



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL

ESTER SOUZA OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
EM ÁGUAS SALOBRAS COM PREVALÊNCIA DE Na^+ OU Ca^{2+}**

Recife – Pernambuco - Brasil

Março de 2025

ESTER SOUZA OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
EM ÁGUAS SALOBRAS COM PREVALÊNCIA DE Na⁺ OU Ca²⁺**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal de Rural de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Agrícola e Ambiental

Orientador (a):

Prof. José Amilton Santos Júnior, D.Sc.

Coorientador (a):

Eng^o Agr^o Tarcísio Ferreira de Oliveira, M.Sc.

Recife – Pernambuco - Brasil

Março de 2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Auxiliadora Cunha – CRB-4 1134

- O48i Oliveira, Ester Souza.
Influência da temperatura sobre a condutividade elétrica em águas salobras com prevalência de Na⁺ ou Ca²⁺. / Ester Souza Oliveira. – Recife, 2025.
44 f.; il.
- Orientador(a): José Amilton Santos Júnior, D.Sc..
Co-orientador(a): Tarcísio Ferreira de Oliveira, M.Sc..
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental, Recife, BR-PE, 2025.
- Inclui referências e anexo(s).
1. Água de irrigação - Temperatura. 2. Soluções eletrolíticas. 3. Salinidade. 4. Hidroponia I. D.Sc., José Amilton Santos Júnior,, orient. II. M.Sc., Tarcísio Ferreira de Oliveira,, coorient. III. Título

CDD 628

ESTER SOUZA OLIVEIRA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA SOBRE A CONDUTIVIDADE ELÉTRICA
EM ÁGUAS SALOBRAS COM PREVALÊNCIA DE Na⁺ OU Ca²⁺**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Bacharelado em
Engenharia Agrícola e Ambiental da
Universidade Federal Rural de
Pernambuco, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheira Agrícola
e Ambiental.

Aprovado em: 21/03/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Amilton Santos Júnior D.Sc. (Orientador)

Universidade Federal Rural de Pernambuco– Depto de Eng. Agrícola

Prof. Dr. Alex Moraes (Examinador Externo)

Universidade Federal Rural de Pernambuco – Depto de Química

Prof. Dr. Manassés Mesquita da Silva (Examinador Interno)

Universidade Federal Rural de Pernambuco – Depto de Eng. Agrícola

Em primeiro lugar ao único trino Deus, “Pois tu formaste o meu interior, tu me teceste no ventre de minha mãe. Graças te dou, visto que de modo assombrosamente maravilhoso me formaste; as tuas obras são admiráveis, e minha alma o sabe muito bem. Os meus ossos não te foram encobertos, quando no oculto fui formado e entretecido como nas profundezas da terra. Os teus olhos viram a minha substância ainda informe, e no teu livro foram escritos todos os meus dias, cada um deles escrito e determinado, quando nem um deles ainda existia” (Salmos 139: 13-16).

Aos meus pais, Elizandra Oliveira e Gilson Souza, minha irmã Rute Souza por todo amor, carinho, compreensão e apoio, sou eternamente grata.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer a Deus por toda graça e misericórdia para comigo ao longo de todo caminho. Aos meus pais Gilson Souza da Silva e Elizandra Cássia da Silva Oliveira, que nunca mediram esforços para me ajudar, apoiar e caminhar comigo em todos os momentos, sem vocês eu não teria chegado até aqui. A minha irmã Rute, que me entende como ninguém e sempre esteve ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço a todos os meus familiares, a minha igreja e aos amigos estiveram me apoiando e orando por mim ao longo dessa caminhada, sem o apoio de vocês eu não teria chegado até o fim. Agradeço ao meu amigo Bruno Loghard pelas aulas gratuitas de Excel, e ao meu amigo Joel Andrade que esteve me ajudando e ensinando desde o início da graduação.

Ao professor José Amilton Santos Júnior, que sempre se prontificou para ajudar e que incentiva todos os seus alunos em suas aulas, suas palavras foram muito importantes nessa reta final. Ao meu coorientador Tarcísio Ferreira de Oliveira, que apesar do horário e do dia da semana me ensinou e explicou de forma clara e paciente todos os assuntos, dúvidas e perguntas, sem ele esse trabalho não teria sido desenvolvido. Ao professor Alex Souza Moraes, que me ensinou sobre eletroquímica como ninguém e se manteve sempre a disposição para ajudar no que fosse preciso, os dados desse trabalho não teriam sido obtidos sem ajuda.

Agradeço a Universidade Federal Rural de Pernambuco, que foi minha casa ao longo desses anos e a todos que passaram pela minha jornada acadêmica e puderam contribuir de alguma forma para minha formação. Os incentivos de cada pessoa, me trouxeram até aqui, por menores que eles tenham sido, sou muito grata.

Agradeço ao CNPq, ao INCTAgris e a CAPES pelo financiamento e incentivo a pesquisa.

OLIVEIRA, E.S. **Influência da temperatura sobre a condutividade elétrica em águas salobras com prevalência de Na^+ ou Ca^{2+}** . Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrícola e Ambiental – UFRPE/Sede). 44p. 2025.

RESUMO

A condutividade elétrica (CE) de soluções iônicas é influenciada por fatores como concentração e temperatura, desempenhando papel fundamental em diversas aplicações, incluindo a hidroponia e o monitoramento da qualidade da água. Este estudo teve como objetivo quantificar e/ou estimar, através de modelos matemáticos, a variação da condutividade elétrica (CE) de soluções iônicas simuladas mediante solubilização de NaCl ou CaCl_2 em função do aumento da concentração ou da temperatura, ao nível do mar, visando futuras aplicações no preparo de soluções nutritivas. As hipóteses desse estudo foram avaliar, o efeito da variação da temperatura sobre a condutividade elétrica será mais sensível para soluções iônicas obtidas a partir da solubilização de CaCl_2 do que de NaCl e a variação da condutividade elétrica de soluções iônicas expostas a 5 e a 40 °C será superior a 10%. Para isso, utilizou-se dados e equações empíricas da literatura para modelagem computacional, que foi conduzida por meio do software Microsoft Excel. Foram analisadas soluções com diferentes concentrações (600, 1990 e 4760 mg L⁻¹ para NaCl e 877, 2911 e 6944 mg L⁻¹ para $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ajustadas para valores de CE de 1,3, 4,3 e 10,3 dS m⁻¹. A variação térmica considerada foi de 5 a 40 °C. Os resultados indicaram um aumento linear da CE com a elevação da temperatura, com incremento médio de 116,6% no intervalo analisado. O efeito da temperatura foi similar para ambos os sais, contrariando a hipótese inicial de maior sensibilidade da CE para soluções de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. A modelagem computacional apresentou elevada aderência aos dados experimentais da literatura, validando o modelo teórico proposto. Dessa forma, este estudo contribui para a compreensão da dinâmica da CE em soluções ricas em Na^+ , Ca^{2+} e Cl^- , podendo subsidiar aplicações práticas, como o desenvolvimento de sensores e sistemas automatizados para o controle de nutrientes em cultivos hidropônicos.

Palavras-chave: Temperatura, solução iônica, salinidade, hidroponia.

OLIVEIRA, E.S. **Influence of temperature on electrical conductivity in brackish waters with prevalence of Na⁺ or Ca²⁺**. Course Completion Work (Bachelor's Degree in Agricultural and Environmental Engineering – UFRPE/Headquarters). 44p. 2025.

ABSTRACT

The electrical conductivity (EC) of ionic solutions is influenced by factors such as concentration and temperature, playing a key role in a variety of applications, including hydroponics and water quality monitoring. The objective of this study was to quantify and/or estimate, through mathematical models, the variation in electrical conductivity (EC) of ionic solutions simulated by solubilization of NaCl or CaCl₂ as a function of the increase in concentration or temperature at sea level, aiming at future applications in the preparation of nutrient solutions. The hypotheses of this study were to evaluate the effect of temperature variation on electrical conductivity will be more sensitive for ionic solutions obtained from the solubilization of CaCl₂ than NaCl and the variation of electrical conductivity of ionic solutions exposed to 5 and 40 °C will be greater than 10%. For this, data and empirical equations from the literature were used for computational modeling, which was conducted through the Microsoft Excel software. Solutions with different concentrations (600, 1990 and 4760 mg L⁻¹ for NaCl and 877, 2911 and 6944 mg L⁻¹ for CaCl₂·2H₂O) were analyzed, adjusted for EC values of 1.3, 4.3 and 10.3 dS m⁻¹. The temperature variation considered was from 5 to 40 °C. The results indicated a linear increase in EC with the increase in temperature, with an average increase of 116.6% in the analyzed interval. The effect of temperature was similar for both salts, contradicting the initial hypothesis of higher sensitivity of CE for CaCl₂·2H₂O solutions. The computational modeling showed high adherence to the experimental data in the literature, validating the proposed theoretical model. Thus, this study contributes to the understanding of the dynamics of EC in solutions rich in Na⁺, Ca²⁺ and Cl⁻, and may support practical applications, such as the development of sensors and automated systems for nutrient control in hydroponic crops.

