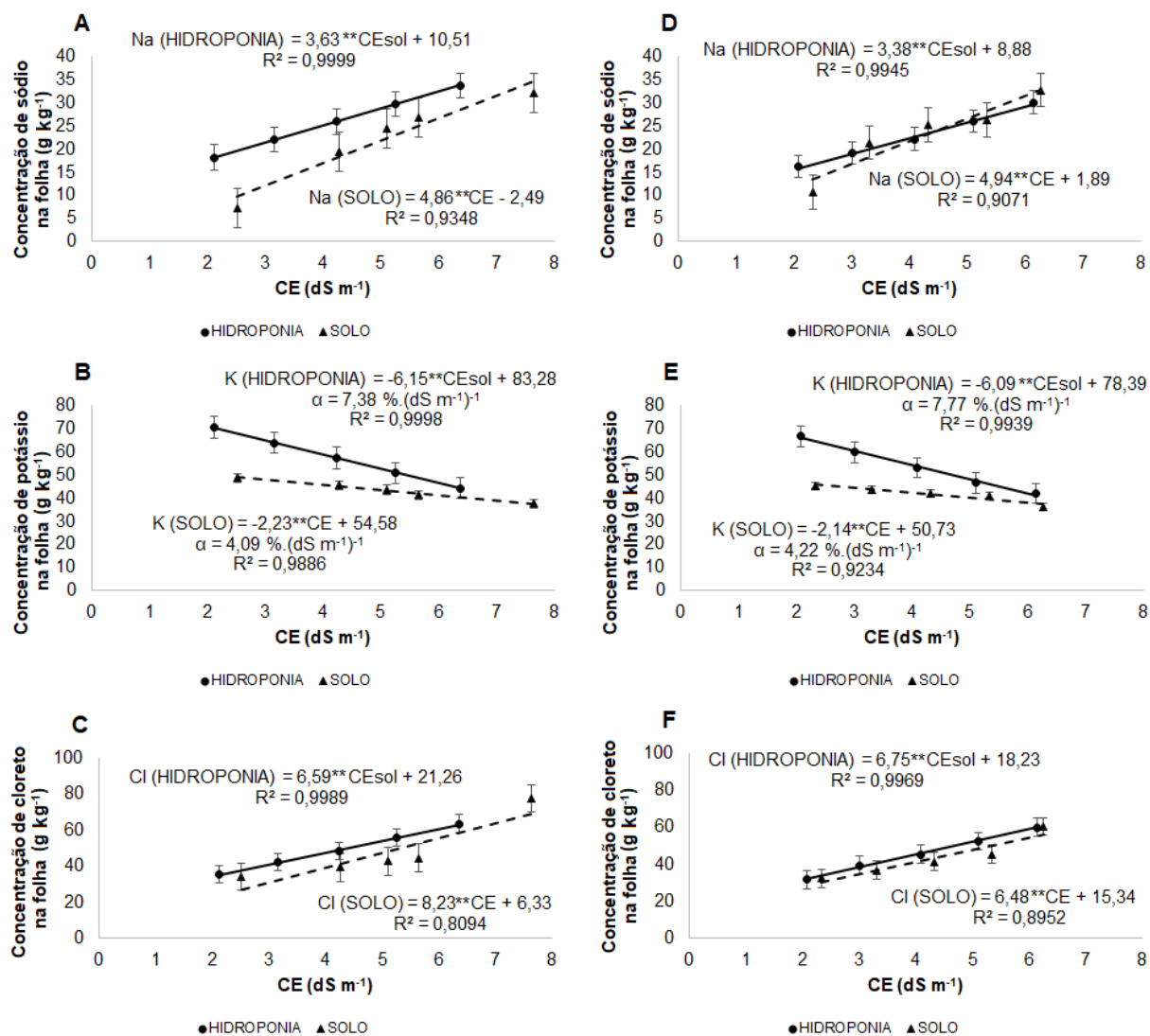


Figura 37. A – Concentração foliar de sódio (Na^+), B - potássio (K^+) e C - cloreto (Cl^-) da alface cultivada na primavera, e D – concentração foliar de sódio (Na^+), E - potássio (K^+) e F - cloreto (Cl^-) da alface cultivada no outono, em hidroponia e em solo, em função da condutividade elétrica do meio de cultivo.

De forma análoga ao comportamento dos teores foliares de Na^+ , o Cl^- também apresentou aumento linear nos teores foliares com o aumento da salinidade do meio de cultivo, com incrementos mais conspícuos em ambas estações e sistemas de cultivo, da ordem de 8,23 g de cloreto por kg de massa seca para o sistema em solo na primavera e 6,48 g no experimento. No cultivo hidropônico, os incrementos foram da ordem de 6,59 g de cloreto por kg de massa seca para o sistema hidropônico na primavera e 6,75 g no outono.

Os resultados obtidos no presente estudo corroboram com os de Kim *et al.* (2016), que cultivaram alface em solo com águas salinas, constatando que o uso contínuo da água de irrigação promoveu o aumento do acúmulo da concentração de Na^+ nas folhas.

Soares *et al.* (2016b) cultivaram alface americana 'Tainá', em sistema hidropônico NFT, e observaram que o aumento da salinidade da solução nutritiva reduziu os teores foliares de potássio e aumentaram o de cloreto e sódio. Cova *et al.* (2019), também utilizando a cultivar 'Tainá', estudaram o comportamento da alface em sistema hidropônico NFT e DFT, sob diferentes frequências de recirculação, e constataram que a salinidade reduziu os teores de K^+ e aumentaram os teores de Na^+ e Cl^- nos tecidos foliares.

Silva *et al.* (2021) cultivaram as cultivares 'Mimosa' e 'Betty', e em ambas, o aumento da salinidade da solução nutritiva reduziu o teor foliar de potássio, já com relação ao sódio, o mesmo apresentou comportamento quadrático com o aumento da condutividade elétrica.

Em ambientes salinos o acúmulo dos íons Na^+ e Cl^- é extensamente registrado na literatura (MENEZES *et al.*, 2017; BAI *et al.*, 2019; ARIF *et al.*, 2020). As plantas acumulam esses íons inorgânicos nos vacúolos das células das folhas, e essa compartimentalização auxilia no processo de ajustamento osmótico, como mecanismo de tolerância a salinidade (TAIZ *et al.*, 2017).

Porém, a acumulação excessiva de Na^+ nos tecidos foliares pode ser altamente tóxica para algumas culturas, afetando o metabolismo celular e o desenvolvimento vegetativo (MEKAWY *et al.*, 2015), o que não foi observado no presente estudo. Um fato interessante verificado foi que na hidroponia, em todos os parâmetros de crescimento e produção avaliados, constatou-se superioridade com relação aos resultados de crescimento no sistema em solo. Porém, antagonicamente foi constatado na hidroponia um maior acúmulo de íons de Na^+ e Cl^- , o que pode estar associado ao melhor ajustamento osmótico da cultura no cultivo hidropônico.

Mesmo em condições salinas, o ajustamento osmótico permite a absorção de água, permitindo a manutenção da turgescência e favorecendo a fotossíntese e outras atividades fisiológicas, que mesmo reduzida, auxiliam na redistribuição do carbono e

nitrogênio nas plantas (HESSINI *et al.*, 2019; KHALID *et al.*, 2020; ZHANG *et al.*, 2022).

Portanto, comparando o sistema hidropônico com o solo, é interessante notar que as maiores concentrações de Na^+ e Cl^- foram observadas no sistema hidropônico. Esse fato reforça a hipótese de que, quando expostos a condições de contorno equivalentes, em meio salino, apesar do potencial matricial na hidroponia ser minimizado, predomina-se o estresse osmótico, sendo os íons de Na^+ e Cl^- mais disponíveis para serem absorvidos pela cultura do que no solo.

Ao contrário do observado nos teores foliares de Na^+ e Cl^- , a concentração de K^+ reduziu linearmente com o aumento da salinidade. No sistema em solo, observou-se decréscimos de 4,09% na primavera e 4,22% no outono, já na hidroponia, os decréscimos foram de 7,38% na primavera e 7,77% no outono.

O acúmulo de Na^+ comumente afeta os processos fisiológicos e bioquímicos dependentes do K^+ , resultando em desbalanços metabólicos desfavoráveis ao crescimento vegetativo. Reduções nos teores de K^+ podem indicar um antagonismo entre os íons de Na^+ e K^+ , uma vez que competem pelos mesmos sítios de entrada nas células, e o excesso do Na^+ favorece sua absorção em detrimento do K^+ . Esse comportamento antagônico na absorção pela membrana plasmática comumente resulta na diminuição dos teores de K^+ , podendo levar a desequilíbrios nutricionais (MEKAWY *et al.*, 2015), no entanto, durante o período da pesquisa não foi observado sintomas de deficiência nutricional que pudessem sugerir associação com a deficiência de K^+ .

6.7 Tolerância à salinidade

Com a análise dos dados de produção relativa obtidos no experimento de primavera (Figura 38), baseado na produção do tratamento controle, foi possível determinar para o cultivo hidropônico a salinidade limiar (SL) da alface, utilizando-se os modelos de Maas e Hoffman (Figura 38A) e o modelo de platô com queda exponencial (Figura 38B), obtendo-se uma salinidade limite de $2,82 \text{ dS m}^{-1}$ (redução de 12,09% para cada aumento unitário da CE) e $2,99 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente.

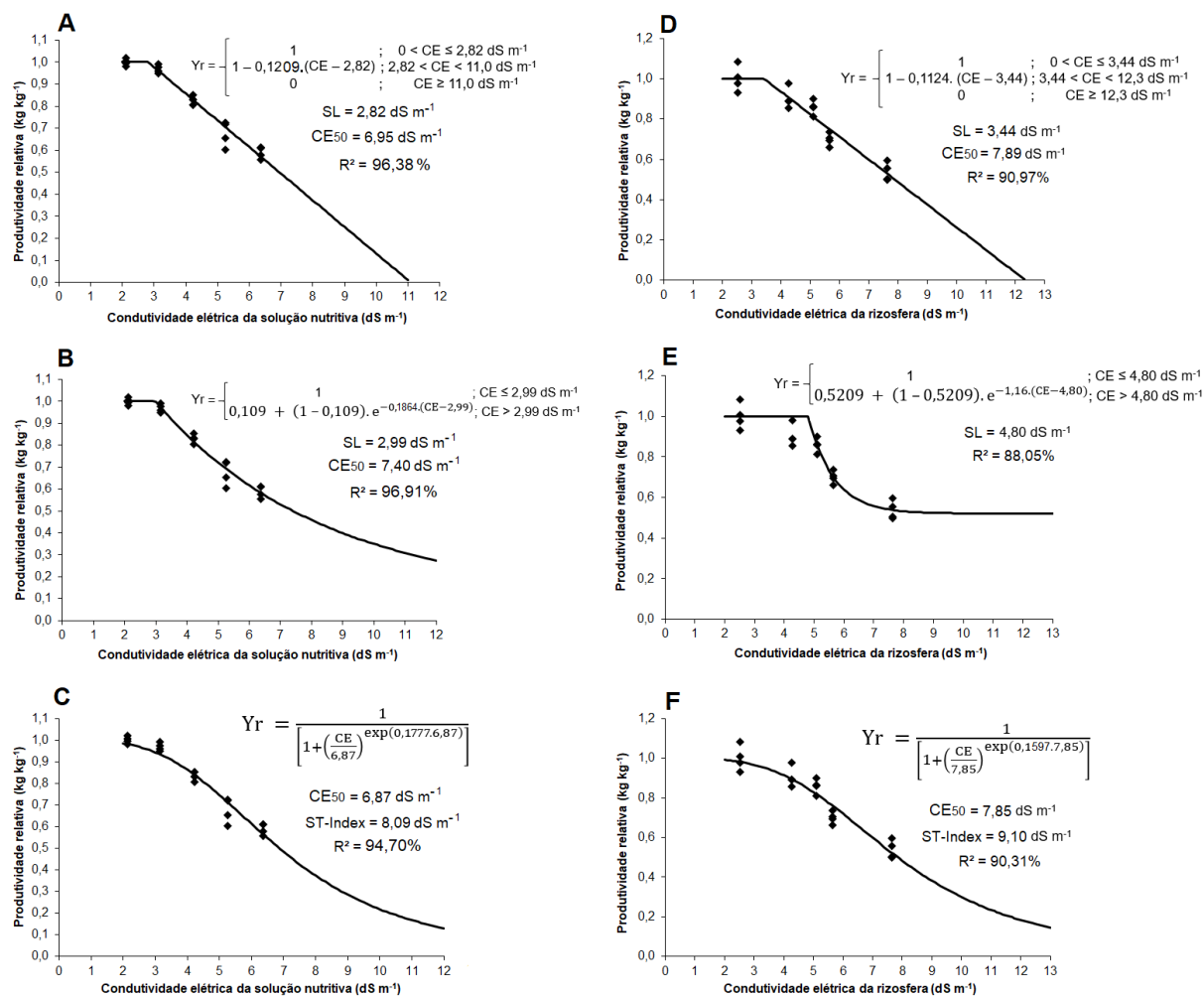


Figura 38. Salinidade limiar da cultura da alface durante o experimento de primavera, ajustados para os modelos de Maas e Hoffman (A), platô com queda exponencial (B) e Steppuhn (C) para o sistema hidropônico, e ajuste dos modelos de Maas e Hoffman (D), platô com queda exponencial (E) e Steppuhn (F) para o sistema em solo, em função da produtividade relativa e da condutividade elétrica do meio de cultivo.