Keywords: Temperature, ionic solution, salinity, hydroponics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Formação do cloreto de sódio	20
Figura 2 – Propriedade química do NaCl	20
Figura 3 – Propriedade química do $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	21
Figura 4 – Dinâmica da condutividade elétrica de uma solução iônica preparada mediante a diluição de (A) 600, (B) 1990 e (C) 4760 mg L^{-1} de NaCl, em função do aumento da temperatura.	28
Figura 5 – Dinâmica da condutividade elétrica de uma solução iônica preparada mediante a diluição de (A) 877, (B) 2911 e (C) 6944 mg L^{-1} de CaCl_2 , em função do aumento da temperatura.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividade equivalente específica (λ_i) dos íons.	26
Tabela 2 - Estimativa do quantitativo de NaCl ou de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ com a sua respectiva condutividade elétrica da solução iônica a 25 °C e pressão ao nível do mar.	27

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
2	HIPÓTESES	15
3	OBJETIVOS	15
3.1	Objetivo Geral	15
3.2	Objetivos Específicos	15
4	REVISÃO DE LITERATURA	16
4.1	CONDUTIVIDADE ELÉTRICA EM SOLUÇÕES IÔNICAS	16
4.1.1	<i>Definição e conceitos básicos da condutividade elétrica</i>	16
4.1.2	<i>Dissociação iônica e mobilidade dos íons</i>	18
4.1.3	<i>Influência da natureza dos cátions e ânions na condutividade elétrica</i>	19
4.2	CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SAIS	20
4.2.1	<i>Cloreto de sódio (NaCl)</i>	20
4.2.2	<i>Cloreto de cálcio di-hidratado (CaCl₂.2H₂O)</i>	21
4.3	INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA	22
4.3.1	<i>Relação entre temperatura e o grau de dissociação de eletrólitos.</i>	22
4.3.2	<i>Efeitos da temperatura na condutividade elétrica de soluções: estudos de caso</i>	23
5	METODOLOGIA	25
5.1	Abordagem metodológica	25
5.2	Estrutura da modelagem teórica	25
5.3	Implementação computacional e análise de dados	27
6	RESULTADOS	28
7	DISCUSSÃO	31
8	CONCLUSÃO	35
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
	REFERÊNCIAS	

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A composição iônica da água é um fator determinante para a avaliação de sua qualidade em contextos agrícolas, especialmente no cultivo de plantas e, neste sentido, o equilíbrio iônico e a salinidade das águas são amplamente reconhecidos como parâmetros essenciais para essa caracterização (MAIA *et al.*, 2001). Entre as variáveis comumente empregadas para avaliar a salinidade das águas de irrigação e do solo, destaca-se a condutividade elétrica (CE), que reflete a capacidade dos íons dissolvidos de conduzir eletricidade, aumentando proporcionalmente à concentração de sais (RIBEIRO *et al.*, 2005).

No Brasil, a Resolução do CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005, estabelece a classificação das águas com base na salinidade. Águas doces apresentam salinidade igual ou inferior a 0,5‰ (aproximadamente $CEa = 0,78 \text{ dS m}^{-1}$), enquanto águas salobras possuem salinidade entre 0,5‰ e 30‰ (aproximadamente $CEa = 37,5 \text{ dS m}^{-1}$). Já as águas salinas apresentam salinidade igual ou superior a 30‰.

Na região Nordeste do Brasil, as águas utilizadas para a irrigação provêm, predominantemente, de rios e açudes, apresentando valores de CE inferiores a $0,75 \text{ dS m}^{-1}$. No recorte semiárido do Brasil, especialmente para comunidades difusas por esta região, as principais fontes de águas salobras estão associadas a reservatórios subterrâneos, como poços e rejeitos de dessalinização, além de pequenos açudes e barreiros. Em parte, isso pode ser atribuído a presença de rochas cristalinas e formações geológicas de calcário, cuja liberação de íons contribui para a salinização dessas águas, impondo desafios ao seu uso agrícola (HOLANDA *et al.*, 2016; MEDEIROS; GHEYI; NASCIMENTO, 2012; MENEZES *et al.*, 2011).

A elevada concentração de sais em águas salobras representa um desafio à sua utilização na agricultura, pois pode induzir alterações fisiológicas, nutricionais e bioquímicas prejudiciais às plantas (NIU; CABRERA, 2010; AHMADI; SOURI, 2018). Entretanto, o sistema hidropônico tem sido empregado como uma alternativa viável para o uso dessas águas, visto que essa tecnologia reduz os efeitos da salinidade na planta em relação ao cultivo convencional (ATZORI *et al.*, 2019).

Diversos estudos mostram a viabilidade técnica da utilização de águas salobras no preparo de soluções nutritivas para o cultivo de diferentes espécies, como rúcula (CAMPOS JÚNIOR *et al.*, 2018), alface (SOARES *et al.*, 2019), (SILVA *et al.*, 2020) e

coentro (SILVA, 2019). Todavia, a maior concentração de sais nessas soluções exige um controle rigoroso da composição iônica, garantindo que a proporção dos íons mantenha a funcionalidade nutricional necessária para o crescimento das plantas (CAMPOS JÚNIOR *et al.*, 2018).

Além da salinidade, a temperatura dentro das casas de vegetação pode ser considerada um condicionador do equilíbrio iônico das soluções nutritivas e do desenvolvimento vegetal, visto que oscilações térmicas entre o dia e a noite podem desencadear estresse nas plantas (SUHARDIYANTO, 2009). Dessa forma, o controle da temperatura da solução nutritiva pode ser considerado uma alternativa (COMETTI *et al.*, 2013) a essas oscilações de temperatura, ou até mesmo visando o resfriamento em regiões mais quentes (OLIVEIRA *et al.*, 2023). Tal controle pode ser realizado por meio de aquecedores ou de um sistema de resfriamento, garantindo condições adequadas ao desenvolvimento radicular (COMETTI *et al.*, 2013).

O monitoramento da temperatura da solução nutritiva é fundamental, pois influencia parâmetros como oxigênio dissolvido (OD), CE e pH, impactando diretamente o crescimento e a qualidade das plantas (SILVA, 2019; TOMASI *et al.*, 2015). Estudos demonstram que o resfriamento da solução nutritiva resulta em melhorias significativas no desenvolvimento de culturas como alface (COMETTI *et al.*, 2013; SANCHES *et al.*, 2005), morango (SAKAMOTO *et al.*, 2016) e almeirão (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

Assim para o sucesso do cultivo hidropônico é imprescindível conhecer os aspectos nutricionais e de manejo das plantas nesse sistema de produção. Alguns desses aspectos assumem importância fundamental: a composição da solução nutritiva e a vazão de aplicação dessa solução, que devem ser adequadas à espécie cultivada e às condições locais de produção (SCHWARZ, 1995). O controle da condutividade elétrica (CE) é de grande importância, pois determina a quantidade de nutrientes na solução (isto é, a quantidade de íons). Quanto mais íons tiver na solução, maior será a condutividade elétrica, e vice-versa. Há recomendações na literatura indicando que a solução nutritiva deve apresentar CE entre 2,0 e 3,0 dS m⁻¹ (CASTELLANE; ARAÚJO, 1995).

Portanto determinar com exatidão a CE para cada cultura permite ideias e abordagens de modelos de simulação para implementação de avanços tecnológicos e novas práticas, nas quais a modelagem matemática pode ser utilizada como uma

excelente ferramenta de síntese. A modelagem e a simulação têm valor heurístico, permitindo a formulação de hipóteses sobre processos e interações relevantes, a quantificar o impacto de variáveis sobre o desempenho do sistema e a sugerir novas direções para experimentação (WULLSCHLEGER *et al.*, 1994).

Diante desse contexto, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de quantificar e/ou estimar, através de modelos matemáticos, a variação da condutividade elétrica de soluções iônicas simuladas mediante solubilização de NaCl ou CaCl₂ em função do aumento da concentração ou da temperatura, ao nível do mar.

2.HIPÓTESES

O efeito da variação da temperatura sobre a condutividade elétrica será mais sensível para soluções iônicas obtidas a partir da solubilização de CaCl_2 do que de NaCl .

A variação da condutividade elétrica de soluções iônicas expostas a 5 e a 40 °C será superior a 10%.

3.OBJETIVOS

3.1 Geral

Quantificar e/ou estimar, através de modelos matemáticos, a variação da condutividade elétrica (CE) de soluções iônicas simuladas mediante solubilização de NaCl ou CaCl_2 em função do aumento da concentração ou da temperatura, ao nível do mar, visando futuras aplicações no preparo de soluções nutritivas.

3.2 Específicos

- Identificar e aplicar equações empíricas da literatura para a estimativa da condutividade elétrica de soluções iônicas.
- Modelar a variação da condutividade elétrica em função da temperatura, mantendo a concentração dos sais constante.
- Avaliar os resultados teóricos obtidos comparando-os com dados experimentais da literatura.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA EM SOLUÇÕES IÔNICAS

4.1.1. Definição e conceitos básicos da condutividade elétrica

A Condutividade elétrica (CE) é amplamente reconhecida como o principal parâmetro para expressar a concentração de sais solúveis em soluções aquosas (HOLANDA *et al.*, 2016). Representando o inverso da resistividade elétrica, a CE corresponde a facilidade com que um material permite a condução de corrente elétrica (PASTORE, 2001). Esse parâmetro é diretamente proporcional à concentração total de sais dissolvidos, sendo, portanto, uma medida eficaz para avaliar a salinidade (HOLANDA *et al.*, 2016).

No âmbito da física, a condutividade elétrica, denotada pela letra grega σ (sigma), é definida como o quociente entre a densidade de corrente (i) e o campo elétrico (E), conforme descrito pela Lei de Ohm (MIZUHATA, 2022).

De acordo com a 1ª lei de Ohm, a intensidade da corrente elétrica (I) que percorre um circuito é diretamente proporcional a voltagem (V) aplicada e inversamente proporcional à resistência total do circuito (R) (Equação 1) (MIZUHATA, 2022).

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

Em que: V , I e R são expressos, respectivamente, em volt (JC^{-1}), ampère (Cs^{-1}) e ohm (VA^{-1}).

Conforme a 2ª lei de Ohm, a resistividade elétrica (ρ , $\Omega.m$) é independente da geometria da amostra e está relacionada a R (Equação 2) (MIZUHATA, 2022).

$$\rho = \frac{R \times A}{\ell} \quad (2)$$

Em que: ℓ é a distância entre os dois pontos onde é medida a voltagem; e A é a área da seção reta perpendicular à direção da corrente.

Assim, a condutividade elétrica (σ) é o inverso da resistividade (Equação 3) (MIZUHATA, 2022).

$$\sigma = \frac{1}{\rho} (\Omega.m^{-1}) \quad (3)$$

De acordo com o Sistema Internacional de Unidades (SI), a CE é expressa em Siemens por metro ($S m^{-1}$), unidade equivalente ao inverso do ohm (Ω). No contexto de medições de soluções aquosas, ela é frequentemente apresentada em $S m^{-1}$, refletindo sua capacidade de quantificar o fluxo d corrente elétrica através de íons dissolvidos (MIZUHATA, 2022).

A medição da CE envolve a introdução de partículas carregadas em um campo elétrico e a análise do movimento resultante dessas partículas. A maioria das partículas carregadas usadas em eletroquímica são elétrons e íons, enquanto em eletrólitos líquidos, as partículas carregadas são predominantemente íons dissolvidos (MIZUHATA, 2022).