Com relação a salinidade limiar (SL) da alface no cultivo em solo na primavera, pelos modelos de Maas e Hoffman (Figura 38D) e o modelo de platô com queda exponencial (Figura 38E), obteve-se os valores de 3,44 dS m⁻¹ (redução de 11,24% para cada aumento unitário da CE) e 4,80 dS m⁻¹, respectivamente.

No experimento de outono foram observados valores de salinidade limiar (Figura 39) relativamente inferiores aos valores obtidos no experimento de primavera. No cultivo hidropônico, obteve-se uma SL de 2,49 dS m⁻¹ (redução de 14,61% para cada aumento unitário da CE) e 2,70 dS m⁻¹, referentes aos modelos de Maas e Hoffman (Figura 39A) e platô com queda exponencial (Figura 39B). Assim como no

experimento de primavera, os valores de SL obtidos para o sistema em solo foram superiores ao do sistema hidropônico, com SL de $3,01 \text{ dS m}^{-1}$ (redução de 20,17% para cada aumento unitário da CE) e $3,21 \text{ dS m}^{-1}$, valores estes obtidos pelos modelos de Maas e Hoffman (Figura 39D) e platô com queda exponencial (Figura 39E), respectivamente.

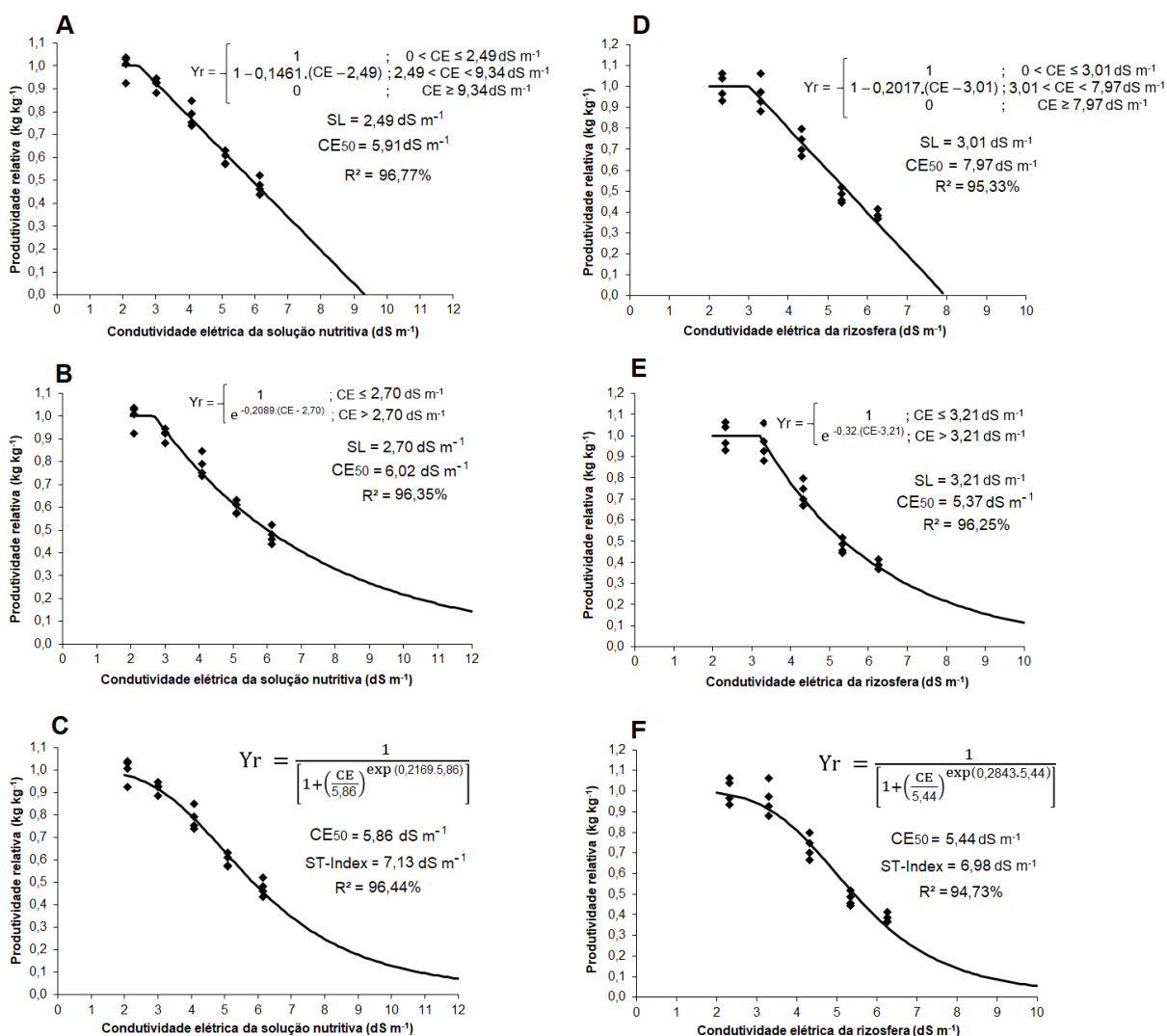


Figura 39. Salinidade limiar da cultura da alface durante o experimento de outono, ajustados para os modelos de Maas e Hoffman (A), platô com queda exponencial (B) e Steppuhn (C) para o sistema hidropônico, e ajuste dos modelos de Maas e Hoffman (D), platô com queda exponencial (E) e Steppuhn (F) para o sistema em solo, em função da produtividade relativa e da condutividade elétrica do meio de cultivo.

Os menores valores de salinidade limiar obtidos no experimento de outono, com relação aos valores obtidos no experimento de primavera, podem ser atribuídos

ao manejo da irrigação adotado e às condições climáticas dentro da casa de vegetação. No outono, observou-se menores temperaturas do ar e uma menor radiação solar incidida, o que proporcionou uma menor temperatura do meio de cultivo. Além disso, no experimento de outono adotou-se uma tensão crítica de 10 kPa, tornando menor a máxima CE experimentada pela cultura e estreitando a faixa de variação de umidade do solo a cada irrigação. Esses fatores implicaram diretamente na salinidade média ponderada do meio de cultivo de cada tratamento testado, sendo menores no outono, já que a relação da temperatura juntamente com a variação da umidade do solo é proporcional a CE média ponderada do meio de cultivo. Conseqüentemente, os pontos (condutividade elétrica do meio de cultivo x produtividade relativa) das curvas referentes aos modelos de tolerância aplicados tornam-se mais próximos, e conseqüentemente com um declive mais acentuado da curva, ou seja, com uma maior redução percentual por aumento unitário da salinidade.

Diversos valores de salinidade limiar podem ser observados em diferentes estudos devido às diferentes condições de contorno que determinam a tolerância da cultura à salinidade. Turhan *et al.* (2014) utilizaram e diluíram água do mar em diferentes concentrações para irrigação da alface, em vaso com solo de textura franco-arenosa, concluindo que reduções significativas na produtividade só ocorreram nos tratamentos acima de 3,7 dS m⁻¹.

Sá *et al.* (2017) obtiveram para as cultivares 'Simpson Semente Preta', 'Alba', 'Mimosa Vermelha', 'Veneranda' e 'Mônica SF31' as tolerâncias à salinidade de 2,1 (moderadamente sensível); 3,0 (moderadamente tolerante); 1,4 (moderadamente sensível); 3,0 (moderadamente tolerante) e 1,4 (moderadamente sensível) dS m⁻¹, respectivamente. Já Kim *et al.* (2018) observaram que o ponto de concentração de sais no qual o rendimento começa a cair foi de 0,9 dS m⁻¹.

Kim *et al.* (2020) irrigaram alface em solo com água dessalinizada, com diferentes níveis de condutividade elétrica, e observaram que só houve queda na produção a partir do tratamento com salinidade de 3,4 dS m⁻¹. Kurunc (2021) cultivou alface em lisímetros de pesagem, obtendo-se uma salinidade limiar de 1,84 dS m⁻¹ com uma diminuição no rendimento de 8,26% para cada aumento unitário na salinidade acima do limiar.

Já Ben-Asher *et al.* (2021) irrigaram a alface por aspersão com águas de diferentes salinidades e observaram uma queda na produção a partir da CE de 1,1 dS

m^{-1} , com redução do rendimento em 8,0% por aumento unitário da CE. A baixa salinidade limiar obtida para alface em sistemas de irrigação por aspersão pode ser associada ao acúmulo de íons na superfície das folhas, provocando injúrias (RHOADES *et al.*, 2000; SHARMA; MINHAS, 2005).

Considerando que na primavera o modelo que melhor se ajustou ao solo foi o de Maas e Hoffman, com salinidade limiar de $3,44 \text{ dS m}^{-1}$, e para o cultivo hidropônico foi o de platô com queda exponencial, com salinidade limiar de $2,99 \text{ dS m}^{-1}$, verifica-se uma maior tolerância da alface à salinidade no cultivo em vaso, com uma diferença de $0,45 \text{ dS m}^{-1}$. Com relação a salinidade limiar observada no experimento de outono, os valores obtidos foram de $2,49 \text{ dS m}^{-1}$ (modelo de Maas e Hoffman) para a hidroponia e $3,21 \text{ dS m}^{-1}$ (modelo de platô com queda exponencial) para o solo, apresentando uma diferença de $0,72 \text{ dS m}^{-1}$.

Segundo Bione (2017), o modelo de platô seguido de queda exponencial, apesar de não apresentar de forma simples o significado biofísico do comportamento de uma cultura com relação a sua tolerância à salinidade, como o modelo proposto por Steppuhn *et al.* (2005a), apresenta um indicador de salinidade limiar potencial, de forma análoga ao modelo de Maas e Hoffman (1977), sem o inconveniente de perda de ajuste quando a produtividade relativa reduzir abaixo de 50%.

Quanto ao decréscimo relativo da produtividade de MFPA por aumento unitário da CE, referente ao parâmetro 'b' do modelo de Maas e Hoffman, observa-se maior tolerância da alface quando cultivada em solo na primavera. Enquanto no solo a produtividade comercial decresceu a razão de $11,24 \% (\text{dS m}^{-1})^{-1}$, na hidroponia a redução foi de $12,09 \% (\text{dS m}^{-1})^{-1}$, diferença de $0,85 \% (\text{dS m}^{-1})^{-1}$. No outono, observou-se decaimentos da produtividade relativa a uma taxa de $14,61 \% (\text{dS m}^{-1})^{-1}$ no cultivo hidropônico e $20,17 \% (\text{dS m}^{-1})^{-1}$ em solo, apresentando uma diferença de $5,56 \% (\text{dS m}^{-1})^{-1}$.