A relação entre a concentração de sais e a CE é linear em uma ampla faixa de valores, tornando-a uma medida confiável para avaliar a salinidade de soluções (SOARES *et al.*, 2016). Por exemplo, uma solução de 1 cmol L^{-1} apresenta aproximadamente 1 dS m^{-1} de CE a 25°C (SILBER; BAR-TAL, 2008). Entretanto, essa relação pode variar dependendo das características químicas e das condições experimentais. Para águas salobras analisadas por Richards (1954), 1 dS m^{-1} de CE equivale aproximadamente a 640 mg L^{-1} de sais totais dissolvidos (para CE entre 0,1 e 5 dS m^{-1}). Essa relação, entretanto, pode não ser aplicável a todas as águas do Brasil ou soluções nutritivas, uma vez que foi determinada em outros países, para determinada condição de águas salobras (SOARES *et al.*, 2016).

Os métodos de medição da CE possuem ampla aplicabilidade em estudos científicos, agrícolas e ambientais. Eles são utilizados em análises de transporte de água e solutos, monitoramento de salinidade em experimentos laboratoriais e práticas agrícolas, como irrigação e drenagem, além do acompanhamento de poluentes ou resíduos perigosos (NADLER, 2005). A simplicidade, baixo custo e forte correlação com a concentração de íons dissolvidos tornam a CE uma ferramenta valiosa para medir a qualidade da água e de soluções em diversas áreas de pesquisa (MOORE, 1962; RICHARDS, 1954).

4.1.2. Dissociação iônica e mobilidade dos íons

A teoria de Arrhenius, desenvolvida entre 1880 e 1890, trouxe uma compreensão pioneira sobre a condutividade elétrica em soluções iônicas, ao propor que a corrente elétrica era transportada pela migração de íons em vez de elétrons, como nos condutores metálicos (PASTORE, 2001). Além disso, Arrhenius demonstrou que o grau de dissociação varia com a diluição, contribuindo significativamente para o entendimento das soluções eletrolíticas (VOGEL, 1981).

A dissociação iônica é um processo essencial para a condução elétrica em soluções, no qual os eletrólitos, ao serem dissolvidos em solventes de alta constante dielétrica, como a água, se separam em íons positivos (cátions) e negativos (ânions). Esses íons são os responsáveis pelo transporte de carga elétrica, movendo-se em direções opostas sob a influência de um campo elétrico. A dissociação iônica pode ser total ou parcial, dependendo da natureza do eletrólito (ATKINS; JONES; LAVERMAN, 2018).

A mobilidade iônica, definida pela velocidade dos íons sob a influência de um campo elétrico, é um fator determinante da condutividade elétrica de uma solução (ROCHA *et al.*, 2021). Esse parâmetro é influenciado por características intrínsecas dos íons, como tamanho e carga, bem como por fatores do meio, como a viscosidade e a temperatura do solvente (BARD; FAULKNER, 2001; SAWYER; SOBKOWIAK; ROBERTS, 1945). Por exemplo, íons menores apresentam maior grau de solvatação, formando raios hidrodinâmicos mais amplos que podem reduzir sua velocidade de migração, impactando negativamente a condutividade molar (BARD; FAULKNER, 2001; SAWYER; SOBKOWIAK; ROBERTS, 1945).

A influência do solvente no processo de dissociação e mobilidade iônica é igualmente crucial. Solventes como a água, com alta constante dielétrica, facilitam a solvatação e dispersão dos íons, promovendo sua uniformidade na solução (DENARO, 1974). Além disso, o aumento da temperatura reduz a viscosidade do solvente, aumentando a energia cinética dos íons e, consequentemente, sua mobilidade (BARD, FAULKNER, 2001).

Outro fator importante é a concentração de eletrólitos, que exibe comportamento não linear em relação à condutividade. Em baixas concentrações, a condutividade aumenta proporcionalmente à disponibilidade de íons livres (DENARO, 1974). Entretanto, em concentrações elevadas, as interações iônicas, como a

formação de pares iônicos, podem restringir a mobilidade dos íons, reduzindo a eficiência do transporte de carga (SAWYER; SOBKOWIAK; ROBERTS, 1945).

4.1.3. Influência da natureza dos cátions e ânions na condutividade elétrica

A medição da condutividade traz informações importantes sobre o transporte das cargas positivas e negativas; devido à difusão das espécies iônicas, por influência da ação do campo elétrico ou o gradiente de concentração iônica (RODRIGUES, 2012).

Assim a maior ou menor facilidade que uma solução apresenta para conduzir a corrente elétrica depende de alguns fatores: mobilidade iônica, força iônica, concentração das soluções, temperatura e o tamanho e forma da espécie. Podendo a condutividade elétrica ser experimentalmente determinada por meio da medida da resistência elétrica de uma determinada solução eletrolítica (BARRETO, 2011).

Portanto, os íons e moléculas quando estão dissolvidos em água são envolvidos em uma rede organizada; onde os átomos de oxigênio da água possuem cargas parcialmente negativas e os átomos de hidrogênio possuem cargas parciais positivas. As moléculas de água se ligam devido às cargas do oxigênio e do hidrogênio, ou seja, os átomos de oxigênio se ligam aos cátions e os átomos de hidrogênio se ligam aos ânions (HARRIS, 2012).

Outro dado importante são os raios de hidratação dos íons determinados pelo coeficiente de difusão dos mesmos, e da sua movimentação em um campo elétrico. Percebe-se que a atividade iônica está relacionada com o volume da molécula. Se o íon tiver uma carga considerável, porém um tamanho relativamente menor, o íon irá se comportar como uma espécie mais volumosa em solução se conectando com maior número de moléculas de água. (HARRIS, 2012).

Observa-se que os sais se dissociam em água em maior ou menor grau, dessa forma os diferentes íons possuem diferentes coeficientes de difusão; ao exemplo do cloreto de sódio (NaCl), em contato com água os íons de sódio e de cloro se separam e, quando submetidos a passagem de corrente elétrica, conduzem mais facilmente esta corrente, do que apenas a água. Demonstrando que os prótons apresentam um transporte diferente ao estarem em contato com a água. (CUSSLER, 2007)

4.2. CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SAIS

4.2.1. Cloreto de sódio (NaCl)

O cloreto de sódio (NaCl), amplamente conhecido como sal de cozinha, apresenta-se em condições normais na forma de um sólido branco cristalino. Sua estrutura é composta pela união de um cátion sódio (Na^+) e um ânion cloreto (Cl^-), cuja interação ocorre de forma espontânea e altamente exotérmica. Esse arranjo cristalino reflete a forte atração eletrostática entre os íons que o constituem, como ilustrado na Figura 1 (CHEMELLO, 2005).



Figura 1. Formação do cloreto de sódio.

Fonte: VALIM, 2021.

As propriedades físico-químicas do cloreto de sódio derivam de sua composição, formada por 60,6% de cloro elementar e 39,3% de sódio (SALT INSTITUTE, 2018). Como composto iônico, seus átomos estão conectados por ligações iônicas, que ao serem dissolvidas em água, sofrem dissociação, liberando Na^+ e Cl^- . Sua propriedade higroscópica, caracterizada pela capacidade de absorver água, desempenha um papel crucial na conservação de alimentos, ao criar um ambiente estéril que inibe o desenvolvimento de microrganismos e a produção de toxinas (CHEMELLO, 2005).

Fórmula molecular	NaCl
Massa molar	58,443 g/mol
Ponto de fusão	801°C
Ponto de ebulição	1413°C
Densidade	2,17 g/cm ³
Odor	Sem odor

Figura 2. Propriedades químicas do NaCl.

Fonte: CHEMELLO, 2005.

Um dos principais fatores que provoca disfunção nutricional nas plantas, são altos teores de salinidade. Pode-se observar que os íons Na^+ e Cl^- , ao apresentarem concentrações elevadas, interferem na absorção radicular e translocação de Ca^{2+} e K^+ nas culturas (LÓPEZ *et al.*, 2014).

A alta concentração de sais, como o sódio e o cloro, prejudicam a absorção de cálcio, potássio e magnésio (COVA *et al.*, 2017; PAULUS; DOURADO NETO; PAULUS, 2012; SOARES *et al.*, 2016). Onde o cálcio exerce um papel importante no crescimento e desenvolvimento da planta (TAIZ *et al.*, 2017).

4.2.2. Cloreto de cálcio ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

O cloreto de cálcio (CaCl_2) é um sal amplamente utilizado na indústria, caracterizado por seu aspecto de pó branco e pela presença de um cátion bivalente proveniente do cálcio. A elevada solubilidade em água e em diversos solventes polares deve-se à natureza iônica da molécula e à presença do ânion cloreto. Além disso, o CaCl_2 é altamente deliquescente, o que permite sua rápida dissolução em contato com a umidade do ambiente, comportamento típico de compostos extremamente higroscópicos (OLIVEIRA, 1999).

Essa propriedade higroscópica, faz do cloreto de cálcio um agente secante eficaz, amplamente empregado para remoção de umidade. Também encontra aplicações em salmouras utilizadas na refrigeração, devido à sua elevada capacidade de absorção de calor, e na indústria da construção civil, onde é adicionado ao cimento para aumentar sua viscosidade e potencial de cimentação, melhorando suas propriedades mecânicas (OLIVEIRA, 1999).

Na figura abaixo temos algumas características físico-químicas deste composto.

Propriedade	
Massa molecular	110,98 g/mol
Densidade específica	1,85 g/cm ³
Ponto de Fusão	772 °C
Ponto de ebulição	1600 °C
Solubilidade em água (20 °C)	745 g/L

Figura 3. Propriedades químicas do $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Fonte: OLIVEIRA, 1999.

Os altos índices de CaCl_2 causa redução nos índices de germinação, em virtude da redução da absorção de água pela semente o desequilíbrio iônico provocado por esse sal (INÁCIO; SMYCHNIUK, 2021; STEFANELLO *et al.*, 2020).

Os altos teores dos íons sódio, potássio, cálcio e magnésio, causam danos aos processos fisiológicos e metabólicos dos tecidos embrionários, incluindo a divisão e diferenciação celular, a atividade enzimática e a captação e distribuição de nutrientes (STEFANOLLO *et al.*, 2020).

Sendo os danos advindos da alta concentração de sais minerais ao metabolismo celular, principalmente no que se refere a estabilidade das membranas compromete as reações metabólicas para o crescimento inicial das raízes (SCHOSSLER *et al.*, 2012).

4.3. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

4.3.1. Relação entre temperatura e o grau de dissociação de eletrólitos

A concentração iônica das soluções, está intrinsicamente ligada a condutividade elétrica e dessa forma é utilizada para se medir a salinidade. (FERREIRA *et al.*, 2016)

A condutividade elétrica (CE), segundo Richards (1954) depende da temperatura e para se fazer as determinações corretas, deve-se converter a temperatura para 25°C. É observado que a CE das soluções salinas aumenta de forma proporcional a temperatura, onde a proporção é aproximadamente de 2% por grau centígrado, por isso é preciso fazer a correção para a temperatura padrão de 25 °C (BOWER; WILCOX, 1965).

Outros fatores que interferem na medição da corrente elétrica são, o número e cargas das espécies iônicas presentes na solução; mobilidade dos íons; área efetiva e distância entre eletrodos (FERREIRA *et al.*, 2016).

De forma resumida, temos que 1cmol L⁻¹ de solução tem cerca de 1,0dS m⁻¹ de CE e uma pressão osmótica de aproximadamente -0,355 atm (a 25 °C) (SILBER; BAR-TAL, 2008). Tem-se também a relação que indica que 1,0dS m⁻¹ de CE equivalente a 640 mg L⁻¹ de sais totais dissolvidos (para CE entre 0,1 e 5,0dS m⁻¹). No entanto, essa relação foi desenvolvida em situações específicas, logo não se pode

validar a mesma para todos os países e em todos os tipos de soluções. (SOARES et., 2016)

Temos relações empíricas que correlacionam a salinidade e a CE, sendo elas:

- $CE \text{ (dS m}^{-1}\text{)} = (10 \text{ a } 12) \times \text{concentração total de cátions, mmol}_c \text{ L}^{-1}$;
- Pressão osmótica (kg cm^{-2} ou bar) = $0,36 \times CE \text{ (dS m}^{-1}\text{)}$; e
- ppm (mg L^{-1}) = $(640 \text{ a } 700) \times CE \text{ (dS m}^{-1}\text{)}$.

4.3.2. Efeitos da temperatura na condutividade elétrica de soluções: estudos de caso

O estudo intitulado “Cultivo do almeirão sob soluções nutritivas preparadas em águas salobras e aplicadas em diferentes temperaturas”, conduzido na Universidade Federal Rural de Pernambuco, avaliou os impactos dos estresses de temperatura e salinidade sobre o crescimento, o estado hídrico, a produção e as características foliares do almeirão. Para isso, a cultura foi submetida a quatro níveis de condutividade elétrica da solução nutritiva (1,7; 3,2; 4,7 e 6,2 dS m⁻¹) aplicadas em duas temperaturas (ambiente e controlada na faixa entre 25-30 °C) (OLIVEIRA *et al.*, 2023). Os resultados indicaram que o resfriamento da solução nutritiva mitigou os efeitos negativos da salinidade no intervalo de condutividade elétrica analisado. Esse efeito foi observado na melhoria da produção, do consumo hídrico e da integridade das membranas celulares. Ademais, verificou-se uma padronização da condutividade elétrica a 25 °C, seguindo o modelo proposto por Richard (1954), o que evidencia a necessidade de estudos adicionais para avaliar esse comportamento em outras faixas de temperatura (OLIVEIRA *et al.*, 2023).

Outro estudo relevante sobre o resfriamento da solução nutritiva foi “Análise do resfriamento da solução nutritiva para cultivo hidropônico do morangueiro”, realizado no Setor de Plasticultura do Departamento de Engenharia Rural da FCAV/UNESP. O objetivo foi avaliar a produção hidropônica do morango sob resfriamento da solução nutritiva, que foi mantida a aproximadamente 12 °C por meio de um trocador de calor. Durante o experimento, a solução nutritiva apresentou valores médios de pH 6,2 e condutividade elétrica de 1,7 mS cm⁻¹ (VILELA JUNIOR *et al.*, 2004). Os resultados indicaram que a variedade “Sweet Charlie” obteve desempenho superior à variedade Campinas em diversos parâmetros, como peso médio dos pseudofrutos, diâmetro longitudinal e transversal, número médio de pseudofrutos e produtividade. No entanto,

o resfriamento da solução nutritiva não impactou significativamente a variedade Campinas. Adicionalmente, o resfriamento resultou em um aumento no teor de sólidos solúveis totais no suco extraído dos pseudofrutos exclusivamente na variedade “Sweet Charlie”. Dessa forma, observou-se que a temperatura da solução nutritiva influencia a qualidade e a produção dos frutos de maneira diferenciada entre as variedades estudadas, sem impactos expressivos na produção da variedade Campinas (VILELA JUNIOR *et al.*, 2004).

Portanto, os estudos sobre resfriamento da solução nutritiva e sua influência na condutividade elétrica demonstram que esses fatores estão intrinsicamente relacionados à cultura cultivada. Dependendo da espécie, o resfriamento pode promover aumentos, reduções ou efeitos não significativos na produtividade. Esses achados evidenciam a necessidade de investigações adicionais, dado que as informações disponíveis ainda são limitadas e desafiadoras.

5. METODOLOGIA

5.1. Abordagem metodológica

Este estudo consistiu em quantificar e/ou estimar, através de modelos matemáticos, a variação da condutividade elétrica (CE) de soluções iônicas simuladas mediante solubilização de NaCl ou CaCl₂ em função do aumento da concentração ou da temperatura, ao nível do mar, visando futuras aplicações no preparo de soluções nutritivas.

Para fins deste trabalho, utilizou-se a equação empírica de BARD; FAULKNER (1944) (Equação 4), assim como dados disponíveis (MCINNIS, 1961) para modelagem computacional e cálculo das variáveis de interesse (Anexo 1).

$$CE = CE_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (4)$$

Em que:

CE₀ = condutividade elétrica em uma temperatura de referência T₀;

α = coeficiente de variação da condutividade com a temperatura (BARD; FAULKNER, 1944);

α = 0,02 °C⁻¹, valor comumente adotado para soluções iônicas diluídas (BARD; FAULKNER, 1944);

T = temperatura da solução.

Os valores de condutividade elétrica ora considerados (1,3, 4,3 e 10,3 dS m⁻¹) tiveram a necessária concentração dos respectivos sais (NaCl ou CaCl₂.2H₂O), estimadas por meio de relações matemáticas que consideraram os efeitos da concentração e da temperatura da solução iônica. (McCLESKEY, 2011; RUSYDI, 2018).

5.2. Estrutura da modelagem teórica

O estudo foi delineado pela concentração fixa versus temperatura crescente. Nesta fase, considerou-se três soluções iônicas obtidas mediante dissolução de NaCl (SDT = 600, 1990, 4760 mg L⁻¹) e outras três soluções iônicas obtidas mediante dissolução de CaCl₂.2H₂O (SDT = 877, 2911, 6944 mg L⁻¹) as quais foram ajustadas para o mesmo valor de condutividade elétrica (1,3, 4,3 e 10,3 dS m⁻¹)

A simulação consistiu em “expor” as soluções iônicas a temperaturas crescentes (intervalo entre 5 e 40 °C). Uma vez que as faixas de temperatura testadas não impõem restrições sobre a solubilidade dos sais testados, mantendo, portanto, a sua concentração, avaliou-se a dinâmica da CE da solução iônica e, para tal, utilizou-se a modelagem matemática baseada na equação de Bard; Faulkner (1944).

A condutividade elétrica foi estimada pela contribuição individual de cada íon, considerando sua condutividade equivalente específica (Tabela 1), de acordo com a equação geral (5):

$$CE = \sum (\lambda_i \times C_i) \quad (5)$$

Em que:

λ_i = condutividade equivalente do íon i ($S\ m^2\ mol^{-1}$);

C_i = concentração molar do íon i ($mol\ m^{-3}$).

Tabela 1. Condutividade equivalente específica (λ_i) dos íons.

Íon	λ_i ($S\ m^2\ mol^{-1}$)
Na^+	0,00501
Ca^{2+}	0,00119
Cl^-	0,00763

A influência da concentração também foi analisada por meio da equação de Kohlrausch para soluções diluídas e modelos de interação iônica em soluções mais concentradas (BARD; ALLEN,1944). Portanto, para determinar a concentração molar necessária (C); a condutividade elétrica (CE) da solução foi dada por (Equação 6):

$$CE = \lambda_{NaCl} \times C \quad (6)$$

Em que:

$CE = 0,13\ S\ m^{-1}$

$\lambda_{NaCl} = 0,01264\ S.m^2\ mol^{-1}$

C = concentração molar ($mol\ L^{-1}$)

Assim, a concentração foi igual a: $C = 10,28 \times 10^{-3}\ mol\ L^{-1}$

Conversão para unidade de massa:

A massa de NaCl necessária foi calculada pela Equação 7:

$$m = C \times MM \times V \quad (7)$$

Em que:

MM = 58,44 g mol⁻¹ (massa molar do NaCl)

V = 1L (supondo 1 litro de água)

C = 10,28 x 10⁻³ mol/ (L m)⁻¹ = 10,28.10⁻³ x 58,44 x1 = 0,60 g de NaCl

Assim, tem-se na tabela 2:

Tabela 2. Estimativa do quantitativo de NaCl ou de CaCl₂.2H₂O com a sua respectiva condutividade elétrica da solução iônica a 25 °C e pressão ao nível do mar.

Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)	Massa de NaCl (mg L ⁻¹)	Massa de CaCl ₂ .2H ₂ O (mg L ⁻¹)
1,3	600	877
4,3	1990	2911
10,3	4760	6944

5.3. Implementação computacional e análise de dados

Os resultados foram estimados com base no ajuste de equações empíricas, cuja modelagem computacional foi feita com auxílio do software Microsoft Excel, sendo este utilizado para resolver as equações propostas e para geração e visualização gráfica dos resultados.

De posse das funções ajustadas, pode-se elaborar os gráficos para relacionar a condutividade elétrica, temperatura e a concentração dos sais.