Analogamente aos sistemas de cultivo em solo, na hidroponia diferentes valores de salinidade limiar podem ser obtidos quando se varia as condições de clima e manejo de uma cultura. Andriolo *et al.* (2005) obtiveram uma salinidade limiar de $2,00 \text{ dS m}^{-1}$ com redução linear de $14,90\% (\text{dS m}^{-1})^{-1}$ para a cultura da alface em sistema semi-hidropônico. Já Soares (2007), utilizou a cultivar 'Verônica' em sistema hidropônico NFT e obteve uma salinidade limiar $2,69 \text{ dS m}^{-1}$ com redução linear $8,35 \% (\text{dS m}^{-1})^{-1}$.

Atzori *et al.* (2016) conduziram experimento com a alface cultivada com água salina, em sistema hidropônico NFT, e observaram que a salinidade só gerou redução significativa da produção a partir da CE de $6,2 \text{ dS m}^{-1}$. Niu *et al.* (2018) cultivaram alface em sistema hidropônico NFT, com diferentes concentrações de NaCl na solução nutritiva, e concluíram que entre os níveis de salinidade de 2,4 e $3,2 \text{ dS m}^{-1}$ as plantas mostraram-se tolerantes à salinidade, não havendo perdas na produção. Rodrigues (2002) afirma que pode haver efeitos benéficos dos sais para a cultura da alface, e os mesmos podem proporcionar maior firmeza as plantas.

Com relação ao modelo de Steppuhn, o mesmo não estabelece a formação de um platô de resposta máxima associada a uma produtividade relativa de 100% seguido de queda, mas um comportamento sigmoidal e o conceito de CE_{50} , que corresponde a salinidade associada a um decréscimo de 50% da produção obtida com relação ao tratamento controle.

Os valores de CE_{50} estimados para a hidroponia foram de $6,87 \text{ dS m}^{-1}$ na primavera e $5,86 \text{ dS m}^{-1}$ no outono, já no solo esses valores referentes a cada estação foram de $7,85 \text{ dS m}^{-1}$ e $5,44 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente. No modelo proposto por Maas e Hoffman (1977), a produtividade relativa de 50% corresponde na hidroponia a $6,95 \text{ dS m}^{-1}$ na primavera e $5,91 \text{ dS m}^{-1}$ no outono, já no solo esses valores referentes a cada estação foram de $7,89 \text{ dS m}^{-1}$ e $7,97 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente; já para o modelo de platô seguido de queda exponencial, no cultivo hidropônico a CE_{50} corresponde a $7,40 \text{ dS m}^{-1}$ na primavera e $6,02 \text{ dS m}^{-1}$ no outono, porém, no cultivo em solo o modelo apresentou comportamento constante e tendendo ao infinito na primavera e um CE_{50} de $5,37 \text{ dS m}^{-1}$ no outono.

De acordo com a metodologia para estimativa da tolerância à salinidade das culturas, descrito no modelo de 'desconto modificado', proposto por Steppuhn *et al.* (2005a), os índices de tolerância à salinidade para a alface cultivada em sistema hidropônico foram de $8,09 \text{ dS m}^{-1}$ ($s = 0,1777$) e $7,13 \text{ dS m}^{-1}$ ($s = 0,2169$), e para o solo os valores encontrados foram de $9,10 \text{ dS m}^{-1}$ ($s = 0,1597$) e $6,98 \text{ dS m}^{-1}$ ($s = 0,2843$), respectivamente para os experimentos de primavera e outono. Em seu trabalho, Steppuhn *et al.* (2005b) obtém, a partir dos dados dos estudos conduzidos por Ayers *et al.* (1951), Osawa (1965) e Bernstein *et al.* (1974), para a alface cultivada em solo, um índice de $5,79 \text{ dS m}^{-1}$, produzido com uma CE_{50} de $4,83 \text{ dS m}^{-1}$ e uma declividade 's' de $0,1980 (\text{dS m}^{-1})^{-1}$. Observa-se que, tanto na hidroponia quanto no

solo, os índices de tolerância à salinidade produzidos foram superiores aos encontrados por Steppuhn *et al.* (2005b).

Apesar de mais difundido e popularizado, o modelo proposto por Maas e Hoffman (1977) apresenta mais limitações que o modelo proposto por Steppuhn *et al.* (2005a), sendo o último mais aplicado e reconhecido atualmente pelos pesquisadores (BABAZADEH *et al.*, 2016; RAMESHWARAN *et al.*, 2016; STAVRIDOU *et al.*, 2017).

Nas Figuras 40 e 41 é apresentado, para os experimentos de primavera e outono, respectivamente, as curvas de tolerância da alface à salinidade no cultivo em solo e em sistema hidropônico, baseados nos modelos propostos por van Straten *et al.* (2019), considerando a salinidade limiar aquela condutividade elétrica do meio de cultivo associada a 90% do rendimento relativo da cultura.

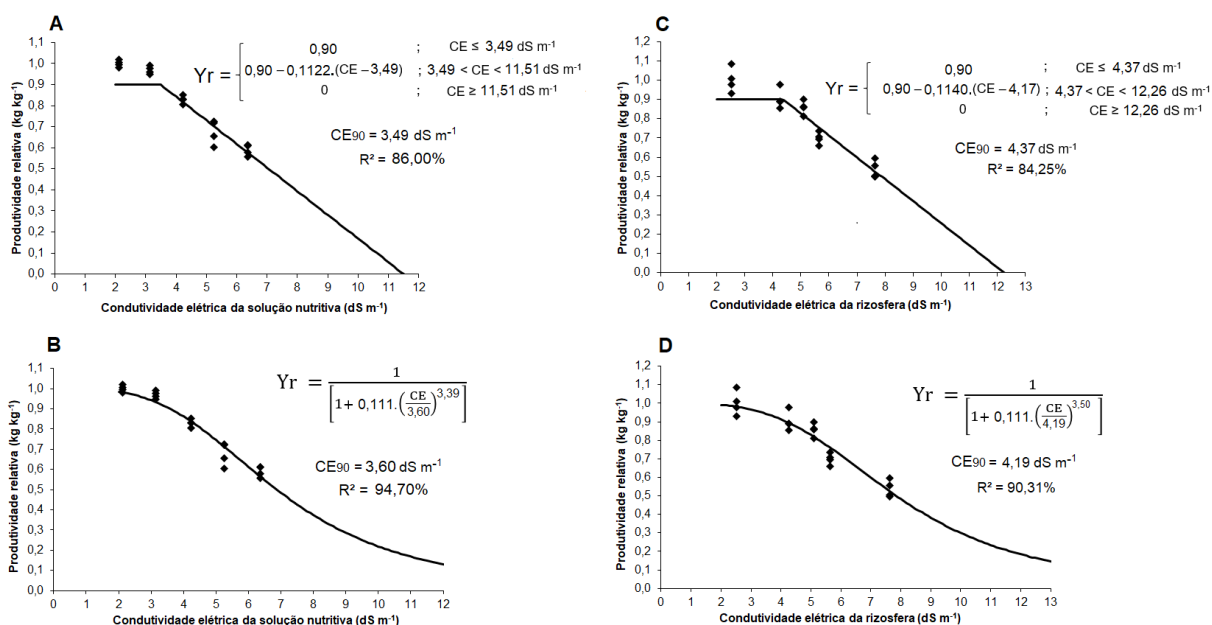


Figura 40. Salinidade limiar da cultura da alface durante o experimento de primavera, ajustados para os modelos de van Straten (A – Maas e Hoffman modificado e B – van Genuchten e Hoffman modificado) para o sistema hidropônico, e ajuste dos modelos de van Straten (C – Maas e Hoffman modificado e D – van Genuchten e Hoffman modificado) para o sistema em solo, em função da produtividade relativa e da condutividade elétrica do meio de cultivo.

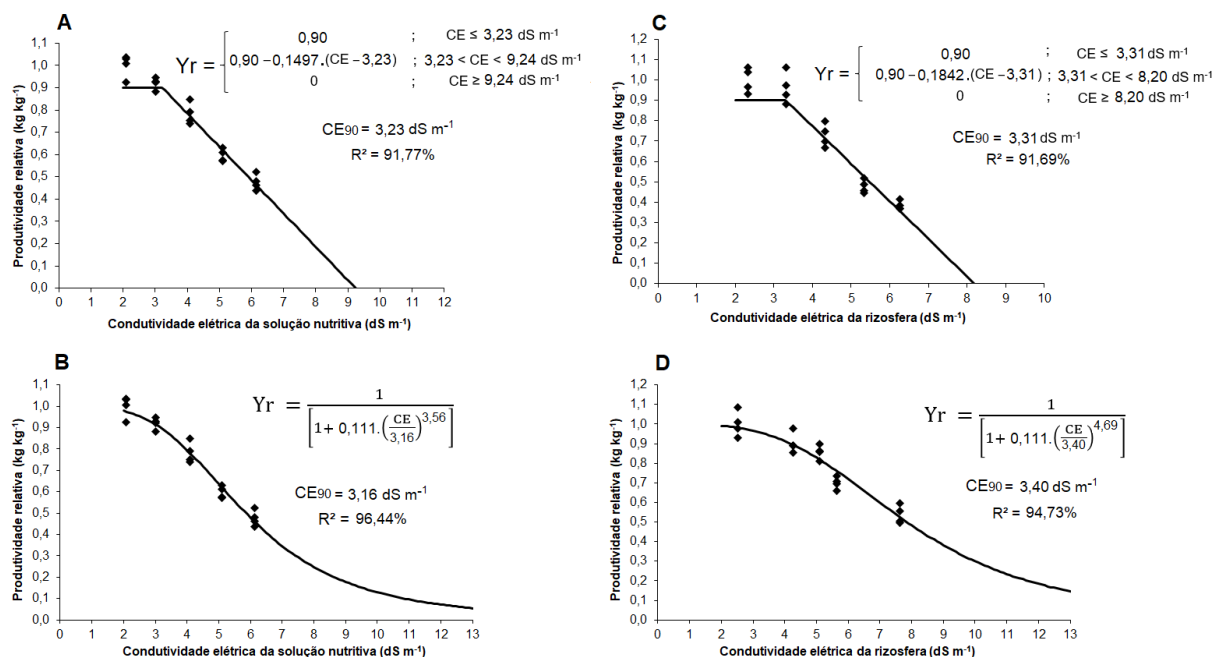


Figura 41. Salinidade limiar da cultura da alface durante o experimento de outono, ajustados para os modelos de van Straten (A – Maas e Hoffman modificado e B – van Genuchten e Hoffman modificado) para o sistema hidropônico, e ajuste dos modelos de van Straten (C – Maas e Hoffman modificado e D – van Genuchten e Hoffman modificado) para o sistema em solo, em função da produtividade relativa e da condutividade elétrica do meio de cultivo.

De acordo com a Figura 40A, observa-se que no sistema hidropônico no experimento de primavera, a alface apresentou uma CE_{90} equivalente a $3,49 \text{ dS m}^{-1}$, com redução percentual de $11,22 \% (\text{dS m}^{-1})^{-1}$, para o modelo de Maas e Hoffman modificado; já para o modelo de van Genuchten e Hoffman modificado (Figura 40B), a CE_{90} foi de $3,60 \text{ dS m}^{-1}$. No sistema em solo, para o modelo de Maas e Hoffman modificado (Figura 40C), obteve-se um limiar de $4,37 \text{ dS m}^{-1}$ para o rendimento de 90%, com redução percentual de $11,40 \% (\text{dS m}^{-1})^{-1}$; já para o modelo de van Genuchten e Hoffman modificado (Figura 40D), esse limiar foi de $4,19 \text{ dS m}^{-1}$.

Os valores de CE_{90} obtidos no experimento de outono (Figura 41) foram inferiores aos obtidos no experimento de primavera. Para o sistema hidropônico, a alface apresentou uma CE_{90} de $3,23 \text{ dS m}^{-1}$ e redução de $14,97 \% (\text{dS m}^{-1})^{-1}$, para o modelo de Maas e Hoffman modificado (Figura 41A), e $3,16 \text{ dS m}^{-1}$ para o modelo de van Genuchten e Hoffman modificado (Figura 41B). No cultivo em solo, para esses

modelos, os valores obtidos foram de 3,31 dS m⁻¹, com redução de 18,42 % (dS m⁻¹)¹, e 3,40 dS m⁻¹.

Conforme van Straten *et al.* (2019), a estimativa da salinidade limiar de uma cultura, por métodos de regressão de mínimos quadrados ordinários (MQO), como utilizado nos modelos de Maas e Hoffman, Steppuhn e platô com queda exponencial, apresentam problemas, tais como: provável viés devido a incerteza da salinidade do solo; análise de incertezas e correlações dos parâmetros; robustez questionável; presença de ruídos nas medições e consequências nas correlações dos parâmetros para a variabilidade das estimativas. Para os autores, o MQO considera que a salinidade do solo, variável independente, é conhecida com precisão, o que não é real, gerando estimativas equivocadas.

Além disso, apesar dos valores de salinidade limiar para o rendimento relativo de 100% estar consolidado e amplamente difundido na prática agrícola, é duvidoso existir um limiar tão alto (VAN STRATEN *et al.*, 2019). Diante disso, os autores consideram que a CE₉₀ constitui um parâmetro alternativo e com maior significado agrônômico, quando comparados ao parâmetro limiar proposto por Maas e Hoffman (1977) e pela CE₅₀ proposto por Steppuhn *et al.* (2005a). Apesar da CE₅₀ ser determinado com relativa precisão e melhores propriedades matemáticas do que o modelo linear, do ponto de vista agrícola é menos atrativo e interessante na prática.

Além de considerar a incerteza de previsão do rendimento esperado em uma salinidade do solo, considera a covariância. Em seu modelo os autores mostraram, com uma simples transformação, poder estimar a incerteza da estimativa. Logo, concluíram que o viés e a variância da estimativa são menores do que o limiar para o rendimento de 100%, com maior robustez (VAN STRATEN *et al.*, 2019; VAN STRATEN *et al.*, 2021).

Em geral, de acordo com os resultados do presente estudo, tanto no solo quanto na hidroponia, observou-se uma maior tolerância da alface à salinidade, quando comparado com os valores de salinidade limiar apresentados por Maas e Hoffman (1977), que é de 1,3 dS m⁻¹ com redução do rendimento em 13% para cada aumento unitário da CE, sendo classificada como moderadamente sensível (MAAS, 1984).

Com base nos resultados obtidos e nos valores de salinidade limiar baseados no modelo de Maas e Hoffman (1977), a alface seria classificada como moderadamente sensível no cultivo hidropônico e moderadamente tolerante no solo. Porém, vale ressaltar que utilizar a classificação proposta por Maas (1984) para reclassificar a alface, com relação à tolerância à salinidade de acordo com os resultados obtidos no presente estudo, são incoerentes, uma vez que a classificação proposta pelo autor é para cultivos em solo, baseados na condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, e não na CE ponderada ao longo do ciclo associada a variação de temperatura e à umidade real ($\Delta\theta$; umidade na capacidade de campo|umidade crítica) das condições de cultivo, muito menos para condições hidropônicas.

No contexto da salinidade e do uso de águas salobras, principalmente em regiões áridas e semiáridas, considera-se como fatores de maior interesse a redução percentual por aumento unitário da salinidade do meio de cultivo da variável de interesse econômico, além da salinidade limiar e sua tolerância. De acordo com o presente estudo, em geral, observa-se que apesar do cultivo hidropônico proporcionar maior crescimento e produção na primavera, no solo obteve-se uma maior salinidade limiar e menor redução percentual do principal parâmetro de interesse comercial, que é a massa de matéria fresca da parte aérea. Já no outono, os maiores valores de produção de massa de matéria fresca foram observados no cultivo em solo, bem como uma maior salinidade limiar, porém, também se observou uma maior redução percentual por aumento unitário da salinidade.

Logo, na comparação de sistemas de cultivo, como proposto pelo presente estudo, concluir que a hidroponia promoveu melhor desenvolvimento vegetativo para alface, sob às condições ambientais específicas, poderia ser adequado e vantajoso para condições de cultivo com insumos convencionais (condições não salinas) onde a salinidade e a concentração de íons estão em equilíbrio com o desenvolvimento ótimo da cultura. Porém, para o contexto da salinidade e o aproveitamento de águas salobras como fonte de água de irrigação, o solo com textura arenosa e em condições ideias de drenagem para o controle da salinidade, proporcionou uma maior tolerância da cultura à salinidade.

6.7.1 Simulações da tolerância à salinidade

Na Tabela 13 apresenta-se, para os experimentos de primavera e outono, os valores de salinidade limiar (SL) real da alface em cultivo hidropônico, com a respectiva redução percentual (RP) por aumento unitário da salinidade, obtidos considerando-se o procedimento proposto e baseado na condutividade elétrica real do meio de cultivo. Também se apresenta os valores de SL e RP obtidos por simulação, desconsiderando-se o efeito da temperatura sobre a condutividade elétrica da solução nutritiva.

Tabela 13. Valores de salinidade limiar e redução percentual da alface, obtidos para a hidroponia nos experimentos de primavera e outono, considerando a tolerância real e os valores simulados, ajustados para os modelos de Maas e Hoffman, Steppuhn, platô com queda exponencial, van Straten (MH_m e vGH_m).

Modelo testado	Tolerância considerando a CE _{real} (dS m ⁻¹)	RP real (%)	SH		Diferença da tolerância real pela simulada (dS m ⁻¹)
			SL (dS m ⁻¹)	RP (%)	
Experimento de primavera					
Maas e Hoffman	2,82	12,09	2,67	12,77	0,15
Steppuhn	6,87	17,77	6,51	18,80	0,36
Platô com queda exponencial	2,99	-	2,82	-	0,17
van Straten (MH _m)	3,49	11,22	3,31	11,89	0,18
van Straten (vGH _m)	3,60	-	3,41	-	0,19
Experimento de outono					
Maas e Hoffman	2,49	14,61	2,41	15,00	0,08
Steppuhn	5,86	21,69	5,69	22,24	0,17
Platô com queda exponencial	2,70	-	2,62	-	0,08
van Straten (MH _m)	3,23	14,97	3,13	15,34	0,10
van Straten (vGH _m)	3,16	-	3,06	-	0,10

SH – simulação hidroponia (sem descompensação de temperatura); RP – redução percentual; SL – salinidade limiar; MH_m – Maas e Hoffman modificado; vGH_m – van Genuchten e Hoffman modificado.

Conforme Tabela 13, observa-se menores valores de salinidade limiar pela simulação, uma vez que não foi contemplado o efeito da temperatura, considerando-se que a temperatura da solução nutritiva se manteve a 25°C ao longo de todo ciclo. Quanto maior a temperatura do meio de cultivo maior é a solubilidade dos sais, o que

gera mais íons dissociados para a solução, aumentando a salinidade. Logo, o aumento da redução percentual ao não considerar o efeito da temperatura pela simulação é esperado, uma vez que os pontos da curva de rendimento relacionados com a CE do meio de cultivo se tornam mais próximos, acentuando a declividade.

Nas Tabelas 14 e 15 é apresentado, para o sistema em solo nos cultivos de primavera e outono, os valores de salinidade limiar com as respectivas reduções percentuais (reais e simulados) e as diferenças entre os valores de salinidade limiar reais e simulados, respectivamente.

Tabela 14. Valores de salinidade limiar e redução percentual da alface, obtidos para o sistema em solo na primavera e outono, considerando a tolerância real e os valores simulados, ajustados para os modelos de Maas e Hoffman, Steppuhn, platô com queda exponencial, van Straten (MH_m e vGH_m).

Modelo testado	Tolerância considerando a CE _{real} (dS m ⁻¹)	RP real (%)	SS ₁		SS ₂		SS ₃	
			SL (dS m ⁻¹)	RP (%)	SL (dS m ⁻¹)	RP (%)	SL (dS m ⁻¹)	RP (%)
Experimento de primavera								
Maas e Hoffman	3,44	11,24	3,30	11,59	1,35	24,39	1,40	23,48
Steppuhn	7,85	15,97	7,58	16,44	3,27	41,09	3,40	39,52
Platô com queda exponencial	4,80	-	4,61	-	1,80	-	1,87	-
van Straten (MH _m)	4,17	10,52	4,02	10,90	1,49	19,22	1,55	18,57
van Straten (vGH _m)	4,19	-	4,03	-	1,85	-	1,92	-
Experimento de outono								
Maas e Hoffman	3,01	20,17	2,96	20,45	1,44	41,59	1,46	40,74
Steppuhn	5,44	28,43	5,35	28,82	2,62	58,70	2,66	57,56
Platô com queda exponencial	3,21	-	3,16	-	1,54	-	1,56	-
van Straten (MH _m)	3,31	18,42	3,26	18,75	1,59	38,12	1,61	-
van Straten (vGH _m)	3,40	-	3,34	-	1,63	-	1,65	-

SS₁ – simulação solo 1 (com variação de umidade e sem descompensação de temperatura); SS₂ – simulação solo 2 (considerando à condutividade elétrica do extrato de saturação e sem descompensação de temperatura); SS₃ – simulação solo 3 (considerando à condutividade elétrica do extrato de saturação e com descompensação de temperatura); RP – redução percentual; SL – salinidade limiar; MH_m – Maas e Hoffman modificado; vGH_m – van Genuchten e Hoffman modificado.

Tabela 15. Valores das diferenças entre a tolerância real e simulada, para o sistema em solo nos experimentos de primavera e outono, obtidos pelos modelos de Maas e Hoffman, Steppuhn, platô com queda exponencial, van Straten (MH_m e vGH_m).

Modelo testado	Diferença da tolerância real pela simulada (dS m ⁻¹)					
	Experimento de primavera			Experimento de outono		
	SS ₁	SS ₂	SS ₃	SS ₁	SS ₂	SS ₃
Maas e Hoffman	0,14	2,09	2,04	0,05	1,57	1,55
Steppuhn	0,27	4,58	4,45	0,09	2,82	2,78
Platô com queda exponencial	0,19	3,00	2,93	0,05	1,67	1,65
van Straten (MH _m)	0,15	2,68	2,62	0,05	1,72	1,70
van Straten (vGH _m)	0,16	2,34	2,27	0,06	1,77	1,75

SS₁ – simulação solo 1 (com variação de umidade e sem descompensação de temperatura); SS₂ – simulação solo 2 (considerando à condutividade elétrica do extrato de saturação e sem descompensação de temperatura); SS₃ – simulação solo 3 (considerando à condutividade elétrica do extrato de saturação e com descompensação de temperatura); RP – redução percentual; SL – salinidade limiar; MH_m – Maas e Hoffman modificado; vGH_m – van Genuchten e Hoffman modificado.

Na simulação SS₁, quando não foi considerada a variação da temperatura da rizosfera, observa-se, de forma análoga à hidroponia, menores valores de salinidade limiar e maiores reduções percentuais, quando comparados com os valores reais. Destaca-se que as menores diferenças são observadas nos valores de salinidade limiar do experimento de outono, em que, devido às baixas temperaturas do meio de cultivo, o efeito da temperatura sobre a salinidade limiar da cultura foi menor.

Os menores valores de salinidade limiar e maiores reduções percentuais foram obtidos pela simulação SS₂ e SS₃, onde simulou-se utilizar o método do extrato de saturação do solo para determinação da salinidade do meio de cultivo, com (SS₃) e sem (SS₂) descompensação de temperatura. Nessas simulações, observa-se que, para o modelo de Maas e Hoffman, obteve-se uma salinidade limiar de 1,35 (primavera) e 1,44 (outono) dS m⁻¹ para SS₂ e 1,40 (primavera) e 1,46 (outono) dS m⁻¹ para SS₃, valores próximos ao referenciado por Maas e Hoffman (1977) em seus trabalhos com alface, onde obtiveram uma SL de 1,30 dS m⁻¹. Já para a redução percentual, os valores obtidos pela simulação foram de 24,39 (primavera) e 41,59 (outono) % para a SS₂, e 23,48 (primavera) e 40,74 (outono) % para SS₃, correspondendo a mais que o dobro do obtido pelos autores, que foi de 13%.

Com isso, conclui-se que os valores obtidos pela simulação SS₂ e SS₃ foram os que mais se afastaram dos valores reais (Tabela 15), comprovando que utilizar o método do extrato de saturação para determinação da salinidade pode levar a maiores erros, subestimando a tolerância das culturas, já que o método adota critérios subjetivos para o preparo da pasta saturada, como utilizar um volume de água que não corresponde a faixa de umidade das condições reais de cultivo, diluindo e diminuindo a concentração de sais.