Os valores teóricos obtidos foram confrontados com medições experimentais extraídas da literatura (BARD; ALLEN, 1944), através dessa comparação, viu-se que grande parte dos valores obtidos no estudo teve grande proximidade com os dados encontrados nas literaturas disponíveis. A variação térmica foi aplicada para ajustar os valores simulados às condições reais de medição, expressando assim valores que sejam mais próximos da realidade.

6. RESULTADOS

Soluções iônicas obtidas pela dissolução de NaCl

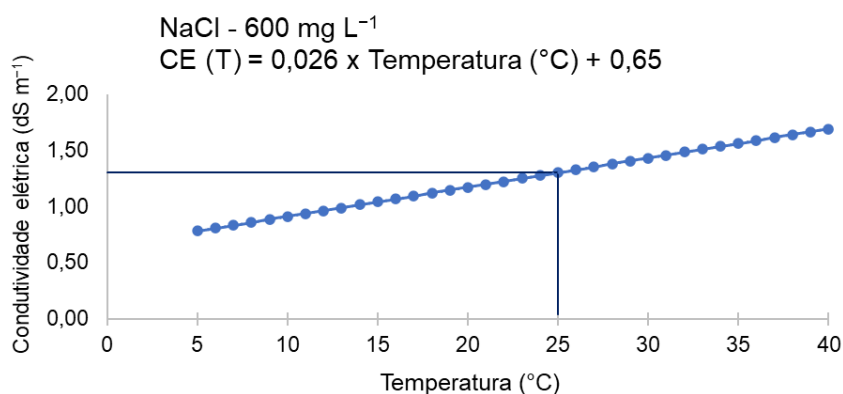
Estima-se que uma solução iônica obtida mediante a solubilização de 600 mg L⁻¹ de NaCl, estando ao nível do mar, aumenta a sua condutividade elétrica (CE) em 0,026 dS m⁻¹ a cada °C de temperatura elevado. Considerando o intervalo entre 5 e 40 °C, a variação da CE para esta concentração foi de 116,6%, o que equivale a um acréscimo de 0,91 dS m⁻¹ (Figura 4a).

Para a solução contendo 1990 mg L⁻¹ de NaCl, a CE apresenta um incremento de 0,086 dS m⁻¹ por °C. No intervalo de 5 a 40 °C, essa variação também atinge 116,7% resultando em um aumento de 3,01 dS m⁻¹ (Figura 4b).

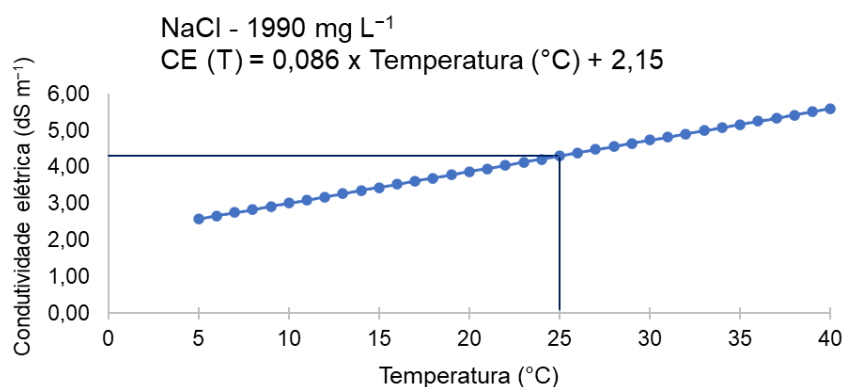
De modo semelhante, a CE da solução iônica preparada com 4760 mg L⁻¹ de NaCl aumenta linearmente em 0,2059 dS m⁻¹ por °C. Além disso, estima-se uma variação total de 116,6% entre 5 e 40 °C, o que representa um incremento de 7,21 dS m⁻¹ (Figura 4c).

Equações foram obtidas através da equação empírica de BARD; FAULKNER (1944) (Equação 4), dados presentes no Anexo 1.

A.



B.



C.

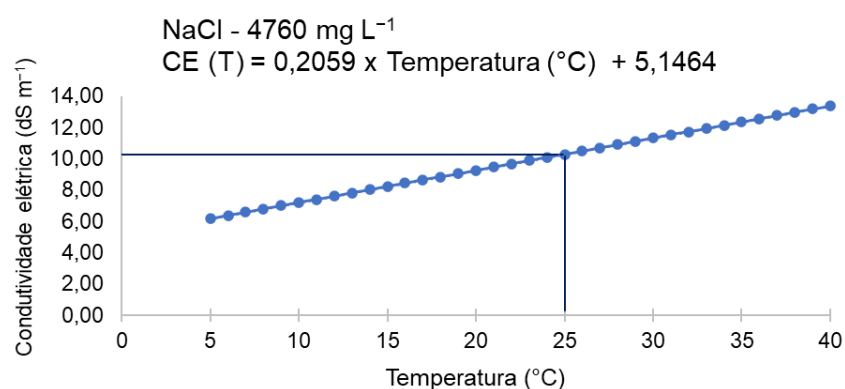


Figura 4. Dinâmica da condutividade elétrica de uma solução iônica preparada mediante a diluição de (A) 600, (B) 1990 e (C) 4760 mg L⁻¹ de NaCl, em função do aumento da temperatura.

Soluções iônicas obtidas pela dissolução de CaCl₂.2H₂O

De forma semelhante a tendência observada para as soluções iônicas obtidas pela solubilização de NaCl, observou-se que a solução iônica contendo 877 mg L⁻¹ de CaCl₂.2H₂O, ao nível do mar, apresenta um aumento de CE de 0,026 dS m⁻¹ para cada °C. No intervalo térmico de 5 a 40 °C, essa variação atinge 116,6%, resultando em um acréscimo de 0,91 dS m⁻¹ (Figura 5a).

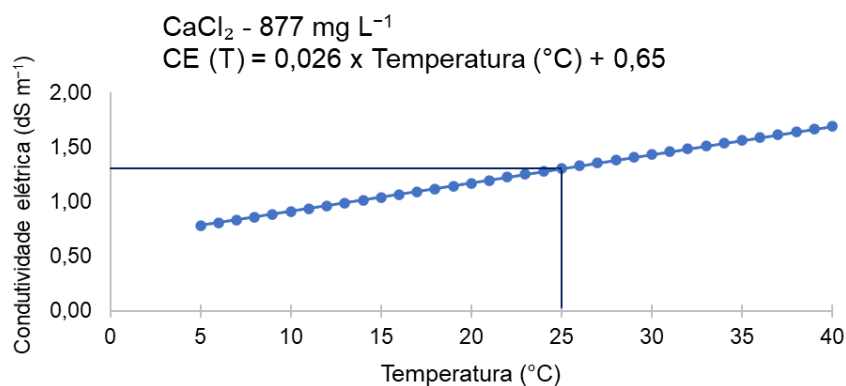
Para a solução com 2911 mg L⁻¹ de CaCl₂.2H₂O, a relação entre temperatura e CE segue o mesmo padrão verificado para o NaCl, com um aumento de 0,086 dS m⁻¹ por °C. Assim, no intervalo analisado, a variação total é de 116,6%, o que corresponde a um incremento de 3,01 dS m⁻¹ (Figura 5b).

Da mesma forma, a solução contendo 6944 mg L⁻¹ de CaCl₂.2H₂O exibe um aumento linear da CE com a elevação térmica de 0,2059 dS m⁻¹. Entre 5 e 40 °C, a

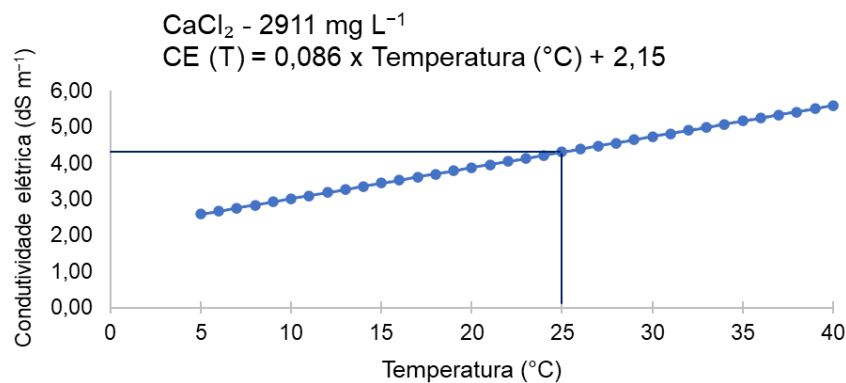
variação acumulada atinge 116,6%, refletindo um aumento de 7,21 dS m⁻¹ (Figura 5c).

Equações foram obtidas através da equação empírica de BARD; FAULKNER (1944) (Equação 4), dados presentes no Anexo 1.

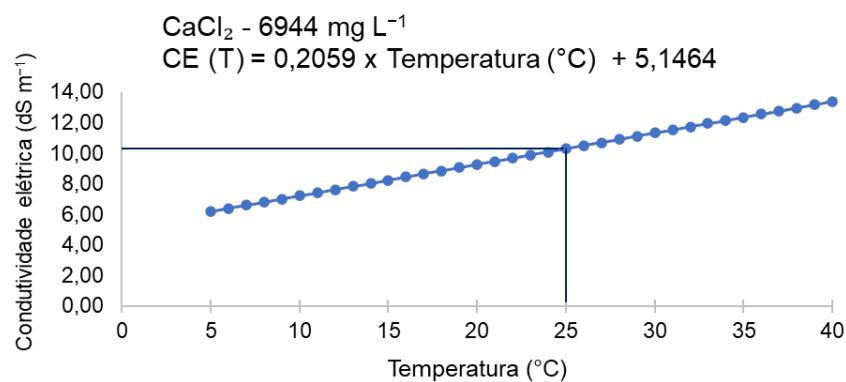
A.



B.



C.



7. DISCUSSÃO

Relação entre a quantidade de sais dissolvidos e o valor da CE NaCl e CaCl₂: a questão do aporte do Cl⁻

Destaca-se o aporte de Cl⁻ à solução iônica quando se trabalha com os dois tipos de sais utilizados na simulação e seus impactos sobre as plantas. Para cada ânion de Cl⁻ aportado pelo NaCl, é possível verificar que dois ânions de Cl⁻ são aportados por ocasião da solubilização do CaCl₂.