Um fato observado, tanto para os resultados simulados para hidroponia quanto para o solo, quando se excluiu apenas o efeito da temperatura, foi com relação a baixa diferença entre os valores reais de tolerância e os simulados, com uma faixa de diferença da ordem de 0,05 a 0,36 dS m⁻¹. Já quando se excluiu o efeito da variação de umidade e considera-se que a salinidade foi determinada pelo extrato de saturação, o impacto sobre a tolerância da cultura foi de maior magnitude, com diferenças entre a tolerância real e a simulada da ordem de 1,55 a 4,58 dS m⁻¹.

7. CONCLUSÕES

As respostas das culturas à salinidade são influenciadas por uma gama de fatores, incluindo a estação de cultivo e as práticas de manejo da fertirrigação. Embora o sistema hidropônico minimize o efeito do potencial matricial, a avaliação do desempenho da cultura da alface só apresentou um crescimento vegetativo superior, com relação ao solo, durante o verão. Além disso, constatou-se que, tanto no verão quanto no outono, a cultura manifestou uma maior capacidade de tolerância à salinidade no solo. Estes resultados destacam a complexidade das interações entre os diversos elementos que regem a resposta das plantas à salinidade, reforçando a importância de considerar não apenas a técnica de cultivo, mas também a existência de nuances específicas relacionadas à sazonalidade.

Na prática de cultivo em solo, a elevação da tensão crítica por secamento manifestou-se como um potencializador da tolerância da cultura à salinidade. Este fenômeno foi observado quando a planta foi submetida a uma condição maior de estresse do que na hidroponia, resultando em um aprimoramento de sua capacidade adaptativa diante de condições mais extremas.

Nessas condições, em que a cultura foi submetida ao se aumentar a tensão crítica e conseqüente aumento do estresse por secamento, também está associada ao aumento da concentração de sais, e o que se hipotetizou como uma condição subótima, revelou-se como um incremento na contabilização da salinidade média ponderada. Isso resultou em valores mais elevados de condutividade elétrica do meio de cultivo e, conseqüentemente, em uma salinidade limiar mais alta para a cultura.

Outro fator que impactou na ponderação da condutividade elétrica da rizosfera, ao longo do tempo, foi a consideração da variação da condutividade em resposta às mudanças na umidade do solo, juntamente com os efeitos da temperatura. Os resultados destacam a importância de não apenas avaliar os efeitos diretos da salinidade, mas também levar em consideração as condições ambientais, como a influência da temperatura e da variação da umidade do solo. Conseqüentemente, a salinidade limiar da cultura é impactada por essas condições, ressaltando a complexidade das interações entre os componentes do ambiente e a resposta das plantas à salinidade.

O sistema em solo com textura franco-arenosa, nas condições específicas do presente estudo, mostrou-se mais vantajoso diante do contexto da salinidade e do uso de águas salobras, visto que apresentou uma maior salinidade limiar. Com isso, o cultivo em solo, quando bem controlado, pode garantir uma melhor resposta da cultura à salinidade quando comparada a hidroponia.

De forma geral, este estudo demonstra que a hipótese de que o cultivo em solução promove o melhor desenvolvimento vegetativo das culturas, com relação ao cultivo em solo, depende de diversos fatores, tais como a tensão crítica adotada no manejo da irrigação e da época de cultivo.

Diante desse contexto, sugere-se, para trabalhos futuros, a formulação de linhas de pesquisa que avaliem distintas culturas em solos de variadas texturas, especialmente em solos argilosos sujeitos a tensões críticas variáveis. Essas avaliações podem ser contrastadas com diferentes sistemas de cultivo hidropônico, considerando diversas épocas do ano.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, T.; BALAL, R. M.; SHAHID, M. A.; PERVEZ, M. A.; AYYUB, C. M.; AQUEEL, M. A.; JAVAID, M. M. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.37, n.6, p.1-15, 2015.
- ABDELGAWAD, H.; ZINTA, G.; HEGAB, M. M.; PANDEY, R.; ASARD, H.; ABUELSOUD, W. High salinity induces different oxidative stress and antioxidant responses in maize seedlings organs. **Frontiers in Plant Science**, v.7, 2016.
- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.519-531, 2004.
- AGGELIDES, S.; ASSIMAKOPOULOS, I.; KERKIDES, P.; SKONDRAS, A. Effects of soil water potential on the nitrate content and the yield of lettuce. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.30, n.1-2, p.235–243, 1999.
- AHMADI, M.; SOURI, M. K. Growth and mineral content of coriander (*Coriandrum sativum* L.) plants under mild salinity with different salts. **Acta Physiologiae Plantarum**, v.40, p.1-8, 2018.
- ALVARENGA, M. A. R.; LIMA, L. A.; FAQUIN, V. Fertirrigação. In: ALVARENGA, M. A. R. (Ed.). **Tomate: produção em campo, em casa-de-vegetação e em hidroponia**. Lavras: Editora UFLA, 2004.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2014.
- ALVAREZ, V. V. H.; RIBEIRO, A. C. Calagem. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999.
- ALVES, M. S.; SOARES, T. M.; SILVA, L. T.; FERNANDES, J. P.; OLIVEIRA, M. L. A.; PAZ, V. P. S. Estratégias de uso de água salobra na produção de alface em hidroponia NFT. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.491-498, 2011.
- ANDRIOLO, J. L.; LUZ, G. L.; WITTER, M. H.; GODOI, R. S.; BARROS, G. T.; BORTOLOTO, O. C. Growth and yield of lettuce plants under salinity. **Horticultura Brasileira**, v.23, n.4, p.931-934, 2005.
- ARIF, Y.; SINGH, P.; SIDDIQUI, H.; BAJGUZ, A.; HAYAT, S. Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: An omic approach towards salt stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.156, p.64-77, 2020.

ATZORI, G.; GUIDI NISSIM, W.; CAPARROTTA, S.; MASI, E.; AZZARELLO, E.; PANDOLFI, C.; MANCUSO, S. Potential and constraints of diferente seawater and freshwater blends as growing media for three vegetable crops. **Agricultural Water Management**, v.176, p.255-262, 2016.

AYERS, A. D.; WADLEIGH, C. H.; BERNSTEIN, L. Salt tolerance of six varieties of lettuce. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v.57, p. 237-242, 1951.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. 2 ed. Campina Grande: UFPB, 1999 (Estudos FAO - Irrigação e Drenagem, 29).

BABAZADEH, H.; TABRIZI, M. S.; DARVISHI, H. H. Adopting adequate leaching requirement for practical response models of basil to salinity. **International Agrophysics**, v.30, p.275-283, 2016.

BAI, X.; DAI, L.; SUN, H.; CHEN, M.; SUN, Y. Effects of moderate soil salinity on osmotic adjustment and energy strategy in soybean under drought stress. **Plant physiology and biochemistry**, v.139, p.307-313, 2019.

BARBOSA, G. L.; GADELHA, F. D. A.; KUBLIK, N.; PROCTOR, A.; REICHELM, L.; WEISSINGER, E.; WOHLLEB, G. M.; HALDEN, R. U. Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. conventional agricultural methods. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.12, n.6, p.6879–6891, 2015.

BEN-ASHER, J.; BELTRAO, J.; BEKMIRZAEV, G.; PANAGOPOULOS, T. Crop response to combined availability of soil water and its salinity level: Theory, experiments and validation on golf courses. **Agronomy**, v.11, 2021.

BENÍTEZ, J. S. **Sensores de baixo custo para monitoramento contínuo da umidade do solo e radiação solar**. 2021. 53p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Área de concentração: Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2021.

BERNSTEIN, L.; FRANÇOIS, L. E.; CLARK, R. A. Interactive effects of salinity and fertility on yields of grains and vegetables. **Agronomy Journal**, v.66, n.3, p.412-421, 1974.

BIANCHI, A.; MASSERONI, D.; THALHEIMER, M.; MEDICI, L. O.; FACCHI, A. Field irrigation management through soil water potential measurements: a review. **Italian Journal of Agrometeorology**, v.22, n.2, p.25-38, 2017.

BIONE, M. A. A. **Cultivo hidropônico de pimenteira “biquinho” com águas salobras**. 2017. 119 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Cruz das Almas, 2017.

BIONE, M. A. A.; SOARES, T. M.; COVA, A. M. W.; PAZ, V. P. S.; GHEYI, H. R.; RAFAEL, M. R. S.; MODESTO, F. J. N.; SANTANA, J. A.; NEVES, B. S. L. Hydroponic production of 'Biquinho' pepper with brackish water. **Agricultural Water Management**, v.245, 2021.

BLANCO, F. F. **Tolerância do tomateiro à salinidade sob fertirrigação e calibração de medidores de íons específicos para determinação de nutrientes na solução do solo e na planta**. 2004. 115 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2004.

BOWER, C. A.; WILCOX, L. V. Soluble salts. In: BLACK, C. A. (ed.). **Methods of soil analysis - Part 2. Chemical and microbiological properties**. Madison: American Society of Agronomy, 1965.

BRESLER, E.; MCNEAL, B. L.; CARTER, D. L. **Saline and sodic soils: principles-dynamics-modeling**. Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag, 1982.

BUGHICI, T.; SKAGGS, T. H.; CORWIN, D. L.; SCUDIERO, E. Ensemble HYDRUS-2D modeling to improve apparent electrical conductivity sensing of soil salinity under drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v.272, p.1–12, 2022.

BUTCHER, K.; WICK, A. F.; DESUTTER, T.; CHATTERJEE, A.; HARMON, J. Soil Salinity: A Threat to Global Food Security. **Agronomy Journal**, v.108, n.6, 2016.

CARDOSO, A. A. Consequences of saline-dry conditions to the soil-plant-air continuum. **Plant Physiology**, p.1080-1082, 2022.

CARRIJO, O. A.; MAKISHIMA, N.; SOUZA, A. F. Princípios de nutrição mineral, formulação e manejo da solução nutritiva. In: CARRIJO, O. A.; MAKISHIMA, N. (eds.). **Princípios de hidroponia**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2000 (Circular Técnica, 22).

CARVAJAL, M.; MARTINEZ, V.; ALCARAZ, C. F. Physiological function of water channels as affected by salinity in roots of paprika pepper. **Physiologia Plantarum**, v.105, n.1, p.95–101, 1999.

CASARINI, E.; FOLEGATTI, M. V.; SILVA, E. F. F. Produtividade da roseira em função de doses de nitrogênio e potássio aplicadas via fertirrigação em ambiente protegido. **Magistra**, v.19, n.3, p.250-256, 2007.

CASSANITI, C.; ROMANO, D.; HOP, M. E. C. M.; FLOWERS, T. J. Growing floricultural crops with brackish water. **Environmental and Experimental Botany**, v.92, p.165–175, 2013.

CAVALCANTE, L. F.; SANTOS, R. V.; HERNANDEZ, F. F. F.; GHEYI, H. R.; DIAS, T. J.; NUNES, J. C.; LIMA, G. S. Recuperação de solos afetados por sais. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. (eds.). **Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados**. 2ª ed. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade (INCTSal), 2016.

COMETTI, N. N.; BREMENKAMP, D. M.; GALON, K.; HELL, L. R.; ZANOTELLI, M. F. Cooling and concentration of nutrient solution in hydroponic lettuce crop. **Horticultura Brasileira**, v.31, n.2, p.287–292, 2013.

CORWIN, D. L.; YEMOTO, K. Salinity: Electrical conductivity and total dissolved solids. **Soil Science Society of America Journal**, v.84, n.5, p.1442–1461, 2020.

COSTA, L. F.; SOARES, T. M.; SILVA, M. G.; MODESTO, F. J. N.; QUEIROZ, L. A.; PEREIRA, J. S. Cauliflower growth and yield in a hydroponic system with brackish water. **Revista Caatinga**, v.33, p.1060-1060, 2020.

COVA, A. M. W.; FREITAS, F. T. O.; VIANA, P. C.; RAFAEL, M. R. S.; AZEVEDO NETO, A. D.; SOARES, T. M. Content of inorganic solutes in lettuce grown with brackish water in different hydroponic systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.3, p.150-155, 2017.