Do ponto de vista das plantas, o Cl⁻ em excesso pode ainda prejudicar a absorção de S, devido a interações antagônicas (MARSCHNER, 2012). Em cebolinha, Souza *et al.* (2020) observaram que níveis elevados de salinidade (7,5–9,0 dS m⁻¹) houve um aumento unitário de 0,20 mg kg⁻¹ no acúmulo de Cl⁻, resultando em deficiência nutricional severa e impactando negativamente o crescimento e desenvolvimento da cultura. Estudos indicam que níveis elevados de salinidade na solução nutritiva promovem o acúmulo de Cl⁻ em diversas culturas. Em tomate cereja, Santos *et al.* (2017) verificaram aumento progressivo da absorção de Cl⁻ com o incremento da CE da solução (3,01–10,40 dS m⁻¹).

NaCl e CaCl₂: Dinâmica da CE com o aumento da temperatura

É possível constatar que a condutividade elétrica (CE) das soluções iônicas de NaCl e CaCl₂ aumentou proporcionalmente com a elevação da temperatura de 5°C a 40°C nas diferentes concentrações avaliadas (NaCl: 600, 1990 e 4760 mg L⁻¹; CaCl₂.2H₂O: 877, 2911 e 6944 mg L⁻¹). Outros autores (GHEYI *et al.*, 2016) mencionaram tendência semelhante no contexto do uso de soluções nutritivas, inclusive, eles sugerem a formulação de equações de ajuste linear para a CE em função da temperatura. No caso específico deste trabalho, vale salientar que sua aplicabilidade prática no contexto destes autores, ainda requer validação experimental.

Estudos realizados por Alves-Junior *et al.* (2021) e Martins *et al.* (2023), para determinar a solubilidade de solutos, dentre eles o NaCl e CaCl₂, foi realizado por meio do sistema isotérmico composto por uma célula de vidro encamisada, na qual a água era constantemente recirculada no lado revestido através de um banho

ultratermostático (Marconi, modelo MA-184). O comportamento do CaCl_2 apresentou valores para solubilidade, que são diretamente proporcionais as temperaturas utilizadas (1, 5, 10, 15 e 20 °C), ou seja, quanto maior a temperatura maior a solubilidade. (ALVES-JUNIOR *et al.*, 2021). No estudo realizado por Martins *et al.* (2023), o NaCl apresentou comportamentos diferentes de acordo com o intervalo de temperatura estudado (2 – 90 °C).

O comportamento da solubilidade dos sais pode ser explicado pela Lei de Coincidência de Afinidades pela Água (em inglês: “*Law of Matching Water Affinities*”), proposta por Collins (2004), que está associada a série de Hofmeister. Onde, foi observada a habilidade particular de certos sais de precipitar proteínas em solução aquosa, concluiu-se que quanto mais eficaz o sal fosse em precipitá-las maior é sua capacidade de “ordenar” a água ao seu redor (HOFMEISTER, 1888).

Os íons provocam efeitos na estrutura molecular da água alterando a formação natural das ligações de hidrogênio, por consequência, as moléculas de água se ordenam de forma diferente ao redor de cada íon, os classificando como, caotrópico (possuem fraca ligação com a água e baixo grau de hidratação) ou cosmotrópico (possuem forte ligação com a água e alto grau de hidratação), ou seja, depende da quantidade de moléculas de água que se ordenam ao seu redor. O tamanho do íon também influencia as interações com as moléculas de água, onde íons maiores têm fracas ligações com moléculas de água ao seu redor e íons menores têm o comportamento inverso (KUNZ; NEUEDER, 2009).

De acordo com a literatura, é definido que o NaCl usado adicionado à água, a extremidade positiva do dipolo da água é orientada no sentido dos íons Cl^- , e a extremidade negativa do dipolo da água é orientada no sentido dos íons Na^+ caracterizando um processo endotérmico (KOTZ *et al.*, 2006); para o CaCl_2 se obteve maiores temperaturas iniciais, associado à maior liberação de calor, caracterizando uma reação exotérmica (ZHANG *et al.*, 2020).

Termodinamicamente, quando um sal é composto por dois íons que possuem energias livres de hidratação similares, sua solubilização em meio aquoso é um processo endotérmico ($\Delta H_{\text{sol}} > 0$), ou seja, ocorre a produção de uma solução fria sugerindo que não estão ocorrendo interações fortes do íon com a água (COLLINS, 2004). Já quando composto por íons com diferentes energias livres de hidratação; sua dissolução em meio aquoso é um processo exotérmico ($\Delta H_{\text{sol}} < 0$). Esse processo

provoca um aumento na temperatura da solução, indicando uma forte interação entre o íon cosmotrópico e a água, além de sugerir que os íons de cargas opostas no sal dissolvido tendem a permanecer separados (LO NOSTRO; NINHAM, 2012).

Apesar de terem sido estimadas, para os dois sais NaCl e CaCl₂, o mesmo comportamento nos gráficos, é importante salientar que o comportamento dos sais dissolvidos em água, é diferente, visto que, o tamanho dos íons, mobilidade iônica, grau de hidratação, entalpia da reação e solubilidade dos mesmos diferem. Todos esses fatores estão associados a maior ou menor facilidade que a solução apresenta para conduzir corrente elétrica (BARRETO, 2011).

Comportamento obtido no gráfico com relação aos valores da CE com a variação da temperatura, estão de acordo com a literatura onde é possível observar que altas temperaturas apresentam maiores valores de condutividade; isso ocorre, pois o aumento da temperatura propicia a dissociação de íons e reduz a viscosidade da solução, o que resulta no aumento da condutividade elétrica. (LOEFFLER *et al.*, 1981).

Contextualização dos resultados para o preparo de soluções nutritivas

A hidroponia, como sistema de cultivo sem solo, exige um equilíbrio iônico rigoroso da solução nutritiva para garantir o desenvolvimento adequado das plantas. A CE é um parâmetro fundamental nesse controle, pois reflete a concentração total de íons dissolvidos e, conseqüentemente, a disponibilidade de nutrientes essenciais. No entanto, essas demandas podem variar em função da espécie cultivada e das condições ambientais, influenciando diretamente o potencial osmótico da solução (COSTA *et al.*, 2001).

A absorção de água e nutrientes pelas plantas está diretamente relacionada à CE da solução nutritiva. De acordo com Bresler; Hoffman (1986), o potencial osmótico do meio afeta a captação de água pelo sistema radicular. Além disso, Huet (1994) ressalta que a CE interfere não apenas na absorção hídrica, mas também na absorção de nutrientes, impactando a fisiologia vegetal (BELTRÃO *et al.*, 1997).

O aumento da salinidade da solução nutritiva, que é afetado pela temperatura, intensifica a presença de íons Na⁺, reduzindo a absorção de K⁺ devido ao antagonismo entre esses cátions (TUTEJA *et al.*, 2012). Paulus *et al.* (2012) verificaram essa

relação em alface cultivada em hidroponia, constatando menor absorção de K^+ na presença de Na^+ . Modesto *et al.* (2019) reforçaram que o excesso de Na^+ pode levar a estresse oxidativo, comprometendo a integridade celular da planta.

A elevada salinidade também reduz a absorção de macronutrientes como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , enquanto favorece a absorção de Na^+ e Cl^- , causando desequilíbrios nutricionais. Estudos em diferentes espécies confirmaram que a alta absorção de Na^+ e Cl^- compromete a captação de nutrientes essenciais e altera a relação Na^+/K^+ em raízes, caules e folhas sob estresse salino (GARCIA *et al.*, 2007; BOSCO *et al.*, 2009).

O Ca^{2+} desempenha um papel fundamental na estabilidade das membranas celulares e sua deficiência compromete a absorção de outros nutrientes, especialmente o K^+ (LIMA *et al.*, 2016). Sua translocação nos tecidos vegetais depende da taxa de transpiração (COLLIER; HUNTINGTON, 1983). O fornecimento inadequado desse nutriente leva ao aparecimento de necroses, sobretudo nas extremidades das folhas jovens (COLLIER; TIBBITTS, 1982). O aumento da salinidade na solução nutritiva reduz a absorção de Ca^{2+} , induzindo sua deficiência e comprometendo o desenvolvimento das plantas. Em alface, soluções com 2,85–5,70 mmol L⁻¹ de Ca^{2+} resultaram em maior produção, enquanto doses superiores (8,55 mmol L⁻¹) reduziram a absorção de N, P, K, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn, além de diminuir o acúmulo de Na^+ por efeito competitivo (CARVALHO, 2001).

No almeirão, o aumento da CE reduziu o crescimento da planta, mas manutenção da temperatura da solução nutritiva entre 25–30 °C mitigou os efeitos negativos da salinidade, melhorando a eficiência hídrica até 6,2 dS m⁻¹ (OLIVEIRA *et al.*, 2023). Para cebolinha, contudo, altos níveis de CE (7,5–9,0 dS m⁻¹) inviabilizaram sua comercialização (SOUZA *et al.*, 2020). No coentro, Navarro *et al.* (2020) relataram que o aumento da CE impactou negativamente os centros de reação, a atividade fotoquímica, a eficiência da carboxilação, reduzindo a condutância estomática, a taxa de assimilação de CO₂ e, consequentemente, a produção de biomassa. Além disso, a natureza catiônica da solução afetou a severidade do dano salino, com diferenças significativas entre soluções com prevalência de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} .

De forma geral, o acúmulo excessivo de Na^+ , Ca^{2+} e Cl^- nos tecidos vegetais pode desencadear toxicidade iônica, afetando relações críticas como Na^+/K^+ , Na^+/Ca^{2+} e Cl^-/NO_3^- , o que pode resultar em redução no crescimento até a morte das plantas (CAVALCANTE *et al.*, 2010).

Por fim, em estudo realizado Laboratório de Análise de Sementes do Departamento de Produção Vegetal Setor Agricultura da Faculdade de Ciências Agrônômicas, da Universidade Estadual Paulista (UNESP), em Botucatu SP.; analisando a condutividade elétrica em função do período e da temperatura de embebição para sementes de milho, foi visto que, as temperaturas de 35 e 40°C proporcionaram maiores valores de condutividade elétrica, seguido por 30°C e logo após 25 e 20°C, que apresentaram menores valores para a condutividade elétrica. (GASPAR; NAKAGAWA,2002).