DALIAKOPOULOS, I. N.; TSANIS, I. K.; KOUTROULIS, A.; KOURGIALAS, N. N.; VAROUCHAKIS, A. E.; KARATZAS, G. P.; RITSEMA, C. J. The threat of soil salinity: A European scale review. **Science of The Total Environment**, v.573, p.727–739, 2016.

DEINLEIN, U.; STEPHAN, A. B.; HORIE, T.; LUO, W.; XU, G.; SCHROEDER, J. I. Plant salt-tolerance mechanisms. **Trends in Plant Science**, v.19, n.6, p.371–379, 2014.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil and Tillage Research**, v.57, n.4, p.203–212, 2001.

DI MOLA, I.; ROUPHAEL, Y.; COLLA, G.; FAGNANO, M.; PARADISO, R.; MORI, M. Morphophysiological traits and nitrate content of greenhouse lettuce as affected by irrigation with saline water. **HortScience**, v.52, n.12, p.1716-1721, 2017.

DIAS, N. S. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade em solo cultivado com melão rendilhado sob ambiente protegido**. 2004. 110f. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

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

DIAS, N. S.; DUARTE, S. N.; TELES FILHO, J. F.; YOSHINAGA, R. T. Salinização do solo por aplicação de fertilizantes em ambiente protegido. **Irriga**, v.12, n.1, p.135-143, 2007.

DIAS, N. S.; BLANCO, F. F.; SOUZA, E. R.; FERREIRA, J. F. S.; SOUSA NETO, O. N.; QUEIROZ, I. S. R. Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas a salinidade. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. (eds.). **Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados**. 2ª ed. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade (INCTSal), 2016.

DU, J. R.; ZHANG, X.; FENG, X.; WU, Y.; CHENG, F.; ALI, M. E. A. Desalination of high salinity brackish water by an NF-RO hybrid system. **Desalination**, v.491, 2020.

ELOI, W. M. **Níveis de salinidade e manejo da fertirrigação sobre o cultivo do tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill) em ambiente protegido**. 2007. 110f. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

FAITHFULL, N. T. **Methods in agricultural chemical analysis: a practical handbook**. Wallingford: CABI Publishing, 2002.

FAY, B. J.; CORRIGAN, A.; MURPHY, R. A. Short-term effects of mechanical drainage on fungal and bacterial community structure in a managed grassland soil. **Applied Soil Ecology**, v.101, p.93–100, 2016.

FELTRIM, A. L.; CECÍLIO FILHO, A. B.; BRANCO, R. B. F.; BARBOSA, J. C.; SALATIEL, L. T. Produção de alface americana em solo e em hidroponia, no inverno e verão, em Jaboticabal, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.505-509, 2005.

FERNANDES, J. M. P.; FERNANDES, A. L. M.; DIAS, N. S.; COSME, C. B.; NASCIMENTO, L. V.; QUEIROZ, I. S. R. Salinidade da solução nutritiva na produção de alface americana em sistema hidropônico NFT. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.12, n.3, p.2570-2578, 2018.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v.37, n.4, p.529-535, 2019.

FERREIRA, P. A.; SILVA, J. B. L.; RUIZ, H. A. Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semiáridas. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. (eds.). **Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados**. 2ª ed. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade (INCTSal), 2016.

FRANCISCO, J. P. **Fertirrigação do abacaxi cultivar vitória com vinhaça: efeitos no solo e na planta**. 2014. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2014.

FREITAS, F. T. O.; SOARES, T. M.; SILVA, M. G.; RAFAEL, M. R. S. Cultivo de alface sob intervalos de recirculações das soluções nutritivas em sistemas hidropônicos usando água salobra. **Irriga**, v.1, n.1, p.67-96, 2021.

FREIRE, M. B. G. S.; PESSOA, L. G. M.; GHEYI, H. R. Métodos de análises químicas para solos afetados por sais. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. (eds.). **Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados**. 2ª ed. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade (INCTSal), 2016.

FRIZZONE, J. A.; FREITAS, P. S. L.; REZENDE, R.; FARIA, M. A. **Microirrigação: gotejamento e microaspersão**. Maringá: Eduem, 2012.

FU, Y.; HORTON, R.; HEITMAN, J. Estimation of soil water retention curves from soil bulk electrical conductivity and water content measurements. **Soil and Tillage Research**, v.209, 2021.

FURLANI, P. R. **Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica de hidroponia NFT**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1998 (Boletim Técnico, 168).

FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A.; GARCIA, R. A. Efeito da calagem e sulfato de amônio no algodão: II - concentração de cátions e ânions na solução do solo e absorção de nutrientes pelas plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.3, p.433-442, 2006.

GALLARDO, M.; JACKSON, L. E.; SCHULBACH, K.; SNYDER, R. L.; THOMPSON, R. B.; WYLAND, L. J. Production and water use in lettuces under variable water supply. **Irrigation Science**, v.16, p.125-137, 1996.

GOMES, E. P. **Viabilidade de mudanças tecnológicas na irrigação da tomaticultura de mesa**. 2005. 96f. Tese (Doutorado em Água e Solo) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

GREENLEE, L. F.; LAWLER, D. F.; FREEMAN, B. D.; MARROT, B.; MOULIN, P. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. **Water Research**, v.43, n.9, p.2317–2348, 2009.

GRIEVE, C. M.; GRATTAN, S. R.; MAAS, E. V. Plant salt tolerance. In: WALLENDER, W. W.; TANJI, K. K. (eds.), **Agricultural Salinity Assessment and Management**. 2ed., Reston: ASCE, 2011.

GROSSMANN, J.; UDLUFT, P. The extraction of soil water by the suction-cup method: a review. **European Journal of Soil Science**, v.42, n.1, p.83-93, 1991.

GUIMARÃES, M. J. M.; LOPES, I.; OLDONI, H.; COELHO FILHO, M. A. Balanço hídrico para diferentes regimes pluviométricos na região de Cruz das Almas-BA. **Revista de Ciências Agrárias**, v.59, n.3, p.252- 258, 2016.

GUIMARÃES, R. F. B.; NASCIMENTO, R.; MELO, D. F.; RAMOS, J. G.; PEREIRA, M. O.; CARDOSO, J. A. F.; LIMA, S. C. Production of hydroponic lettuce under different salt levels of nutritive solution. **Journal of Agricultural Science**, v.9, n.11, p.242-252, 2017.

HASANUZZAMAN, M.; NAHAR, K.; FUJITA, M. Plant response to salt stress and role of exogenous protectants to mitigate salt-induced damages. In: AHMAD, P.; AZOOZ, M. M.; PRASAD, M. N. V. (eds). **Ecophysiology and responses of plants under salt stress**. New York: Springer, 2013.

HESSINI, K.; ISSAOUI, K.; FERCHICHI, S.; SAIF, T.; ABDELLEY, C.; SIDDIQUE, K. H.; CRUZ, C. Interactive effects of salinity and nitrogen forms on plant growth, photosynthesis and osmotic adjustment in maize. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.139, p.171-178, 2019.

HUANG, J.; HARTEMINK, A. E. Soil and environmental issues in sandy soils. **Earth-Science Reviews**, v.208, 2020.

HOPMANS, J. W.; QURESHI, A. S.; KISEKKA, I.; MUNNS, R.; GRATTAN, S. R.; RENGASAMY, P.; BEM-GAL, A.; ASSOULINE, S.; JAVAUX, M.; MINHAS, P. S.; RAATS, P. A. C.; SKAGGS, T. H.; WANG, G.; VAN LIER, Q DE J.; JIAO, H.; LAVADO, R. S.; LAZAROVITCH, N.; LI, B.; TALEISNIK, E. Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity. **Advances in Agronomy**, v.169, p.1–191, 2021.

JONES JUNIOR, J. B. **Laboratory guide for conducting soil tests and plant analysis**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, v.17, n.4, p.678-684, 1974.

KHALID, M. F.; HUSSAIN, S.; ANJUM, M. A.; AHMAD, S.; ALI, M. A.; EJAZ, S.; MORILLON, R. Better salinity tolerance in tetraploid vs diploid volkamer lemon seedlings is associated with robust antioxidant and osmotic adjustment mechanisms. **Journal of plant physiology**, v.244, 2020.

KIM, H.; JEONG, H.; JEON, J.; BAE, S. Effects of irrigation with saline water on crop growth and yield in greenhouse cultivation. **Water**, v.8, n.4, 127, 2016.

KIM, H.; KIM, S.; JEON, J.; JEONG, H. Effects of irrigation with desalinated water on lettuce grown under greenhouse in south korea. **Applied Sciences**, v.10, n.7, 2020.

KURUNC, A. Effects of water and salinity stresses on growth, yield, and water use of iceberg lettuce. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.101, n.13, p.5688–5696, 2021.

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

LEI, C.; ENGESETH, N. J. Comparison of growth characteristics, functional qualities, and texture of hydroponically grown and soil-grown lettuce. **LWT**, 150, 2021.

LENA, B. P.; BONDESAN, L.; PINHEIRO, E. A. R.; ORTIZ, B. V.; MORATA, G. T.; KUMAR, H. Determination of irrigation scheduling thresholds based on HYDRUS-1D simulations of field capacity for multilayered agronomic soils in Alabama, USA. **Agricultural Water Management**, v.259, 2022.

LIAKOS, V.; PORTER, W.; LIANG, X.; TUCKER, M. A.; MCLENDON, A.; VELLIDIS, G. Dynamic Variable Rate Irrigation – A Tool for Greatly Improving Water Use Efficiency. **Advances in Animal Biosciences**, v.8, n.2, p.557–563, 2017.

LIANG, X.; LIAKOS, V.; WENDROTH, O.; VELLIDIS, G. Scheduling irrigation using an approach based on the van Genuchten model. **Agricultural Water Management**, v.176, p.170–179, 2016.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005.

LIMA, C. J. G. S. **Calibração e manejo de extratores providos de cápsulas porosas e transdutores de pressão para monitoramento de íons na fertirrigação**. 2009. 109p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração: Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

LIMA, J. D.; MORAES, W. S.; SILVA, S. H. M. G.; IBRAHIM, F. N.; SILVA JÚNIOR, A. C. Acúmulo de compostos nitrogenados e atividade da redutase do nitrato em alface produzida em diferentes sistemas de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, p.180-187, 2008.

LIMA, V.; LE-CLECH, P.; KEITEL, C.; SUTTON, B.; LESLIE, G. Growth of Phaseolus vulgaris on brackish ground water using sub-surface membrane irrigation under variable climatic conditions. **Desalination**, v.498, 2021.

LITALIEN, A.; ZEEB, B. Curing the earth: A review of anthropogenic soil salinization and plant-based strategies for sustainable mitigation. **Science of The Total Environment**, v.698, 2020.

LOTFI, R.; GHASSEMI-GOLEZANI, K.; PESSARAKLI, M. Salicylic acid regulates photosynthetic electron transfer and stomatal conductance of mung bean (*Vigna radiata* L.) under salinity stress. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v.26, 2020.

LUCINI, L.; ROUPHAEL, Y.; CARDARELLI, M.; CANAGUIER, R.; KUMAR, P., COLLA, G. The effect of a plant-derived biostimulant on metabolic profiling and crop performance of lettuce grown under saline conditions. **Scientia Horticulturae**, v.182, p.124-133, 2015.

LUNIN, J.; GALLATIN, M. H.; BATCHELDER, A. R. Saline irrigation of several vegetable crops at various growth stages. I. Effect on yields. **Agronomy Journal**, v.55, n.2, p.107-110, 1963.

MAAS, E. V. Salt tolerance of plants. In: CHRISTIE, B. R. (ed). **The Handbook of Plant Science in Agriculture**. Boca Raton: CRC Press, 1984.

MAAS, E. V.; GRATAN, S. R. Crop yields as affected by salinity. In: SKAGGS, R. W.; VAN SCHILFGAARDE, J. (eds.). **Agricultural drainage**. Madison: Agronomy Monographs, v.38, 1999.

MAAS, E. V.; HOFFMAN, G. J. Crop salt tolerance: current assessment. **Journal of Irrigation and Drainage Division**, v.103, 1977.