Portanto, este estudo fornece uma base teórica para futuras pesquisas voltadas à formulação de soluções nutritivas otimizadas, visando reduzir perdas de nutrientes e melhorar a eficiência da absorção iônica. A modelagem da CE pode contribuir significativamente para o aprimoramento dos sistemas de monitoramento da qualidade da solução nutritiva, permitindo ajustes precisos para diferentes culturas hidropônicas.

8. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos no presente trabalho, estima-se que são necessários aproximadamente 460 e 1260 mg de NaCl e $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivamente, para elevar em 1dS m^{-1} a condutividade elétrica da solução iônica a 25°C.

Sob mesma concentração, há maior presença de Cl^- em soluções iônicas de CaCl_2 do que de NaCl, sendo isso algo a ser destacado para futuros usos destes sais no preparo de soluções nutritivas para plantas.

Com a elevação da temperatura de 5 para 40 °C estima-se um aumento de 116,7% na condutividade elétrica de soluções iônicas preparadas mediante solubilização de NaCl ou $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Embora verifique-se a manutenção da concentração das soluções iônicas (NaCl ou CaCl_2) com a elevação da temperatura de 5 para 40 °C, uma vez que não se registra a ocorrência de precipitado, há relatos na literatura de que o controle da temperatura e seus efeitos sobre a condutividade elétrica são benéficos para as plantas em sistemas hidropônicos.

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo teórico apresentado, poderá servir como base para investigações futuras voltadas à aplicação prática, incluindo o aprimoramento de sensores e o desenvolvimento de sistemas automatizados para o monitoramento e controle preciso da disponibilidade de nutrientes em ambientes hidropônicos. Dessa forma, este estudo se insere no contexto da modernização da agricultura, contribuindo diretamente para a otimização dos cultivos sem solo, promovendo maior eficiência no uso de recursos e fortalecendo a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

REFERÊNCIAS

- ALVES-JUNIOR, C.A.; MARTINS, M.J.N.; BETIOL, L.F.L.; BARRETO, A.C.S. Ciência & Tecnologia de alimentos. Pesquisa e práticas contemporâneas. **Solubilidade de cloreto de sódio e seus sais substitutos para utilização na indústria de alimentos**. Editora Científica Digital, **02/07/2021**. Doi 10.37885/210303747
- 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, n. 11, p. 1-8, 2018.
- ATKINS, P., JONES, L., LAVERMAN, L. **Princípios de Química: Questionando a Vida Moderna e o Meio Ambiente**, 7ª edição, Editora Bookman, Porto Alegre, 2018.
- ATZORI, G.; NISSIM, W. G.; CAPARROTTA, S.; SANTANTONI, F.; MASI, E. Seawater and water footprint in different cropping systems: a chicory (*Cichorium intybus* L.) case study. **Agricultural Water Management**, v. 211, p. 172-177, 2019.
- BARD, Y. **Nonlinear Parameter Estimation**. 1st. ed. San Diego: Academic Press, 1974.
- BARD, A. J.; FAULKNER, L. R.; **Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications**. 2. ed. New York: Wiley, 2001.
- BARRETO, C. A. F. **Propriedades de transporte de surfactantes dicatiónicos**. 2011. 43f. Dissertação (Mestrado em Química) – Departamento de Química, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.
- BELTRÃO, J.; TRINDADE, D.; CORREIA, P.J. Lettuce yield response to salinity of. sprinkle irrigation water. **Acta Horticulturae**, v.449, p.623-627, 1997.
- BOSCO, M. R. O.; OLIVEIRA, A. B.; HERNANDEZ, F. F. F.; LACERDA, C. F. Influência do estresse salino na composição mineral da berinjela. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 2, p. 157-164, 2009.
- 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. p.933-951.
- BRESLER, E.; HOFFMAN, G.J. Irrigation management for soil salinity control: theories and tests. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.1552-1560, 1986.
- CAMPOS JÚNIOR, J. E.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; SILVA, Ê. F. F.; MARTINS, J. B.; ROLIM, M. M. Consumption, efficiency and water content of arugula under different management of brackish nutritional solutions. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 6, p. 885-892, 2018.

CARVALHO, C. P. **Doses de cálcio e acúmulo de nutrientes em plantas de alface cultivadas por aeroponia** - Piracicaba, 2001. 74p

CAVALCANTE, L. F.; VIEIRA, M. S.; SANTOS, A. F.; OLIVEIRA, W. M.; NASCIMENTO, J. A. M. Água salina e esterco bovino líquido na formação de mudas de goiabeira cultivar Paluma. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.32, n.1, p.251-261, 2010.

CASTELLANE, P. D.; ARAÚJO, J. A. **Cultivo sem solo hidroponia**. 4. ed. Jaboticabal: Funep, 1995. 43 p.

CHEMELLO, E. A Química na Cozinha apresenta: O Sal. **Revista Eletrônica ZOOM da Editora Cia da Escola** – São Paulo, Ano 6, nº 3, 2005. Disponível em: <http://www.educadores.diaadia.pr.gov.br/arquivos/File/2010/artigos_teses/2011/ciencias/25sal.pdf>.

COLLINS, K.D. Ion hydration: Implications for cellular function, polyelectrolytes, and protein crystallization. **Biophysical Chemistry**, 2006, 119, 271-281.

COLLIER, G.F.; HUNTINGTON, V.C. The relationship between leaf growth, calcium accumulation and distribution, and tipburn development in field-grown butterhead lettuce. **Scientia Horticulturae**, v. 21, p. 123-128, 1983

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.

Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAM. **Resolução Nº 357**, de 17 de março de 2005.

COSTA, P. C., DIDONE, E. B., SESSO, T. M., CAÑIZARES, K. A. L., & GOTO, R. Condutividade elétrica da solução nutritiva e produção de alface em hidroponia. **Scientia Agricola**, v.58, p. 595–597, 2001.

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, p. 150-155,2017.

Cruz, A. F. da S., Silva, G. F. da, Silva, Ê. F. de F. e, Soares, H. R. e, Santos, J. da S. G., & Lira, R. M. de. Stress index, water potentials and leaf succulence in cauliflower cultivated hydroponically with brackish water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, p. 622-627, 2018.

CUSSLER, E. L. **Diffusion. Mass transfer in fluid systems**. 3 ed. Cambridge, England: Cambridge University Press ,2007.

DENARO, A. R. **Fundamentos de Eletroquímica**, Edgard Blucher: São Paulo, 1974.

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.; FILHO, E. G. **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. 2.ed., Fortaleza, INCT Sal, 2016. Cap.3, p.17-34.

GARCIA, G. O.; FERREIRA, P. A.; MIRANDA, G. V.; NEVES, J. C. L.; MORAIS, W. B.; SANTOS, D. B. **Teores foliares dos macronutrientes catiônicos e suas relações com o sódio em plantas de milho sob estresse salino**. Idesia, Arica, v. 25, n. 3, p. 93-106, 2007.

GASPAR, C. M.; NAKAGAWA, J. Teste de condutividade elétrica em função do período e da temperatura de embebição para sementes de milheto. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 24, n. 2, p. 82–89, 2002.

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

HARRIS, D.C. Análise química **quantitativa**. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012.

HOFMEISTER F. Zur Lehre von der Wirkung der Salze. Zweite Mittheilung. **Archiv for Experimentelle Pathologie und Pharmakologie**, 1888, 24, 247-260.

HOLANDA, J. S.; AMORIM, J. R. A.; FERREIRA NETO, M.; HOLANDA, A. C.; SÁ, F. V. S. Qualidade da água para irrigação. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; GOMES, E. (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2 ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap. 4, p. 35-50.

Kotz, J. C.; Treichel Jr., P. M. **Química Geral**. Trad. 5 ed. Thomson, 2003. Hein, M.; Arena, S. Fundamentos de Química Geral. LTC. 9ª edição, 2006.

KUNZ, W; NEUEDER, R. An attempt of a general overview. In: KUNZ, W. Specific ion effects. **World Scientific**: Singapore, p.3-54, 2009.

INÁCIO, J.T.M; SMYCHNIUK, A. Efeito da salinidade na absorção de água por sementes de *Cedrela fissilis* Vell., *Cordia goeldiana* Huber *Astronium lecointei* Ducke. **Revista de Ciências Agro ambientais**, v. 19, n. 1, p. 42-45, 2021.

LIMA, G.S. DE., OLIVEIRA, L. D. DE. , GHEYI, H. R., SOARES, L. A. A., LACERDA, C. F. DE., SANTOS, J. B. DOS., ARAÚJO, B. M. DE. Cultivo de algodão colorido irrigado com água salina sob fertilização com potássio e nitrato/amônio. **African Journal of Agricultural**, 11(1):32-39, 2016

LOEFFLER, T.M. **The bulk conductivity test as an indicator of soybean seed quality**. 1981. 181f. Thesis (Master Science) - University of Kentucky, Lexington.

LO NOSTRO, P.; LOPES, J.R.; NINHAM, B.W.; BAGLIONI, P. Effect of Cations and Anions on the Formation of Polypseudorotaxanes. **Journal of Physical Chemistry B**, v.106, p.2166-2174,2002.

LÓPEZ, U. P.; APODACA, J. M.; PETITE, A. M.; RUEDA, A. M. Responses of nutrient dynamics in barley seedlings to the interaction of salinity and carbon dioxide enrichment. *Environmental and Experimental Botany*, **Oxford**, v.99, p. 86-99,2014.

MARTINS, M. J. N.; SANCHES, M. A. R., POLACHINI, T. C., OLIVEIRA, E. B. DE, COIMBRA, J. S. DOS R., TELIS-ROMERO, J. Solubility of different salts used in the control of the water activity of foods. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 47, p. e018722, 2023

MACINNES DUNCAN A. **Princípios de Eletroquímica**. Universidade da Califórnia, Dover, 1961, 461p.

MCCLESKEY, R. B; NORDSTROM, D. K.; RYAN, J. N. Electrical conductivity method for natural Waters. **Applied Geochemistry**, v.26, p 227-229,2011.

MAIA, C.E; MORAIS, E.R.C. DE.; OLIVEIRA, M. DE .. Classificação da composição iônica da água de controle usando regressão linear múltipla. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 1, pág. 55–59, 2001.

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrititon of higher plants**. 3 ed. Australia: Academic Press, 2012, 649 p.

MEDEIROS, J. F.; GHEYI, H. R.; NASCIMENTO, I. B. Salinidade de solo e da água e seus efeitos na produção agrícola. In: GHEYI, H. R.; PAZ, V. P. S.; MEDEIROS, S. S.; GALVÃO, C. O. **Recursos hídricos em regiões semiáridas: estudos e aplicações**. 1. ed. Campina Grande: Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2012. Cap. 10, p. 190-223.

MENEZES, J. S.; CAMPOS, V. P.; COSTA, T. A. C. Desalination of brackish water for household drinking water consumption using typical plant seeds of semi arid regions. **Desalination**, v. 281, p. 271–277, 2011.

MIZUHATA, M. Electrical conductivity measurement of electrolyte solution. **Electrochemistry**, v. 90, n. 10, p. 102011-102011, 2022.

MOORE, W. J. **Physical Chemistry**. Longmans green and Co Ltd. London, 1962. p. 844.

NADLER, A. Methodologies and the practical aspects of the bulk soil EC (σ_a)—soil solution EC (σ_w) relations. **Advances in agronomy**, v. 88, p. 273-312, 2005.

NIU, G.; CABRERA, R. I. Growth and physiological responses of landscape plants to saline water irrigation: A review. **HortScience**, v. 45, n. 11, p. 1605-1609, 2010.

OLIVEIRA, H. N. M. **Determinação de dados de equilíbrio para sistemas aquosos com eletrólitos**. 1999. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

OLIVEIRA, T. F. DE .; SANTOS JÚNIOR, J. A.; SILVA, M. G. DA .; GHEYI, H. R., ALMEIDA, J. C. DE .; GUISELINI, C. Cultivo de chicória sob soluções nutritivas preparadas em águas salobras e aplicadas em diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 719–728, 2023.

PASTORE, H.O. Condução iônica e eletrólitos sólidos. Chemkeys-Liberdade para aprender, 2001.

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, p.110-117, 2012.

RIBEIRO, G. M.; MAIA, C. E.; MEDEIROS, J. F. Uso da regressão linear para estimativa da relação entre a condutividade elétrica e a composição iônica da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.15-22, 2005.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: U.S. Salinity Laboratory Staff, USDA 1954. 160p.

ROCHA, A. S.; LOPES, E. G. M.; PAZUTTI, L. V. B.; VITAL, N. DE A. A.; TAMIASSO-MARTINHON, P.; SOUSA C. Planejamento Pedagógico Reverso Aplicado ao Experimento “Método da Fronteira Móvel”. **Rev. Virtual Quim.**v.13, p.621-634, 2021.

RODRIGUES, L. C. G. **NaNet: Novel Amorphous Network polymerelectrolytes**. 2012. 322 f. Tese (Doutorado em Química) Departamento de Ciências, Universidade do Minho, 2012.

RUSYDI, A.F. Correlation between Conductivity and Total Dissolved Solid in Various Type of Water: A Review. **Earth and Environmental Science**, v.118, 2018.

SAKAMOTO, M.; UENISHI, M.; MIYAMOTO, K.; SUZUKI, T. Effect of root-zone temperature on the growth and fruit quality of hydroponically grown strawberry plants. **Journal of Agricultural Science**, v. 8, n. 5, p. 122-131, 2016.

SALT INSTITUTE, Disponível em: <<http://saltinstituto.org/About-salt>> Acessado em 02/08/2018.

SANTOS, A. N. DOS .; SILVA, Ê. F. DE F. E .; SILVA, G. F. DA .; BEZERRA, R. R.; PEDROSA, E. M. R. Concentração de nutrientes em tomate cereja sob manejos de aplicação da solução nutritiva com água salobra. **Revista Ciência Agronômica**, v.48, p.576- 585, 2017.

SANCHES, C. E.; ARAÚJO, J. A. C.; SPELLING, A. C.; VILLELA JUNIOR, L. V. E. Cultivo hidropônico da alface do grupo americana com resfriamento da solução nutritiva. In: **Congresso Brasileiro de Olericultura**. 2005.

SAWYER, D T.; SOBKOWIAK, A.; ROBERTS, J. L. **Electrochemistry for Chemists**, 2. ed., Wiley: New York, 1995.

SCHOSSLER, T.R.; MACHADO, D.M.; ZUFFO, A.M.; ANDRADE, F.R.; PIAULINO, A.C. **Salinidade: efeitos na fisiologia e na nutrição mineral de plantas**. Enciclopédia biosfera, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.8, n.15; p. 1563-1578, 2012.

SCHWARZ, M. Soilles culture management. Controlling Systems, Cap 9, p131-146, Springer-Verlag, 1995. 195 p.

SILBER, A.; BAR-TAL, A. Nutrition of substrate-grown plants. In: Raviv, M.; Lieth, J. H. (ed.) **Soiless culture: Theory and practice**. Amsterdam: Elsevier, 2008. Cap. 8, p. 291-339.

SILVA, M. G. **Coentro hidropônico sob diferentes condições de cultivo relacionadas à solução nutritiva: temperatura, salinidade e recirculação**. 2019. 137 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, 2019.

SILVA, M. G.; ALVES, L. S.; SOARES, T. M.; GHEYI, H. R.; BIONE, M. A. A. Growth, production and water use efficiency of chicory (*Cichorium endivia* L.) in hydroponic systems using brackish waters. **Advances in Horticultural Science**, v. 34, n. 3, 2020a.

SOARES, H. R.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; SILVA, Ê. F. DE F. E.; ROLIM, M. M.; SILVA, G. F. Water and physiological relationships of lettuce cultivated in hydroponics with brackish waters. **Rev. Ciênc. Agron.**, v. 50, n. 2, p. 216-222, 2019.

SOARES, T. M.; DUARTE, S. N.; SILVA, Ê. 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, E. (ed.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2 ed. Fortaleza: INCTSal, 2016. Cap. 23, p. 373-294.

SOUZA, C. D. DA S.; SILVA, G. F. DA S.; MENEZES, S. M.; MORAIS, J. E. F. DE .; SANTOS JÚNIOR, J. A.; SILVA, A. O. DA . Nutrient and inorganic solute (Na^+ and Cl^-) content in green onion plants under hydroponic cultivation using brackish water. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, p. e013320, 2020.

STEFANELLO, R.; VIANA, B. B.; GOERGEN, P. C. H.; NEVES, L. A. S.; NUNES, U. R. Germination of chia seeds submitted to saline stress. **Brazilian Journal Biology**. v.80, n.2, p.285-289, 2020.

SUHARDIYANTO, H. **Teknologi Rumah Tanaman Untuk Iklim Tropika Basah Pemodelan dan Pengendalian Lingkungan**. PT Penerbit IPB Press, 2009.

TAIZ, L., ZEIGER, E., MOLLER, I. M., & MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 4ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TOMASI, N.; PINTON, R.; DALLA COSTA, L.; CORTELLA, G.; TERZANO, R.; MIMMO, T.; SCAMPICCHIO, M.; CESCO, S. New 'solutions' for floating cultivation system of ready-to-eat salad: A review. **Trends Food Sci. Technol**, v. 46, p. 267-276, 2015.

TUTEJA, N.; GILL S. S. Climate Change and Plant Abiotic Stress Tolerance. Em: TUTEJA - GILL et al. (Eds.). **Melhorando a resistência das culturas ao estresse abiótico**. Wiley-Blackwell, EUA: Boschstr, Cap. 4, 2012, 71-96p.

VALIM, P. A ligação iônica. **Blog Ciência em ação**. Santa Catarina, 30 set 2021. Disponível em: <https://cienciaemacao.com.br/blog/>. Acesso em: 13 mar. 2025.

VILLELA JÚNIOR, L. V. E.; ARAÚJO, J. A. C. DE.; FACTOR, T. L. Análise do resfriamento da solução nutritiva para cultivo hidropônico do morangueiro. **Engenharia Agrícola**, v. 24, n. 2, p. 338–346, maio 2004.

VOGEL, A. **Química Analítica Qualitativa**. 5ª ed. São Paulo: Editora Mestre Jou, 1981. ed. São Paulo: Editora Mestre Jou, 1981.

WULLSCHLEGER, S.D.; LYNCH, J.P.; BERNTSON, G.M. Modeling the belowground response of plants and soil biota to edaphic and climatic change What can we expect to gain? **Plant and Soil**, v.165, p.149-160, 1994.

ZHANG, D., WANG, D., ZHAO, J., WANG, Y., LIU, Z., MA, X. Assessment of the thermal and microstructural properties of metakaolin-air lime based materials at an early age, **Applied Clay Science**, v. 191, 2020.

ANEXOS

Anexo 1 - Propriedades iônicas infinitas diluídas em soluções aquosas a 25 °C.

TABLE 2.3.2 Ionic Properties at Infinite Dilution in Aqueous Solutions at 25°C

Ion	$\lambda_0, \text{cm}^2 \Omega^{-1} \text{equiv}^{-1a}$	$u, \text{cm}^2 \text{sec}^{-1} \text{V}^{-1b}$
H^+	349.82	3.625×10^{-3}
K^+	73.52	7.619×10^{-4}
Na^+	50.11	5.193×10^{-4}
Li^+	38.69	4.010×10^{-4}
NH_4^+	73.4	7.61×10^{-4}
$\frac{1}{2}\text{Ca}^{2+}$	59.50	6.166×10^{-4}
OH^-	198	2.05×10^{-3}
Cl^-	76.34	7.912×10^{-4}
Br^-	78.4	8.13×10^{-4}
I^-	76.85	7.96×10^{-4}
NO_3^-	71.44	7.404×10^{-4}
OAc^-	40.9	4.24×10^{-4}
ClO_4^-	68.0	7.05×10^{-4}
$\frac{1}{2}\text{SO}_4^{2-}$	79.8	8.27×10^{-4}
HCO_3^-	44.48	4.610×10^{-4}
$\frac{1}{3}\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}$	101.0	1.047×10^{-3}
$\frac{1}{4}\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$	110.5	1.145×10^{-3}

^aFrom D. A. MacInnes, "The Principles of Electrochemistry," Dover, New York, 1961, p. 342

^bCalculated from λ_0 .

Fonte:MCINNES,1961