MAESTRE-VALERO, J. F.; MARTIN-GORRIZ, B.; SOTO-GARCÍA, M.; MARTINEZ-MATE, M. A.; MARTINEZ-ALVAREZ, V. Producing lettuce in soil-based or in soilless outdoor systems. Which is more economically profitable? **Agricultural Water Management**, v.206, p.48–55, 2018.

MAJID, M.; KHAN, J. N.; AHMAD SHAH, Q. M.; MASOODI, K. Z.; AFROZA, B.; PARVAZE, S. Evaluation of hydroponic systems for the cultivation of Lettuce (*Lactuca sativa* L., var. Longifolia) and comparison with protected soil-based cultivation. **Agricultural Water Management**, 2020.

MAKISHIMA, N.; CARRIJO, O. A. Conjunto hidropônico. In: CARRIJO, O. A.; MAKISHIMA, N. (eds.). **Princípios de hidroponia**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2000 (Circular Técnica, 22).

MANTOVANI, F. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: Princípios e métodos**. Viçosa: Editora UFV, 2009.

MANZOCCO, L.; FOSCHIA, M.; TOMASI, N.; MAIFRENI, M.; DALLA COSTA, L.; MARINO, M.; CORTELLA, G.; CESCO, S. Influence of hydroponic and soil cultivation on quality and shelf life of ready-to-eat lamb's lettuce (*Valerianella locusta* L. Laterr). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.91, n.8, p.1373–1380, 2011.

MARQUELLI, W. A. **Tensiômetros para o controle de irrigação em hortaliças**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2008 (Circular Técnica, 57).

MARTÍNEZ, G.; LAGUNA, A. M.; GIRÁLDEZ, J. V.; VANDERLINDEN, K. Concurrent variability of soil moisture and apparent electrical conductivity in the proximity of olive trees. **Agricultural Water Management**, v.245, 2021.

MAURI, R. **Adubação do café conilon irrigado por gotejamento: fertirrigação x fertilizantes de eficiência aprimorada**. 2016. 92 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2016.

MEDEIROS, P. R. F. **Manejo da fertirrigação em ambiente protegido visando o controle da salinidade para a cultura do pepino enxertado**. 2007. 82 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

MEDEIROS, P. R. F.; SILVA, E. F. F.; DUARTE, S. N. Salinidade em ambiente protegido. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. (eds.). **Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados**. 2ª ed. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade (INCTSal), 2016.

MEKAWY, A. M. M.; ASSAHA, D. V. M.; YAHAGI, H.; TADA, Y.; UEDA, A.; SANEOKA, H. Growth, physiological adaptation, and gene expression analysis of two Egyptian rice cultivars under salt stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.87, n.1, p.17-25, 2015.

MELO, H. F.; SOUZA, E. R.; ALMEIDA, B. G.; MULAS, M. Water potential in soil and *Atriplex nummularia* (phytoremediator halophyte) under drought and salt stresses. **International Journal of Phytoremediation**, v.20, n.3, p.249–255, 2017.

MENEZES, R. V.; AZEVEDO NETO, A. D.; RIBEIRO, M. O.; COVA, A. M. W. Growth and contents of organic and inorganic solutes in amaranth under salt stress. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.47, n.1, p.22-30, 2017.

MINHAS, P. S. Saline water management for irrigation in India. **Agricultural Water Management**, v.30, n.1, p.1–24, 1996.

MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, Cell and Environment**, v.25, n.2, p.239–250, 2002.

MUNNS, R.; GILLIHAM, M. Salinity tolerance of crops - what is the cost?. **New Phytologist**, v.208, p.668-673, 2015.

MOTA, P. R. A.; VILLAS BOAS, R. L.; SOUSA, V. F. Concentração de sais da solução avaliada pela condutividade elétrica na zona radicular do crisântemo sob irrigação por gotejamento. **Irriga**, v.11, n.4, p.532-542, 2006.

NAGAHAGE, E. A. A. D., NAGAHAGE, I. S. P.; FUJINO, T. Calibration and validation of a low-cost capacitive moisture sensor to integrate the automated soil moisture monitoring system. **Agriculture**, v.9, n.7, p.1-10, 2019.

NASCIMENTO, F. A. L.; SILVA, A. J. P.; FREITAS, F. T. O.; FERNANDES, R. D. M.; VEIMROBER JUNIOR, L. A. Sensors and frequencies of soil water content measurement affecting agro-hydrological simulations and irrigation management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.194, 2022.

NASCIMENTO, J. G. **Malhas coloridas de sombreamento e soluções nutritivas de fertirrigação na cultura da gérbera (*Gerbera jamesonii*) em ambiente protegido**. 2018. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2018.

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.

OHSE, S.; DOURADO NETO, D.; MANFRON, P. A.; SANTOS, O. S. Qualidade de cultivares de alface produzidos em hidroponia. **Scientia Agricola**, v.58, n.1, p.181-185, 2001.

OLIVEIRA, F. D. A. D.; CARRILHO, M. J. D. O.; MEDEIROS, J. F. D.; MARACAJÁ, P. B.; OLIVEIRA, M. K. Desempenho de cultivares de alface submetidas a diferentes níveis de salinidade da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.771-777, 2011.

ORSINI, F.; PENNISI, G.; MANCARELLA, S.; AL NAYEF, M.; SANOUBAR, R.; NICOLA, S.; GIANQUINTO, G. Hydroponic lettuce yields are improved under salt stress by utilizing white plastic film and exogenous applications of proline. **Scientia Horticulturae**, v.233, p.283–293, 2018.

OSAWA, T. Studies on the salt tolerance of vegetable crops with special reference to mineral nutrition. **Bulletin University of Osaka Prefecture**, n.16, p.15-57, 1965.

PAN, T.; LIU, M.; KRESLAVSKI, V. D.; ZHARMUKHAMEDOV, S. K.; NIE, C.; YU, M.; KUSNETSOV, V. V.; ALLAKHVERDIEV, S. I.; SHABALA, S. Non-stomatal limitation of photosynthesis by soil salinity. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, p.1–35, 2020.

PARANYCHIANAKIS, N. V.; CHARTZOULAKIS, K. S. Irrigation of Mediterranean crops with saline water: from physiology to management practices. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.106, p.171–187, 2005.

PARIENTE, S. Soluble salts dynamics in the soil under different climatic conditions. **Catena**, v.43, n.4, p.307–321, 2001.

PASSIOURA, J. B. Scaling up: the essence of effective agricultural research. **Functional Plant Biology**, v.37, n.7, p.585-591, 2010.

PAULUS, D.; PAULUS, E.; NAVA, G. A.; MOURA, C. A. Crescimento, consumo hídrico e composição mineral de alface cultivada em hidroponia com águas salinas. **Ceres**, v.59, n.1, p.110-117, 2012.

PAZ, A. M.; CASTANHEIRA, N.; FARZAMIAN, M.; PAZ, M. C.; GONÇALVES, M. C.; MONTEIRO SANTOS, F. A.; TRIANTAFILIS, J. Prediction of soil salinity and sodicity using electromagnetic conductivity imaging. **Geoderma**, v.361, 2019.

PESSOA, H. P.; MACHADO JUNIOR, R. **Folhosa: Em destaque no cenário nacional**. Disponível em: <<https://revistacampoenegocios.com.br/folhosas-em-destaque-no-cenario-nacional/>>. Acesso em: 02 de maio de 2021.

PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos**. 2 ed. Madrid: Editorial Agrícola Española S. A., 1985.

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, 2020.

PLACIDI, P.; MORBIDELLI, R.; FORTUNATI, D.; PAPINI, N.; GOBBI, F.; SCORZONI, A. Monitoring soil and ambient parameters in the iot precision agriculture scenario: an original modeling approach dedicated to low-cost soil water content sensors. **Sensors**, v.21, 2021.

QUEIROGA, R. C. F.; BEZERRA NETO, F.; NEGREIROS, M. Z.; OLIVEIRA, A. P.; AZEVEDO, C. M. S. B. Produção de alface em função de cultivares e tipos de tela de sombreamento nas condições de Mossoró. **Horticultura Brasileira**, v.19, p.324-328, 2001.

RAMESHWARAN, P.; TEPE, A.; YAZAR, A.; RAGAB, R. Effects of drip-irrigation regimes with saline water on pepper productivity and soil salinity under greenhouse conditions. **Scientia Horticulturae**, v.199, p.114-123, 2016.

RAWLINS, S. L.; RAATS, P. A. C. Prospects for high frequency irrigation: Uniform, frequente irrigation optimizes the root environment while drastically reducing water use. **Science**, v.188, p.604–610, 1975.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 4ed. Barueri: Manole, 2022.

REYNOLDS, W. D. An analytic description of field capacity and its application in crop production. **Geoderma**, v.326, p.56–67, 2018.

RHOADES, J. D. Quality of water for irrigation. **Soil Science**, v.113, n.4, p.277–284, 1972.

RHOADES, J. D. Soluble salts. In: PAGE, A. L. (ed.). **Methods of soil analysis, chemical and microbiological properties**. Madison: Soil Science Society of America, 1982.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A.; MASHALI, A. M. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Campina Grande: UFPB, 2000 (Estudos FAO - Irrigação e Drenagem, 48).

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington, DC: United States Salinity Laboratory Staff, 1954 (Agriculture Handbook, 60).

ROBINET, J.; VON HEBEL, C.; GOVERS, G.; VAN DER KRUK, J.; MINELLA, J. P. G.; SCHLESNER, A.; AMEIJERAS-MARIÑO, Y.; VANDERBORGHT, J. Spatial variability of soil water content and soil electrical conductivity across scales derived from electromagnetic induction and time domain reflectometry. **Geoderma**, v.314, p.160–174, 2018.

RODRIGUES, L. R. F. **Técnicas de cultivo hidropônico e de controle ambiental no manejo de pragas, doenças e nutrição vegetal em ambiente protegido**. Jaboticabal: FUNEP, 2002.

ROSIM, D. C.; MARIA, I. C.; SILVA, R. L.; SILVA, A. P. Compactação de um latossolo vermelho distroférrico com diferentes quantidades e manejos de palha em superfície. **Bragantia**, v.71, n.4, p.502-508, 2012.

SÁ, F. D. S.; SOUTO, L. S.; PAIVA, E. P.; ANDRADE, R. A.; LIMA, Y. B.; OLIVEIRA, F. A.; FERREIRA NETO, M.; FERRAZ, R. L. S. Initial development and tolerance of lettuce (*Lactuca sativa*) cultivars irrigated with saline water. **Journal of Agricultural Science**, v.9, n.9, p.149-157, 2017.

SALMAN, A. K.; DURNER, W.; NASERI, M.; JOSHI, D. C. The influence of the osmotic potential on evapotranspiration. **Water**, v.15, 2023.

SAKAMOTO, K.; KOGI, M.; YANAGISAWA, T. Effects of salinity and nutrients in seawater on hydroponic culture of red leaf lettuce. **Environmental Control in Biology**, v.52, n.3, p.189–195, 2014.

SAKATA. **Catálogo 2023**. Disponível em: <<https://www.sakata.com.br/assets/downloads/305/catalogo-de-hortalicas-2023.pdf>>. Acesso em: 16 de fev. de 2023.

SALA, F. C.; COSTA, C. P. Retrospectiva e tendência da alfacicultura brasileira. **Horticultura Brasileira**, v.30, p.187-194, 2012.

SAMMIS, T. W. Comparison of sprinkler, trickle, subsurface, and furrow irrigation methods for row crops. **Agronomy Journal**, v.72, n.5, p.701-704, 1980.

SANTOS, A. N.; SOARES, T. M.; SILVA, E. F. F.; SILVA, D. J. R.; MONTENEGRO, A. A. A. Cultivo hidropônico de alface com água salobra subterrânea e rejeito da dessalinização em Ibimirim, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.691-969, 2010.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ed. Brasília: Embrapa, 2018.

SANTOS, J. D.; LOPES, DA S. A. L.; DA LUZ C. J.; SCHEIDT, G. N.; NOVAK, A. C.; SYDNEY, E. B.; SOCCOL, C. R. Development of a vinasse nutritive solution for hydroponics. **Journal of Environmental Management**, v.114, p.8–12, 2013.

SANTOS, R. S. S.; DANTAS, D. C.; NOGUEIRA, F. P.; DIAS, N. S.; NETO, M. F.; GURGEL, M. T. Utilização de águas salobras no cultivo hidropônico da alface. **Irriga**, v.15, n.1, p.111-118, 2010.

SHAKIR, E.; ZAHRAW, Z.; AL-OBAIDY, A. H. M. J. Environmental and health risks associated with reuse of wastewater for irrigation. **Egyptian Journal of Petroleum**, v.26, n.1, p.95–102, 2017.

SHANNON, M. C.; GRIEVE, C. M. Tolerance of vegetable crops to salinity. **Scientia Horticulturae**, v.78, n1-4, p.5–38, 1998.

SHARMA, B. R.; MINHAS, P. S. Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia. **Agricultural Water Management**, v.78, n.1-2, p.136–151, 2005.

SILVA, A. C.; SILVA, G. F. D.; MENEZES, S. M. D.; CRUZ, R. Í.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; ROLIM, M. M. Accumulation of cations in lettuce cultivars under low-cost hydroponic system with brackish waters. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.25, p.833-839, 2021.

SILVA, A. O.; KLAR, A. E.; SILVA, Ê. F. F.; TANAKA, A. A.; SILVA JUNIOR, J. F. Relações hídricas em cultivares de beterraba em diferentes níveis de salinidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, p.1143-1151, 2013.

SILVA, C. B.; SANTOS, M. A. L.; SANTOS, D. P.; SANTOS, C. G.; SANTOS, V. R.; SÁ, M. B.; SANTOS, R. S. S.; BRANDÃO JÚNIOR, W. Q. Produtividade da alface cultivada em campo e ambiente protegido em resposta às lâminas de irrigação e níveis salinos. **Research, Society and Development**, v.9, n.10, 2020a.

SILVA, E. C. D. Anita: cultivar de alface de verão para cultivo protegido no solo e em hidroponia. **Horticultura Brasileira**, v.27, p.260-262, 2009.

SILVA, E. F. F. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo**. 2002. 136f. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SILVA, E. F. F.; DUARTE, S. N.; FOLEGATTI, M. V.; ROJAIS, E. G. Utilização de testes rápidos e extratores de solução do solo na determinação de nitrato e potássio. **Engenharia Agrícola**, v.23, n.3, p.460-467, 2003.

SILVA, E. M. N. C. P.; FERREIRA, R. L. F.; ARAÚJO NETO, S. E.; TAVELLA, L. B.; SOLINO, A. J. S. Qualidade de alface crespa cultivada em sistema orgânico, convencional e hidropônico. **Horticultura brasileira**, v.29, p.242-245, 2011.

SILVA, G. D. P.; SHARQAWY, M. H. Techno-economic analysis of low impact solar brackish water desalination system in the brazilian Semiarid Region. **Journal of Cleaner Production**, 2019.

SILVA, J. L. A. **Desempenho de equações de lavagem para recuperação de solo salinizado por excesso de fertilizantes em ambiente protegido**. 2016. 53p. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

SILVA, M. G.; OLIVEIRA, I. S.; SOARES, T. M.; GHEYI, H. R.; SANTANA, G. O.; PINHO, J. S. Growth, production and water consumption of coriander in hydroponic system using brackish waters. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.8, p.547-552, 2018.

SILVA, M. G.; SOARES, T. M.; GHEYI, H. R.; OLIVEIRA, M. G.; SANTOS, C. C. D. Hydroponic cultivation of coriander using fresh and brackish waters with different temperatures of the nutrient solution. **Engenharia Agrícola**, v.40, p.674-683, 2020b.

SILVA, T. S. M.; PAZ, V. P. S.; COELHO, E. F.; COELHO FILHO, M. A.; SANTANA, G. S. Condutividade elétrica da solução de solo em função da condutividade elétrica aparente e da umidade do solo sob aplicação de cloreto de potássio com uso da reflectometria do domínio do tempo. **Irriga**, v.10, n.2, p.174-183, 2005.

SINGH, A. Soil salinization management for sustainable development: A review. **Journal of Environmental Management**, v.277, 2021.

SOARES, H. R.; SANTOS, J. A.; SILVA, Ê. F. F.; ROLIM, M. M.; SILVA, G. F. D. Water and physiological relationships of lettuce cultivated in hydroponics with brackish waters. **Revista Ciência Agronômica**, v.50, p.216-222, 2019.

SOARES, H. R.; SILVA, Ê. F. F.; SILVA, G. F. D.; PEDROSA, E. M.; ROLIM, M. M.; SANTOS, A. N. Lettuce growth and water consumption in NFT hydroponic system using brackish water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, p.636-642, 2015.

SOARES, H. R.; SILVA, Ê. F. F.; SILVA, G. F. D.; LIRA, R. M. D.; BEZERRA, R. R. Mineral nutrition of crisphead lettuce grown in a hydroponic system with brackish water. **Revista Caatinga**, v.29, p.656-664, 2016b.

SOARES, T. M. **Utilização de águas salobras no cultivo da alface em sistema hidropônico NFT como alternativa agrícola condizente ao semiárido brasileiro**. 2007. 267f. Tese (Doutorado em Agronomia – Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

SOARES, T. M.; DUARTE, S. N.; SILVA, E. F. F.; JORGE, C. A. Combinação de águas doce e salobra para produção de alface hidropônica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.705-714, 2010.

SOARES, T. M.; DUARTE, S. N.; SILVA, E. F. F.; PAZ, V. P. S.; OLIVEIRA, J. L. B. Uso de águas salobras em sistemas hidropônicos de cultivo. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES FILHO, E. (eds.). **Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados**. 2ª ed. Fortaleza: Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade (INCTSal), 2016a.

SOARES, T. M.; SILVA, Ê. F. F.; DUARTE, S. N.; MELO, R. F.; JORGE, C. A.; SILVA, E. M. B. Produção de alface utilizando águas salinas em sistema hidropônico. **Irriga**, v.12, p.235-248, 2007.

SONNEVELD, C. La nutrición mineral y salinidad en los cultivos sin suelo: su manejo. In: GAVILÁN, M. U. (Coord.). **Tratado de cultivo sin suelo**. Madrid: Mundi Prensa, 2004.

SOUSA, A. F.; WEBER, O. B.; CRISOSTOMO, L. A.; ESCOBAR, M. E. O.; OLIVEIRA, T. S. Changes in soil soluble salts and plant growth in a sandy soil irrigated with treated water from oil extraction. **Agricultural Water Management**, v.193, p.13–21, 2017.

SOUSA, J. Í.; FREITAS, C. A. S.; DOS SANTOS, F. G. B.; SARAIVA, K. R.; CARVALHO, C. M.; CUNHA, L. S.; FREITAS, R. M. O. Utilização de diferentes concentrações salinas da solução nutritiva na produção de cultivares de alface em cultivo hidropônico. **Research, Society and Development**, v.9, n.10, 2020.

SOUSA NETO, O. N. **Limites de umidade e concentrações de potássio na solução do solo no cultivo do lisianthus (*Eustoma grandiflorum*) fertirrigado em ambiente protegido**. 2017. 112f. Tese (Doutorado em Agronomia – Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

SOUZA, T. R. **Dinâmica de nutrientes no perfil do solo em sistemas de adubação sólida e fertirrigação na citricultura**. 2006. 91 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2006.

STAVRIDOU, E.; HASTINGS, A.; WEBSTER, R. J.; ROBSON, P. R. H. The impact of soil salinity on the yield, composition and physiology of the bioenergy grass *Miscanthus x giganteus*. **Gcb Bioenergy**, v.9, p.92-104, 2017.

STEPPUHN, H. Increasing plant density in spring wheat to ameliorate the effects of salinity on grain yield. **Transactions of the ASAE**, v.40, n.6, p.1599–1606, 1997.

STEPPUHN, H.; VAN GENUCHTEN, M. T.; GRIEVE, C. M. Root-zone salinity: I. Selecting a product-yield index and response function for crop tolerance. **Crop Science**, v.45, p.209-220, 2005a.

STEPPUHN, H.; VAN GENUCHTEN, M. T.; GRIEVE, C. M. Root-zone salinity: II. Indices for tolerance in agricultural crops. **Crop Science**, v.45, p.221-232, 2005b.

SUPRAJA, K. V.; BEHERA, B.; BALASUBRAMANIAN, P. Performance evaluation of hydroponic system for co-cultivation of microalgae and tomato plant. **Journal of Cleaner Production**, 2020.

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

TAVAKKOLI, E.; RENGASAMY, P.; MCDONALD, G. K. The response of barley to salinity stress differs between hydroponic and soil systems. **Functional Plant Biology**, v.37, n.7, p.621-633, 2010.

TURHAN, A.; KUSCU, H.; OZMEN, N.; SITKI SERBECI, M.; OSMAN DEMIR, A. Effect of different concentrations of diluted seawater on yield and quality of lettuce. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v.74, n.1, p.111–116, 2014.

VALERO, R. M. M. **Uso da técnica da “TDR” na estimativa da umidade e condutividade elétrica em substratos orgânicos**. 2006. 89 p. Dissertação (Mestrado em Água e Solo.) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

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

VAN GENUCHTEN, M. T.; HOFFMAN, G. Management aspect for crop production: Analysis of crop salt tolerance data. In: SHAINBERG, I.; SHALHEVET, J. (Eds.). **Soil Salinity under Irrigation - Process and Management**. Berlin-Heidelberg-New York-Tokyo: Springer Verlag, 1984.

VAN STRATEN, G.; BRUNING, B.; DE VOS, A. C.; GONZÁLEZ, A. P.; ROZEMA, J.; VAN BODEGOM, P. M. Estimating cultivar-specific salt tolerance model parameters from multi-annual field tests for identification of salt tolerant potato cultivars. **Agricultural Water Management**, v.252, 2021.

VAN STRATEN, G.; DE VOS, A. C.; ROZEMA, J.; BRUNING, B.; VAN BODEGOM, P. M. An improved methodology to evaluate crop salt tolerance from field trials. **Agricultural Water Management**, v.213, p.375–387, 2019.

VANELLA, D.; PEDDINTI, S. R.; KISEKKA, I. Unravelling soil water dynamics in almond orchards characterized by soil-heterogeneity using electrical resistivity tomography. **Agricultural Water Management**, v.269, 2022.

VELOSO, L. L. S. A.; NOBRE, R. G.; SOUZA, L. P.; GHEYI, H. R.; CAVALCANTE, I. T. S.; ARAUJO, E. B. G.; SILVA, W. L. Formation of soursop seedlings irrigated using waters with different salinity levels and nitrogen fertilization. **Bioscience Journal**, v.34, p.151-160, 2018.

VETTERLEIN, D.; KUHN, K.; SCHUBERT, S.; JAHN, R. Consequences of sodium exclusion for the osmotic potential in the rhizosphere – Comparison of two maize cultivars differing in Na⁺ uptake. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.167, n.3, p.337–344, 2004.

VIANA, J. H. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.11-19, 2004.

WILLADINO, L.; GOMES, E. W.; SILVA, Ê. F. F.; MARTINS, L. S.; CAMARA, T. R. Efeito do estresse salino em genótipos tetraplóides de bananeira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.53-59, 2011.

XAVIER, J. F.; AZEVEDO, C. A. B.; AZEVEDO, M. R. Q. A.; SALES, J. C. R.; OLIVEIRA, N. C.; FERNANDES, J. D. Soluções nutritivas salinizadas com cloreto de sódio no cultivo da alface crespa em sistema hidropônico. **Research, Society and Development**, v.10, n.14, 2021.

ZHANG, X.; YANG, H.; DU, T. Osmotic adjustment of tomato under mild soil salinity can enhance drought resistance. **Environmental and Experimental Botany**, v.202, 2022.

ZHANG, Y.; LI, X.; ŠIMŮNEK, J.; SHI, H.; CHEN, N.; HU, Q.; TIAN, T. Evaluating soil salt dynamics in a field drip-irrigated with brackish water and leached with freshwater during different crop growth stages. **Agricultural Water Management**, v.244, 2021.